

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106

MEMORIA

INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA

Nº 27

FACULTAD DE INGENIERÍA



MEMORIA

Investigaciones en Ingeniería

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106

Núm. 27

(2024)

Sumario

	<i>Págs.</i>
Editorial – Innovación y Aplicaciones de la Ingeniería.	
Rafael Sotelo	1
Editorial Invitada – 1er Taller Latinoamericano de Ingeniería de Software Cuántico.	
José García-Alonso, Rafael Sotelo, Alejandro Fernández	2
Análisis comparativo entre el método basado en desplazamientos (MBD) y el método basado en fuerzas (MBF) aplicado a edificio dual de 5 pisos	
<i>Comparative analysis between the displacement-based method (MBD) and the force-based method (MBF) applied to a dual 5-story building</i>	
G. Zavala Cáceres, G. Villarreal Castro	3-45
Machine Learning en la detección y predicción de enfermedades del ganado: una visión general	
<i>Machine Learning in the detection and prediction of livestock diseases: an overview</i>	
M. Vieto-Vega, Y. Moreno-Gonzalez	46-59
Synthesis and characterization of methyl methacrylate - glycerol hydrogels by polymerization in acid medium	
<i>Síntesis y caracterización de hidrogeles de glicerol-metacrilato obtenido por polimerización en medio ácido</i>	
L. Trujillo-Vargas	60-75

Significance of Total Quality Management and Doing Right First Time in Promoting Environmental Sustainability

Importancia de la Gestión de la Calidad Total y de Hacer las Cosas Bien a la Primera Vez para Promover la Sostenibilidad Medioambiental

L. J. Márquez Figueroa, J. L. García Alcaraz, J. R. Díaz Reza, J. A. Gil López **76-90**

Thermo-Mechanical Process-Induced Residual Stresses and Deformation Analysis During Manufacturing of Hull Structure

Tensiones residuales termo mecánicas inducidas por el proceso y análisis de deformación durante la fabricación de la estructura del casco

S. Ahmed, M. Asif, A. Ali Zaidi **91-109**

Diseño Sismorresistente de un Sistema de Muros Estructurales Aplicando la Norma E.030 del 2003 y 2018 en la Ciudad de La Libertad

Earthquake Resistant Design of a Structural Wall System applying Standard E.030 of 2003 and 2018 in the City of La Libertad

M. J. Rupay Vargas, R. R. Parra Lavado, J. S. López Yarango **110-128**

Experimental Study of a Brackish Water Desalination Plant

Estudio experimental de una planta de desalinización de agua salobre

I. Asif, M. Hammad Baig, S. Hasnain, S. Ahmed **129-144**

Fatigue failure analysis of washing machine top frame under cycling loading – an investigative study in mitigating market complaint

Análisis de fallas de fatiga del marco superior de la lavadora bajo la carga cíclica: un estudio de investigación mitigando la queja del mercado

S. Hasnain, M. M. Uz Zaman Siddiqui, A. Tabassum, S. H. Raza Naqvi, A. A. Naqvi **145-160**

Comparación de sistemas estructurales en edificio de 5 pisos: Base fija vs. interacción suelo-estructura por modelo Barkan-Savinov en Arequipa, Perú

Comparison of structural systems in a 5-story building: Fixed base vs. Soil-structure interaction by Barkan-Savinov model in Arequipa, Peru

R. Mamani, M. Ramos, G. Villarreal, A. Falcón **161-179**

Artículos presentados en el 1er Taller Latinoamericano de Computación Cuántica (TLISC 2024)

A Review on Quantum Machine Learning and Quantum Cryptography

Una revisión sobre el aprendizaje automático cuántico y la criptografía cuántica

M. Solar, F. Cisternas Alvarez, J.-P. Villacura, L. Dombrovskaia

180-199

Detectando un Espía con Criptografía Cuántica

Detecting a Spy with Quantum Cryptography

M. Solar, J.-P. Villacura, F. Cisternas Alvarez, L. Dombrovskaia

200-219

Implementación Cuántica de un Algoritmo Genético

Quantum Implementation of a Genetic Algorithm

M. Solar, V. Figueroa, F. Manriquez, F. Pizarro, L. Dombrovskaia

220-237

Desafíos en la integración de QPUs a sistemas HPC clásicos

Challenges in integrating QPUs into classical HPC systems

A. Pousa, V. Sanz

238-247

Supply and Demand in the Training of Quantum Software Engineering Workforce

Oferta y Demanda en la Formación de Personal para la Ingeniería de Software Cuántico

A. M. Aparicio-Morales, E. Moguel, J. Garcia-Alonso, A. Fernandez, L. M. Bibbo, J. M. Murillo

248-256

What's Special about Requirements Engineering for Quantum-Classical Systems?

¿Qué tiene de especial la ingeniería de requisitos para los sistemas cuántico-clásicos?

H. Pendenti, L. Pantoja Yopez, R. Perez Castillo, J. A. Hurtado Alegria, L. Antonelli, A. Fernandez

257-265

Una adaptación del UML Testing Profile para el Testing de Software Cuántico

An Adaptation of the UML Testing Profile for Quantum Software Testing

I. García Rodríguez de Guzmán, M. Rodríguez Monje, M. Piattini Velthuis, M. T. Merchan Quintana **266-284**

Modelling Quantum Software: An Annotated Bibliography

Modelado de software cuántico: una bibliografía comentada

L. M. Bibbo, A. Fernandez, J. M. Suarez, O. Pastor **285-301**

Integración de Webots y Qiskit para la experimentación con circuitos cuánticos como controladores robóticos

Integration of Webots and Qiskit for experimentation with quantum circuits as robotic controllers

D. C. Luna-Márquez **302-312**

Lista de Autores – Memoria Investigaciones en Ingeniería **313-315**

Lista de Revisores – Memoria Investigaciones en Ingeniería **316**

Editorial – Innovación y Aplicaciones de la Ingeniería: Un Vistazo al Futuro.

Con gran satisfacción presentamos el vigésimo séptimo número de Memoria Investigaciones en Ingeniería, una publicación comprometida con la difusión de investigaciones innovadoras y relevantes en el campo de la ingeniería. En esta edición, hemos reunido un conjunto de trabajos que abordan retos contemporáneos y proponen soluciones técnicas aplicadas en diversas áreas del conocimiento. La diversidad de los temas tratados refleja la amplitud y profundidad del impacto de la ingeniería en nuestra sociedad.

El primer artículo de este número realiza un análisis comparativo entre dos métodos fundamentales en la ingeniería estructural: el basado en desplazamientos (MBD) y el basado en fuerzas (MBF). Aplicado a un edificio dual de cinco pisos, este trabajo profundiza en la efectividad de ambos enfoques, ofreciendo una guía para ingenieros en el diseño de estructuras resilientes.

La inclusión de la inteligencia artificial en el sector agropecuario toma protagonismo con un estudio que aborda la detección y predicción de enfermedades en ganado mediante Machine Learning. Este artículo revisa los avances recientes y destaca el potencial de esta tecnología para optimizar la productividad y garantizar la salud animal.

En el campo de los materiales, presentamos una investigación sobre la síntesis y caracterización de hidrogeles de metacrilato de glicerol obtenidos por polimerización en medio ácido. Este desarrollo no solo contribuye al avance en la ingeniería de materiales, sino que también abre posibilidades en aplicaciones biomédicas y medioambientales.

La sostenibilidad ambiental es el eje de otro artículo que resalta la relevancia de la Gestión de la Calidad Total (TQM) y la filosofía de “hacer las cosas bien a la primera vez”. Los autores analizan cómo estas prácticas impulsan la sostenibilidad empresarial y contribuyen a la protección del medio ambiente.

En la ingeniería naval, un estudio sobre las tensiones residuales y la deformación termo-mecánica durante la fabricación de estructuras de cascos aborda desafíos críticos en el diseño y producción, con implicaciones significativas para la industria marítima.

La sismorresistencia también es un tema destacado en esta edición, con un análisis comparativo de las normas E.030 del 2003 y 2018 aplicado a la ciudad de La Libertad. Este artículo proporciona perspectivas valiosas sobre cómo el diseño normativo puede influir en la seguridad estructural frente a eventos sísmicos.

La gestión hídrica es explorada a través de un estudio experimental sobre plantas de desalinización de agua salobre. Este trabajo ofrece resultados significativos que pueden contribuir a la solución de problemas de abastecimiento de agua en regiones afectadas por la escasez.

Los siguientes artículos abordan análisis de fallas de fatiga en componentes estructurales, comparaciones de sistemas estructurales basados en interacción suelo-estructura, y estudios específicos en contextos regionales como Arequipa, Perú. Estas investigaciones ilustran cómo la ingeniería aplicada puede abordar tanto problemas técnicos como desafíos sociales en diferentes partes del mundo.

Finalmente, incluimos una sección especial con nueve artículos que fueron presentados en el 1er Taller Latinoamericano de Computación Cuántica.

Agradecemos a los autores, revisores y lectores por su contribución al desarrollo continuo de nuestra revista. Los invitamos a explorar los contenidos de esta edición y a participar en futuras convocatorias para continuar impulsando el conocimiento en ingeniería.

Dr. Ing. Rafael Sotelo
Editor en Jefe
Facultad de Ingeniería
Universidad de Montevideo

Editorial Invitada – 1er Taller Latinoamericano de Ingeniería de Software Cuántico.

La semana del 12 de Agosto de 2024 se desarrolló, en la Universidad Nacional del Sur de Bahía Blanca, en Argentina, el 1er Taller Latinoamericano de Ingeniería de Software Cuántico. El mismo tuvo como marco la 50° Conferencia Latinoamericana de Informática (CLEI) y las 53° Jornadas Argentinas de Informática (JAIIO) y contó con un importante número de presentaciones y una rica audiencia.

En esta primera edición, se presentaron 9 artículos completos, 4 artículos cortos, 2 reportes de industria y una conferencia invitada, con contribuciones de investigadores y tecnólogos de Chile, España, Argentina, Uruguay, Colombia y Estados Unidos. Las presentaciones abarcaron diversos temas relacionados con la computación cuántica y sus aplicaciones. Entre las presentaciones vinculadas explícitamente a ingeniería de software cuántico, se examinaron temas como el modelado y pruebas de software cuántico, el impacto de la computación cuántica en el desarrollo de software y los desafíos de capacitar a una fuerza laboral en ingeniería de software cuántico. El taller también contó con presentaciones relacionadas a la criptografía cuántica, incluyendo una implementación de la distribución de claves cuánticas para detectar espionaje, y el uso de la computación cuántica para resolver el Problema del Ciclo Hamiltoniano. Dando cuenta de los usos actuales y futuros de esta tecnología emergente, se presentaron avances en investigaciones sobre la aplicación de la computación cuántica en el dominio de la salud, buscando utilizar algoritmos cuánticos para optimizar las prescripciones de medicamentos en base a datos farmacogenómicos y aprendizaje automático cuántico, sobre algoritmos genéticos cuánticos y sobre la integración de unidades de procesamiento cuántico con sistemas clásicos de computación de alto rendimiento. Este este volumen, se reproducen en detalle algunas de las investigaciones presentadas.

Los organizadores generales José Garcia-Alonso (Universidad de Extremadura), Rafael Sotelo (Universidad de Montevideo) y Alejandro Fernandez (Universidad Nacional de La Plata), agradecemos a todos los autores y miembros del comité de programa por haber hecho posible este espacio de intercambio y generación de comunidad. Agradecemos al CLEI, JAIIO, y la Universidad Nacional del Sur por acoger al TLISC y ofrecer el marco ideal. Agradecemos también a la Fundación Williams por su apoyo económico, que nos permitió otorgar seis becas para asistir al taller para estudiantes de doctorado, investigadores en formación, o estudiantes universitarios avanzados, y a la revista . “Memoria Investigaciones en Ingeniería” (ISSN: 2301-1106), editada por la Universidad de Montevideo por publicar este volúmen.

Los esperamos en el 2° TLISC 2025, en Valparaíso, Chile.

Dr. Ing. José Garcia-Alonso
Organizador General
TLISC 2024
**Universidad de
Extremadura**

Dr. Ing. Rafael Sotelo
Organizador General
TLISC 2024
**Facultad de Ingeniería
Universidad de Montevideo**

Dr. Ing. Alejandro Fernández
Organizador General
TLISC 2024
**Universidad Nacional de
La Plata**

Análisis comparativo entre el método basado en desplazamientos (MBD) y el método basado en fuerzas (MBF) aplicado a edificio dual de 5 pisos

Comparative analysis between the displacement-based method (MBD) and the force-based method (MBF) applied to a dual 5-story building

Análise comparativa entre o método baseado em deslocamento (MBD) e o método baseado em força (MBF) aplicados a um edifício duplo de 5 andares

Guimo Zavala Cáceres¹, Genner Villarreal Castro^{2,}*

Recibido: 27/03/2024

Aceptado: 09/10/2024

Resumen. - Esta investigación se aborda con el propósito de establecer el control de los efectos de mayores derivas en edificaciones aplicando los métodos de lineamientos sísmicos conforme a parámetros de la NTP E0.30, como estrategia de diseño bajo el enfoque del método basado en desplazamientos. La estructura como muestra es una edificación común con un sistema dual de 5 pisos que está ubicado en la ciudad de Arequipa, distrito de Cerro Colorado, para documentar cada cambio estructural en el proyecto se apoya en la utilización del programa informático de análisis estructural ETABS. Utilizando métodos de diseño sísmico basados en fuerzas como fundamento base y consiguientemente ser evaluado utilizando métodos de diseño sísmico basados en desplazamientos, que demostró buenas prácticas de ingeniería de diseño. Éste estudio se centra en la implementación del nuevo enfoque utilizando métodos modernos de diseño sísmico planteadas por Priestley et al., 2007 para evaluar edificios específicos y compararlos con los estándares destacados. Este nivel de trabajo es de naturaleza puramente teórica, la investigación de los métodos de diseño sísmico planteados se lleva a cabo a través de los estándares de diseño sísmico, permisibles en la norma peruana de diseño sismorresistente del RNE, el principal objetivo de este estudio es alcanzar los resultados esperados del comportamiento de las edificaciones bajo las aceleraciones del terreno, se determinaron los posibles daños de la estructura en caso de sismos severos o sismo de diseño así como para los diferentes niveles de sismo, se verificaron los máximos desplazamientos de la estructura, y se identificaron la condiciones contrapuestas de los métodos de delineamientos planteados.

Palabras clave: derivas, sistema dual, diseño sísmico, sismo severo, desplazamiento, fuerzas.

(*) Autor de correspondencia

¹ Ingeniero Civil, Universidad de San Martín de Porres (Perú), guimo_zavala@usmp.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-8818-4604>

² Doctor en Ingeniería, Universidad de San Martín de Porres (Perú), gvillarrealc@usmp.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1768-646X>

Summary. - This research is addressed with the purpose of establishing control of the effects of greater drifts in buildings by applying seismic guidelines methods in accordance with parameters of the NTP E0.30, as a design strategy under the approach of the method based on displacements. The structure as a sample is a common building with a dual 5-story system that is located in the city of Arequipa, Cerro Colorado district. To document each structural change in the project, it is supported by the use of structural analysis software such as ETABS. . Using force-based seismic design methods as a base foundation and subsequently being evaluated using displacement-based seismic design methods that demonstrated good design engineering practices. This study focuses on the implementation of the new approach using modern seismic design methods proposed by Priestley et al., 2007 to evaluate specific buildings and compare them with leading standards. This level of work is purely theoretical in nature, the investigation of the proposed seismic design methods is carried out through the seismic design standards, permissible in the Peruvian standard precisely in the RNE, the main objective of this study is to achieve the expected results of the behavior of the buildings underground accelerations, the possible damage to the structure in case of severe earthquakes or design earthquakes were determined, as well as for the different earthquake levels, the maximum displacements of the structure were verified, and The contrasting conditions of the proposed delineation methods were identified.

Keywords: drifts, dual system, seismic design, severe earthquake, displacement, forces.

Resumo. - Esta pesquisa é abordada com o propósito de estabelecer o controle dos efeitos de maiores desvios em edifícios aplicando métodos de diretrizes sísmicas de acordo com os parâmetros do NTP E0.30, como uma estratégia de projeto sob a abordagem do método baseado em deslocamentos. A estrutura como amostra é um edifício comum com um sistema duplo de 5 andares que está localizado na cidade de Arequipa, distrito de Cerro Colorado. Para documentar cada mudança estrutural no projeto, é suportado pelo uso de software de análise estrutural como o ETABS. . Usando métodos de projeto sísmico baseados em força como uma fundação base e posteriormente sendo avaliados usando métodos de projeto sísmico baseados em deslocamento que demonstraram boas práticas de engenharia de projeto. Este estudo se concentra na implementação da nova abordagem usando métodos modernos de projeto sísmico propostos por Priestley et al., 2007 para avaliar edifícios específicos e compará-los com os principais padrões. Este nível de trabalho é puramente teórico por natureza, a investigação dos métodos de projeto sísmico propostos é realizada por meio dos padrões de projeto sísmico, permitidos no padrão peruano precisamente no RNE, o objetivo principal deste estudo é atingir os resultados esperados do comportamento das acelerações subterrâneas dos edifícios, os possíveis danos à estrutura em caso de terremotos severos ou terremotos de projeto foram determinados, bem como para os diferentes níveis de terremoto, os deslocamentos máximos da estrutura foram verificados, e as condições contrastantes dos métodos de delineamento propostos foram identificadas.

Palavras-chave: deriva, sistema dual, projeto sísmico, terremoto severo, deslocamento, forças.

1. Introducción. - El método basado en desplazamientos es relativamente nuevo y antes de aplicar este proceso para analizar la amplificación dinámica, se detalla brevemente el fundamento de este enfoque, que consiste en examinar la probabilidad de respuesta fuerza-desplazamiento hasta el punto en que se alcanza un estado límite. El criterio de elección del estado límite de interés será determinado por los propósitos de la evaluación, no obstante, según sostiene Priestley et al. (2007), el estado límite de prevenir el colapso será, en esencia, el estado límite fundamental para las estructuras existentes. Es decir, las estructuras deben diseñarse de tal manera que cumplan con las condiciones de deformación específicas para los sismos de diseño y puedan correlacionar directamente el daño y la deformación en lugar de lograr desplazamientos por debajo de los límites especificados.

Las normas y modelos de contención sísmica como la NTP E0.30 que precisa y reconoce que no es técnica ni económicamente posible dotar a la mayoría de las estructuras una protección integral contra todos los sismos, partiendo de este concepto, esta norma define exactamente los siguientes principios. Para el diseño de edificaciones reconocen una clase de intensidad sísmica de sismo severo, que para Visión 2000 y ASCE es sismo raro, y sismo de diseño para el ATC-40. Al diseñar para el desempeño sísmico de un solo nivel, según lo definido en la NTP E.030, existe incertidumbre respecto del comportamiento y desempeño estructural para muchos niveles de intensidad sísmica.

Hoy en día, el propósito de la construcción sismorresistente no es sólo el resguardo de vidas; sino es también controlar daños a elementos estructurales y no estructurales, además de componentes. Las normas actuales vinculan este enfoque en función de su desempeño sísmico regulatorio. En el diseño sísmico, el objetivo primordial es salvaguardar la vida, pero se da la razón que no es posible resguardar una estructura de todo tipo de ataques sísmicos y, por lo tanto, no exime a las estructuras del colapso. (Niquen, Villarreal, & Niquen, 2023).

En este estudio se da los alcances de los delineamientos planteados a través del análisis comparativo, se establece el desempeño estructural del edificio dual de 5 pisos y se analiza la diferenciación del período de vibración de la estructura, igualmente en principio la deriva, que es utilizada por diferentes estándares para valorar todos los cambios estructurales esencialmente la conducta estructural del proyecto, utilizando métodos modernos de diseño sísmico ceñidos a los estándares apreciables en la NTP E.030.

2. Conceptos, fundamentos y posibilidades de la ingeniería sísmica moderna. - Con base en la naturaleza imprevista de los movimientos sísmicos y el nivel actual de discernimiento y tecnología es claro que no es posible cambiar las particularidades del sismo, de allí que todas las normas de diseño sísmico deben concebirse como requisitos mínimos que deben acatarse, pero pueden no garantizar una buena conducta sísmica para todos los edificios.

2.1. Objetivos de delineamientos sismorresistentes. Existen algunas medidas para determinar los objetivos del diseño sísmico de edificaciones, que relaciona algunos escenarios de movimientos telúricos con diferentes tipos y magnitudes de perjuicios de edificaciones. A continuación, se resumen las adaptaciones de la iniciativa de Visión 2000 de la SEAOC:

Movimiento sísmico de diseño	Intervalo de recurrencia	Probabilidad de excedencia
Frecuente	43 años	50 % en 30 años
Ocasional	72 años	50 % en 50 años
Raro	475 años	10 % en 50 años
Muy raro	950 años	10% en 100 años

Tabla I. Proposición de VISION 2000.

Los objetivos de desempeño se establecen conforme con la importancia del edificio, y para cada nivel de riesgo sísmico, se establece un grado aceptable de daño de acuerdo con la siguiente matriz.

Movimiento sísmico de diseño	Nivel de desempeño de la estructura			
	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad de Vida	Próximo al Colapso
Frecuente (43 años)	1	0	0	0
Ocasional (72 años)	2	1	0	0
Raro (475 años)	3	2	1	0
Muy Raro (970 años)	-	3	2	1
0	Desempeño inaceptable			
1	Estructuras básicas			
2	Estructuras esenciales / riesgosas			
3	Estructuras de seguridad crítica			

Tabla II. Objetivos de Desempeño.

2.2. Parámetros sísmicos y regulaciones. - Se proporciona una visión general de los parámetros sísmicos (deriva - factor de comportamiento) de las regulaciones de cinco países latinoamericanos según el mapa de peligro sísmico detallado en la siguiente figura:

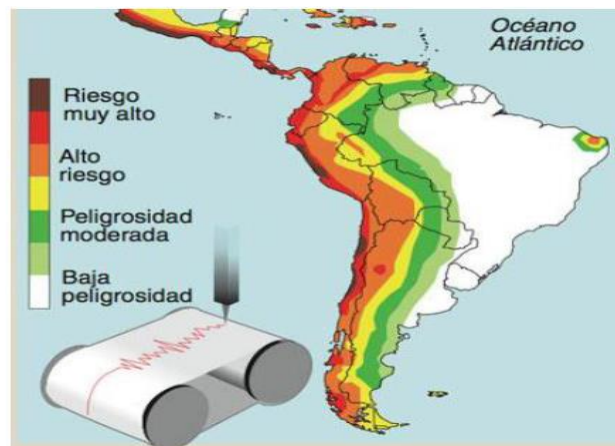


Figura I. Riesgo sísmico de Latinoamérica, fuente: USGS.

Factor de reducción de fuerza sísmica básica R

Los parámetros sísmicos considerados a continuación están relacionados con el tipo de estructura, objeto de estudio y corresponden a edificaciones de concreto armado conformadas por elementos estructurales (columnas y vigas) (Aguiar F, 2007).

PAÍS	ESTÁNDAR	INERCIA	FACTOR R	DERIVA MAX.
Argentina	CIRSOC 103	Fisurada	7	0.015
Chile	NCh433	Bruta	7	0.001
Colombia	NSR-10	Bruta	7	0.01
Ecuador	NEC-SE-DS	Fisurada	6	0.02
Venezuela	COVENIN 1756-1	Bruta	6	0.018

Tabla III. País Norma Inercias Factor (R)

3. Método de diseño basado en fuerzas (MBF). - El método basado en fuerzas emplea el factor R para controlar el daño, se estima que una mayor resistencia conlleva daños menores, además, se admite que la rigidez no depende de la resistencia proporcionada a la estructura y el período de vibración se calcula sin consideración de la resistencia al comienzo del proceso de delineamiento. El MBF distingue que la resistencia que se otorga a las estructuras (a través del acero) no afecta su rigidez. Esto se demuestra mediante el uso de factores de reducción de inercia geométrica en las primeras etapas del proceso de delineamiento para estimar la rigidez de los miembros estructurales en base a su espesor o inercia, sin considerar la cuantía del refuerzo en los miembros.

3.1. Propiedades de los materiales. - De acuerdo a Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], (2019), señala en el RNE los siguientes parámetros:

Concreto en columnas

$f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$

$2,100 \text{ tf/m}^2$

$\gamma_{con} = 2,400 \text{ kgf/m}^3$

2.40 tf/m^3

Módulo de elasticidad

Concreto en vigas

$f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$

$2,100 \text{ tf/m}^2$

$\gamma_{con} = 2,400 \text{ kgf/m}^3$

2.40 tf/m^3

$$E_c = 15,000\sqrt{f'_c} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$E_c = 217,371 \text{ kgf/cm}^2$

$2,173,706.5 \text{ tf/m}^2$

$E_c = 217,371 \text{ kgf/cm}^2$

$2,173,706.5 \text{ tf/m}^2$

Módulo de poisson

$\nu_c = 0.15$

Albañilería (Masonry)

$f'_m = 65 \text{ kgf/cm}^2$

650 tf/m^2

$\gamma_{alb} = 1,900 \text{ kgf/m}^3$

1.90 t/m^3

$E_m = 32,500 \text{ kgf/cm}^2$

$325,000 \text{ tf/m}^2$

Acero de Refuerzo

$f_y = 4,200 \text{ kgf/cm}^2$

$42,000 \text{ tf/m}^2$

$\gamma_s = 7,850 \text{ kgf/m}^3$

7.85 tf/m^3

$f_u = 6,300 \text{ kgf/cm}^2$

$63,000 \text{ tf/m}^2$

$E_s = 2.0E+06 \text{ kgf/cm}^2$

Acabados

$w_{lad} = 90 \text{ kgf/m}^2$

$w_{piso} = 100 \text{ kgf/m}^2$

$w_{tabmov} = 210 \text{ kgf/m}^2$

$w_{acab} = 360 \text{ kgf/m}^2$

$w_{eq} = 0.5 \text{ kgf/m}^2$

0.36 tf/m^2

Sobrecarga (S/C)

$w_{oficina} = 250 \text{ kgf/m}^2$

0.25 tf/m^2

$w_{pasadizo} = 400 \text{ kgf/m}^2$

0.40 tf/m^2

$w_{azotea} = 100 \text{ kgf/m}^2$

0.10 tf/m^2

Propiedades del Suelo:

Suelo Tipo S2

$\gamma_{adm} = 3.50 \text{ kgf/cm}^2$

35.0 tf/m²

3.2. Determinación de las acciones sísmicas. - De acuerdo la NTP E0.30 los desarrollos sísmicos de la estructura de un edificio dependen de la zona sísmica (Z), el uso del edificio (U), las propiedades dinámicas del edificio (T, C), el factor de reducción (R) y el perfil del suelo (S, Tp, TL).

Peligro sísmico

Fundamentalmente esta fase depende únicamente de la ubicación y las particularidades del suelo de cimentación por ende el proyecto no depende de las tipologías del edificio.

○ **Factor zona**

Según la NTP E.030 (2019), las zonificaciones propuestas están en base a las distribuciones espaciales observadas de los sismos, las peculiaridades generales y sus atenuaciones con el trayecto epicentral y la investigación neotectónica.

Zona	Z
Z3	0.35

Tabla IV. Factor Z

○ **Perfil de Suelo**

La NTP E.030 (2019), indica que, con base en los resultados del EMS, los suelos se establecen acorde a la Sección 12.1, definiéndose cinco tipos de terreno.

Perfil	V _s	N60	SU
S2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 Kpa a 100 Kpa

Tabla V. Categorización del perfil de suelo.

○ **Parámetros de Sitio S, TP y TL**

Según la NTP E.030 (2019), toma en cuenta el tipo de perfil que más se adecua a los estados particulares empleando los valores apropiados del coeficiente de amplificación del terreno S y el período TP y TL mostrados como sigue en Tablas 6 y 7.

Zona	Suelo	S2
Z3		1.15

Tabla VI. Factor de suelo.

Perfil de Suelo	S2
TP (s)	0.60
TL (s)	2.00

Tabla VII. Periodos "TP" y "TL".

○ **Factor (C)**

NTP E.030 (2019), indica que, en función de las particularidades del lugar, el factor de amplificación sísmica se precisa según las expresiones:

$$\begin{aligned}
 T < T_p & \qquad C=2.5 \\
 T_p < T < T_p & \qquad C = 2.50. \left(\frac{T_p}{T}\right) \\
 T > T_L & \qquad C = 2.50. \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2}\right)
 \end{aligned}$$

3.3. Características de la edificación

○ **Factor (U)**

Como señala la NTP E.030 (2019), clasifica cada estructura según las condiciones referidas sucesivamente:

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
C	Edificaciones Comunes	Ver E.030
		1.00

Tabla VIII. Categoría de las edificaciones y factor "U".

○ **Coefficiente de reducción sísmica**

La NTP E.030 (2019), indica que, si un edificio tiene más de un sistema estructural constructivo en las trayectorias de análisis, se toma el factor Ro más bajo correspondiente, como se muestra:

Sistema Estructural	Coefficiente Básico de Reducción Ro (*)
Concreto Armado:	
Dual	7

Tabla IX. Sistemas estructurales.

○ **Regularidad estructural**

Según la NTP E.030 (2019), denota la clasificación de estructuras como irregular o regular.

○ **Factores de irregularidad**

El factor Ia se determinó como el valor más bajo en la Tabla 12, que corresponde al alto grado de irregularidades de la estructura existente en ambas orientaciones de análisis (NTP E.030, 2019, pág. 16).

Irregularidad de Rigidez - Piso Blando. -

$$\frac{K_i}{K_{i+1}} < 0.70 \qquad \frac{K_i}{\frac{K_{i+1}+K_{i+2}+K_{i+3}}{3}} < 0.80 \qquad I_a = 0.75$$

N	Rigidez		CONDICIÓN 1		CONDICIÓN 2		ESTADO
	K _{xx}	K _{yy}	X - X	Y - Y	X - X	Y - Y	
5	46328	50804					
4	81523	92210	1.76	1.82			REGULAR
3	107341	123559	1.32	1.34			REGULAR
2	131205	150764	1.22	1.22	1.67	1.70	REGULAR
1	168985	188658	1.29	1.25	1.58	1.54	REGULAR

Tabla X. Evaluación de rigidez - piso blando.

$$I_a = 1$$

Irregularidad Extrema de Rigidez. -

$$\frac{K_i}{K_{i+1}} < 0.60 \qquad \frac{K_i}{\frac{K_{i+1}+K_{i+2}+K_{i+3}}{3}} < 0.70 \qquad I_a = 0.50$$

N	Rigidez		CONDICIÓN 1		CONDICIÓN 2		ESTADO
	K _{xx}	K _{yy}	X - X	Y - Y	X - X	Y - Y	
5	46328	50804					
4	81523	92210	1.76	1.82			REGULAR
3	107341	123559	1.32	1.34			REGULAR
2	131205	150764	1.22	1.22	1.67	1.70	REGULAR
1	168985	188658	1.29	1.25	1.58	1.54	REGULAR

Tabla XI. Evaluación de extrema rigidez.

$$I_a = 1$$

Irregularidad de Resistencia - Piso Débil. -

$$\frac{v_i}{v_{i+1}} < 0.80 \qquad I_a = 0.75$$

N	CORTANTE		EVALUACIÓN		ESTADO
	V _{xx}	V _{yy}	X - X	Y - Y	
5	164.15	164.15			
4	346.62	346.62	2.11	2.11	REGULAR
3	488.55	488.55	1.41	1.41	REGULAR
2	589.20	589.20	1.21	1.21	REGULAR
1	647.94	647.94	1.10	1.10	REGULAR

Tabla XII. Evaluación de Resistencia - Piso Débil

$$I_a = 1$$

Irregularidad Extrema de Resistencia

$$\frac{v_i}{v_{i+1}} < 0.65 \qquad I_a = 0.50$$

N	CORTANTE		EVALUACIÓN		ESTADO
	V _{xx}	V _{yy}	X - X	Y - Y	
5	164.15	164.15			
4	346.62	346.62	2.11	2.11	REGULAR
3	488.55	488.55	1.41	1.41	REGULAR
2	589.20	589.20	1.21	1.21	REGULAR
1	647.94	647.94	1.10	1.10	REGULAR

Tabla XIII. Evaluación de Extrema de Resistencia.

$$I_a = 1$$

Irregularidad de Masa o Peso. -

$m_i > 1.50 m_{i+1}$		ó	$m_i > 1.50 m_{i-1}$		$I_a = 0.90$
Piso	Masa (Tf-s ² /m)	mi/mi+1	mi/mi-1	ESTADO	
5	69.78				
4	95.47		0.99	REGULAR	
3	96.54	1.01	0.99	REGULAR	
2	97.80	1.01	0.98	REGULAR	
1	99.89	1.02		REGULAR	

Tabla XIV. Evaluación de Masa o Peso

$$I_a = 1$$

Irregularidad Geométrica Vertical. -

$$\frac{b_2}{b_1} > 1.30$$

$$I_a = 0.90$$

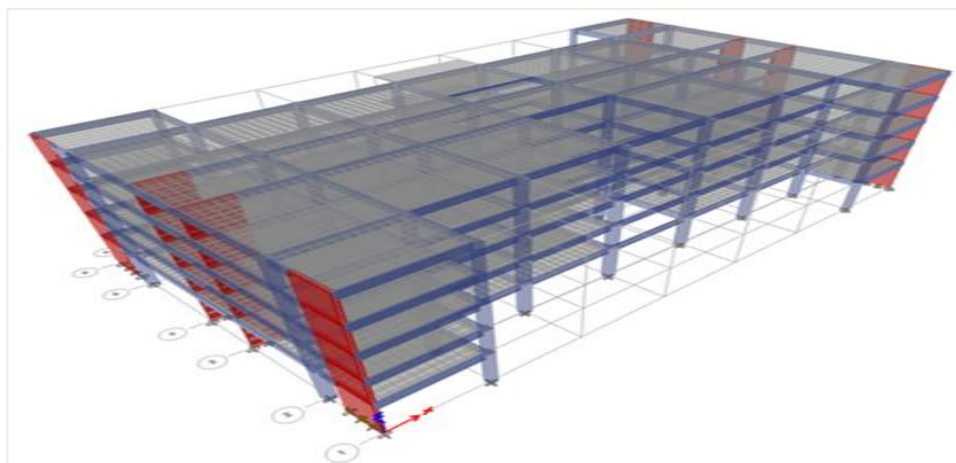


Figura II. Geometría vertical de la muestra

$$I_a = 1$$

Dirección X-X

b2= 25.00 m b2/b1= 1.00
 b1= 25.00 m

Dirección Y-Y

b2= 43.50 m b2/b1= 1.00
 b1= 43.50 m

- **Discontinuidad en los Sistemas Resistentes.**

$$V_{\text{elemento}} \geq 0.10 V_{\text{Edificio}} \quad \text{y} \quad e > 0.25 b \quad I_a = 0.80$$

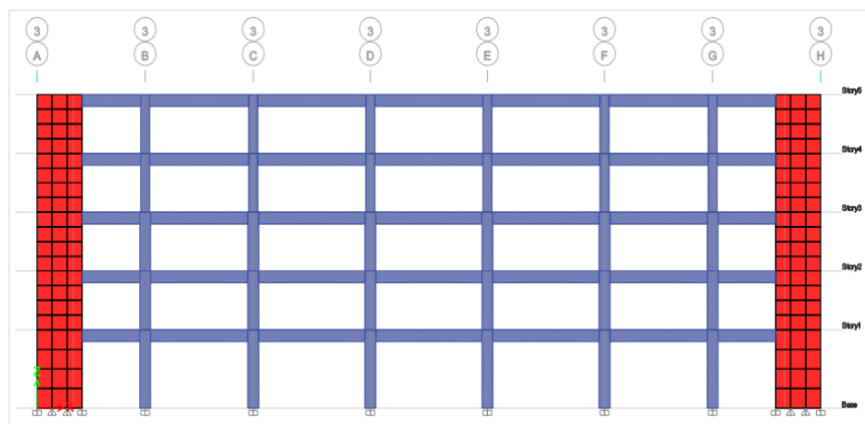


Figura III. Sistema estructural de la muestra.

$$I_a = 1$$

- **Discontinuidad extrema de los Sistemas Resistentes.**

$$V_{\text{elemento}} \geq 0.25 V_{\text{edificio}} \quad \text{y} \quad e > 0.25 b \quad I_a = 0.60$$

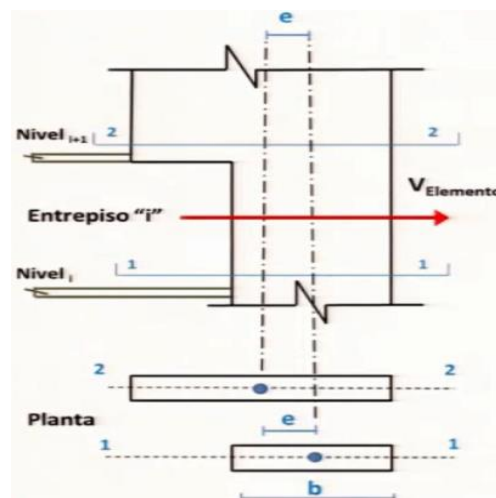


Figura IV. Evaluación de discontinuidad extrema de los Sistemas Resistentes

Cortante

Velem = 0.00 tnf
Vedif = 1.00 tnf

Velem/Vedif = 0.00

Desalineamiento

e = 0.00 m e/b = 0.00
b = 1.00 m

$$I_a = 1$$

o **Irregularidades estructurales en planta**

Irregularidad Torsional. -

$$\frac{\Delta_{m\acute{a}x}}{h_i} > 1.30 \frac{\Delta_{prom}}{h_i} \quad I_p = 0.75$$

PISO	DRIFT Max. X-X	Desplazam. CM x-x	DRIFT CM x-x	Ratio	ESTADO
5	0.00092	0.01665	0.00088	1.047	REGULAR
4	0.00118	0.01401	0.00113	1.039	REGULAR
3	0.00129	0.01061	0.00124	1.033	REGULAR
2	0.00128	0.00688	0.00124	1.028	REGULAR
1	0.00081	0.00316	0.00079	1.027	REGULAR

Tabla XV. Evaluación de irregularidad torsional X-X.

PISO	DRIFT Max. Y-Y	Desplazam. CM y-y	DRIFT CM y-y	Ratio	ESTADO
5	0.00086	0.01480	0.00081	1.065	REGULAR
4	0.00106	0.01238	0.00102	1.041	REGULAR
3	0.00113	0.00933	0.00108	1.040	REGULAR
2	0.00112	0.00608	0.00107	1.039	REGULAR
1	0.00073	0.00286	0.00071	1.028	REGULAR

Tabla XVI. Evaluación de irregularidad torsional Y-Y.

$$I_p = 1$$

Irregularidad Torsional Extrema. -

$$\frac{\Delta_{m\acute{a}x}}{h_i} > 1.50 \frac{\Delta_{prom}}{h_i} \quad I_p = 0.60$$

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 3-45

<https://doi.org/10.36561/ING.27.3>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

PISO	DRIFT Max. X-X	Desplaza. CM x-x	DRIFT CM x-x	Ratio	ESTADO
5	0.00092	0.01665	0.00088	1.047	REGULAR
4	0.00118	0.01401	0.00113	1.039	REGULAR
3	0.00129	0.01061	0.00124	1.033	REGULAR
2	0.00128	0.00688	0.00124	1.028	REGULAR
1	0.00081	0.00316	0.00079	1.027	REGULAR

Tabla XVII. Evaluación de irregularidad torsional extrema X-X.

PISO	DRIFT Max. Y-Y	Desplaza. CM y-y	DRIFT CM y-y	Ratio	ESTADO
5	0.00086	0.01480	0.00081	1.065	REGULAR
4	0.00106	0.01238	0.00102	1.041	REGULAR
3	0.00113	0.00933	0.00108	1.040	REGULAR
2	0.00112	0.00608	0.00107	1.039	REGULAR
1	0.00073	0.00286	0.00071	1.028	REGULAR

Tabla XVIII. Evaluación de irregularidad torsional extrema Y-Y.

$$I_p = 1$$

La NTP E.030 (2019), compara la distorsión máxima respecto del centro de masa y asume que califica como irregularidad torsional, si la división es mayor que el 1.30, extrema si es mayor que 1.5, este razonamiento se emplea solo a edificio con diafragma rígido y si el desplazamiento al límite relativo de entre pisos destaca el 50% es decir para una edificación de concreto si se tiene la deriva permisible máxima es de 0.007 quiere decir que para derivas menores al 50% es decir 0.0035 ya no consideraría irregularidad, no amerita hacer la verificación porque la situación es muy pequeña entonces en la nueva norma se compara la distorsión máxima respecto al centro de masa.

Esquinas Entrantes. -

$a > 0.20 A$	y	$b > 0.20 B$	$I_a = 0.90$
Dirección X-X		Dirección Y-Y	
a= 31.50 m		b= 4.00 m	
A= 43.50 m		B= 25.00 m	
a/A= 72%		b/B= 16%	

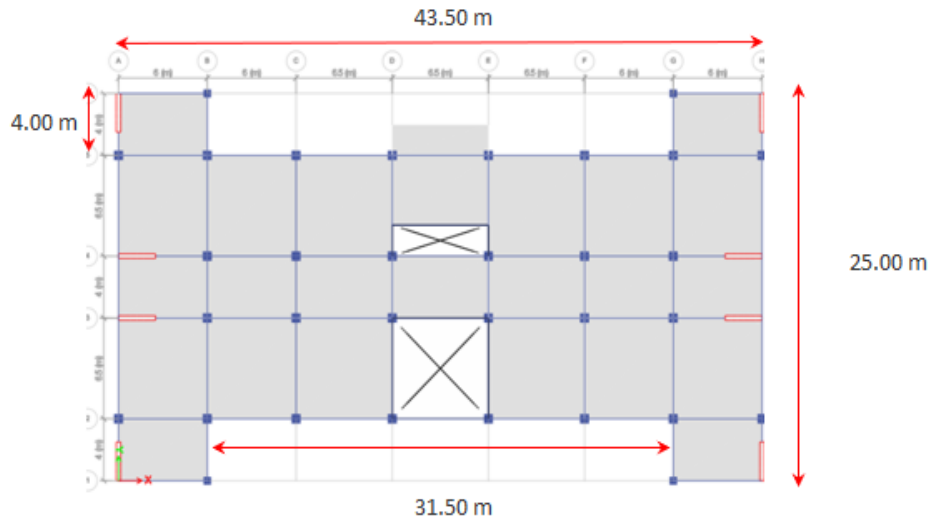


Figura V. Evaluación de esquinas entrantes

$$I_p = 1$$

Discontinuidad del Diafragma. -

$$A' > 50\% A_{Total}$$

$$A_{neta-i} < 25\% A_{st-total}$$

$$I_p = 0.85$$

	Corte 1-1	Corte 2-2
A'=	55.25 m ²	
A _{total} =	835.50 m ²	
A'/A _{total} =	6.61%	
A _{neta-1} =	1.02 m ²	A _{neta-2} = 4.44 m ²
A _{st-total} =	2.04 m ²	A _{st-total} = 5.22 m ²
A ₁ /A _{st-total} =	50.00%	A ₂ /A _{st-total} = 85.06%

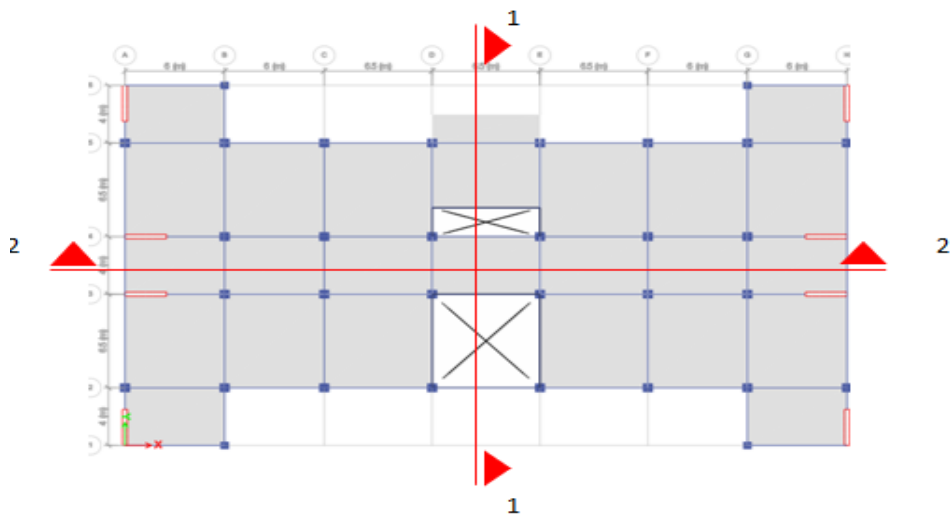


Figura VI. Evaluación de discontinuidad de diafragma

$$I_p = 1$$

Sistemas no Paralelos. -

$$\theta > 30^\circ \quad V_{elem \text{ no paralelos}} > 10\% V_{base} \quad I_p = 0.90$$

Angulo entre Elementos Resistentes
 $\theta = 0.00^\circ$

Cortante
 $V_{elem} = 835.50 \text{ tnf}$
 $V_{base} = 835.50 \text{ tnf}$
 $V_{elem}/V_{bas} = 1.00$

$$I_p = 1$$

Resumen: De las tablas anteriores obtenemos los respectivos I_a e I_p

$$I_a = 1.00 \quad I_p = 1.00$$

○ **Restricciones a la irregularidad**

Según la NTP E.030 (2019), en el diseño de las edificaciones se observan las restricciones de irregularidades especificadas en la Tabla N°19 según su categoría y el territorio donde se ubican.

Categoría de la Edificación	Zona	Restricciones
C	1	Sin restricciones

Tabla XIX. Categoría y regularidad de las edificaciones

○ **Coefficiente de Disminución de la Fuerza Sísmica R**

Según la NTP E.030 (2019), el coeficiente de comportamiento de la energía sísmica se establece como el producto mostrado en la siguiente ecuación:

$$R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p = (7) (1) (1) = 7$$

○ **Evaluación del Peso Sísmico (Psism)**

Según la NTP E.030 (2019), el peso (P) se computa considerando las descripciones siguientes:

- Categoría C, se toma el 25% CV

$$P_{sism} = 100\%CM + 25\%CV$$

3.4. Procedimientos de Análisis sísmico estático

○ **Periodo fundamental de vibración**

La NTP E.030 (2019), los periodos para cada trayectoria se estiman bajo la ecuación:

$$T = \frac{h_n}{C_T}$$

Dirección x-x

h_n = 16.00 m
 C_T = 60
T = 0.2667 s
 0.85xT = 0.2267 s

○ **Distribución de la fuerza sísmica en altura**

2. La NTP E.030 (2019), La fuerza sísmica horizontal de cualquiera de los niveles convenientes a la trayectoria estimada se calcula como sigue:

$$F_i = \alpha_i \cdot V \qquad \alpha_i = \frac{P_i(h_i)^k}{\sum_{j=1}^n P_j(h_j)^k}$$

$$T \leq 0.50s \quad k = 1.0$$

$$T > 0.50s \quad k = (0.75 + 0.50T) \leq 2.0$$

Piso	P _i	h _i	P _i *h _i ^k	a _i	F _i (Tf)	V _i (Tf)
Azotea	684.52	16.00	10,952.39	0.25	164.15	164.15
Piso 4	936.57	13.00	12,175.40	0.28	182.47	346.62
Piso 3	947.01	10.00	9,470.12	0.22	141.93	488.55
Piso 2	959.40	7.00	6,715.81	0.16	100.65	589.20
Piso 1	979.90	4.00	3,919.61	0.09	58.74	647.94
SP _i *H _i =			43,233.33			

Tabla XX. Distribución de la fuerza sísmica

○ **Fuerza cortante basal**

La NTP E.030 (2019), el cortante basal de las estructuras correspondientes a las direcciones estimadas está determinada mediante la representación siguiente:

$$C_b = \frac{Z.U.C.S}{R} \qquad \frac{C}{R} \geq 0.11$$

• **Cortante basal x-x**

Z= 0.35 T_p = 0.60 s
 U= 1.00 T_L = 2.00 s
 C_x= 2.50
 S= 1.15
 R_x= 7 **C b-x = 0.1438** **kx= 1.0**
 C_x/R_x = 0.36 0.11 Ok

3.5. Desarrollo con el programa ETABS. -

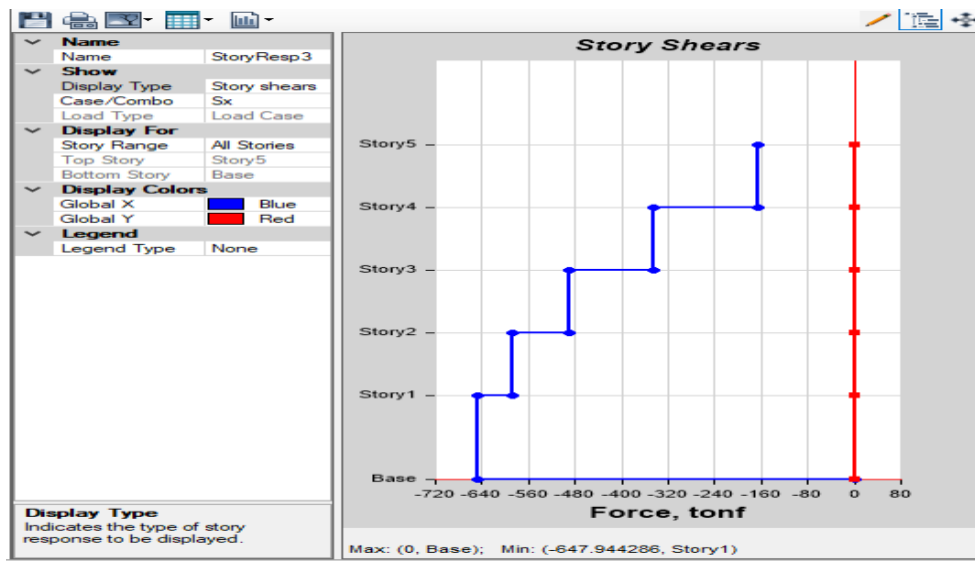


Figura VII. Cortantes en la dirección X-X – ETABS.

Piso	Pi	hi	Pi*hi^k	ai	Fi (tnf)	Vi (tnf)
5	684.52	16.00	10,952.39	0.25	164.15	164.15
4	936.57	13.00	12,175.40	0.28	182.47	346.62
3	947.01	10.00	9,470.12	0.22	141.93	488.55
2	959.40	7.00	6,715.81	0.16	100.65	589.20
1	979.90	4.00	3,919.61	0.09	58.74	647.94
SPi*Hi =			43,233.33			

Tabla XXI. Historia de cortantes de análisis estático X-X.

Masa (tnf.s2/m)	Peso (tnf)
69.78	684.52
95.47	936.57
96.54	947.01
97.80	959.40
99.89	979.90

Tabla XXII. Historia de masas.

○ **Modos y períodos de vibración**

Para el análisis de los modos de vibración se considerarán en función de la cantidad de elevaciones, por cada piso. Según NTP E.030 (2019), es preciso que se controle la masa en la trayectoria de la evaluación (masa participativa) se obtenga como mínimo el 90% de la masa general.

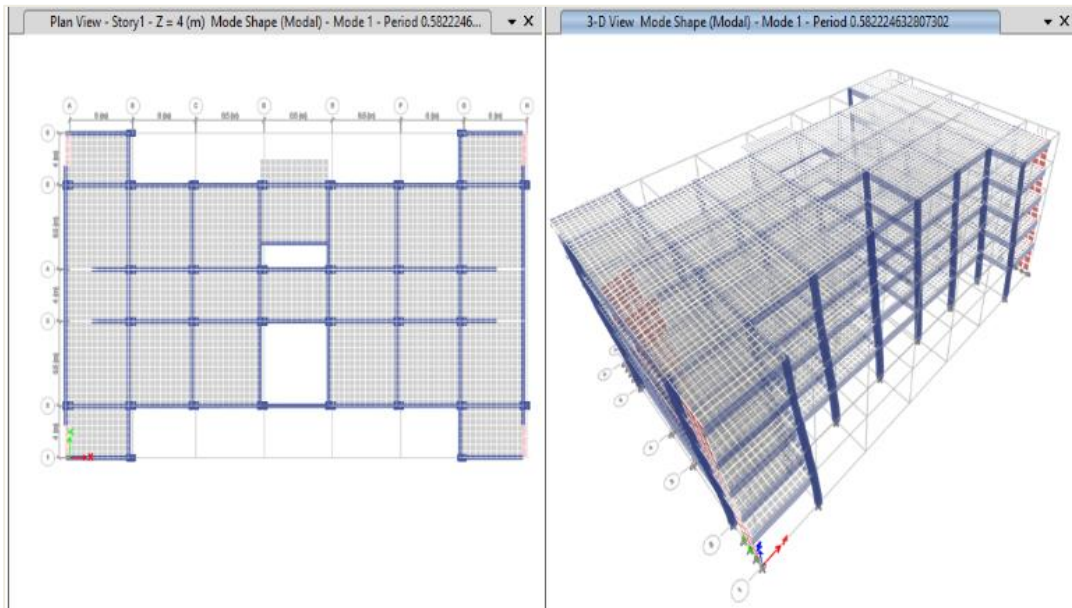


Figura VIII. Periodos de vibración modo 1 – ETABS

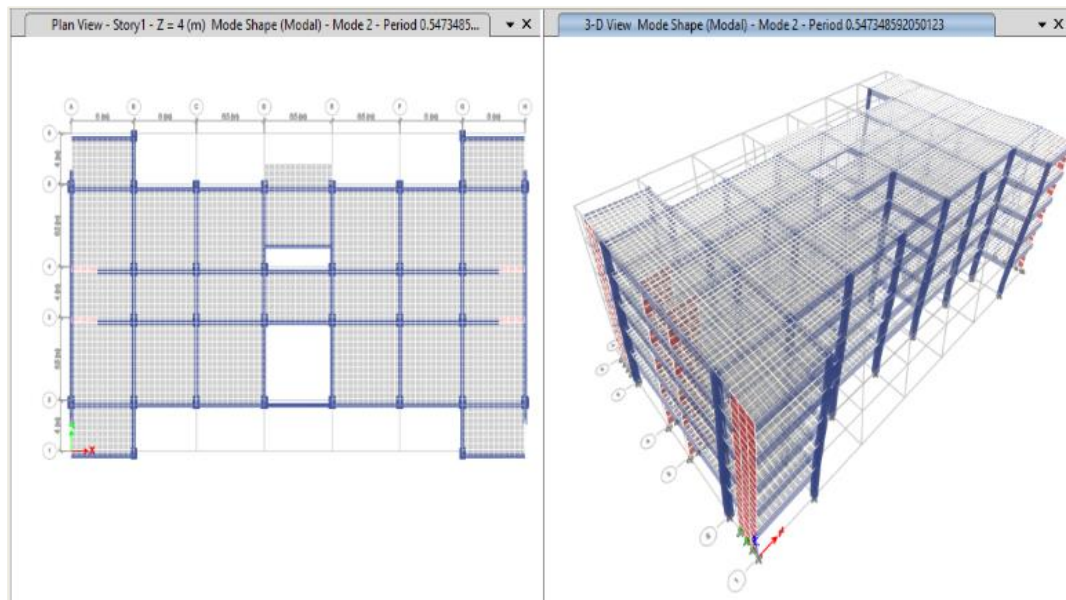


Figura IX. Periodos de vibración modo 2 – ETABS.

Periodos del ETABS		
Dirección	T (s)	0.85*T
X-X	0.582	0.495
Y-Y	0.547	0.465

Tabla XXIII. Resumen de periodos de vibración.

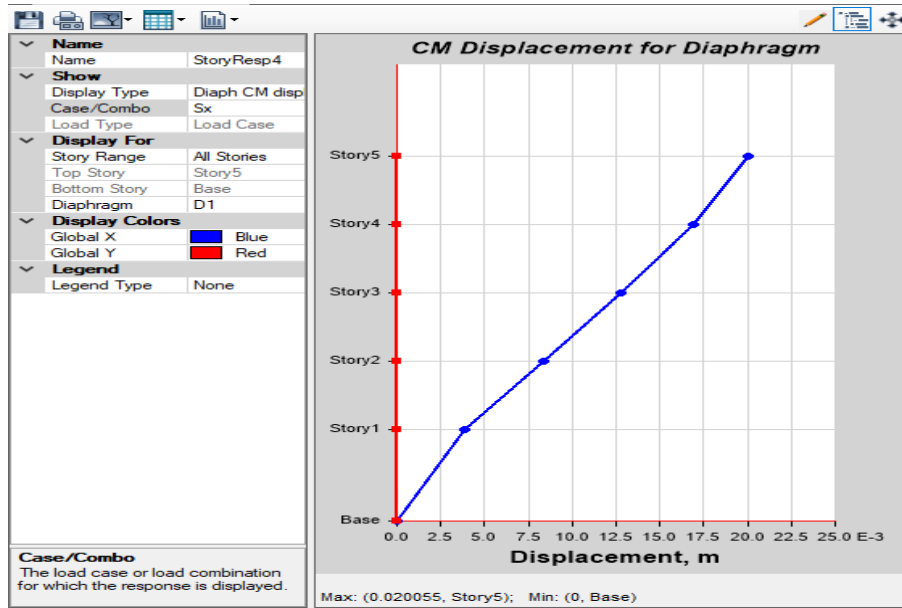


Figura X. Máximos desplazamientos del CM en X-X – ETABS.

PISO	Vi Tf	Pi Tf	fi Tf	di (CM) m	Pi x di ² seg	fi x di
5	164.15	684.52	164.15	0.02006	0.2753	3.2919
4	346.62	936.57	182.47	0.01690	0.2675	3.0840
3	488.55	947.01	141.93	0.01282	0.1556	1.8193
2	589.20	959.40	100.65	0.00833	0.0665	0.8379
1	647.94	979.90	58.74	0.00383	0.0144	0.2252
			647.94	Σ	0.7793	9.2583

Tabla XXIV. Historia de máximos desplazamientos del CM en X-X.

$$T_x = 0.582 \text{ s}$$

$$0.85T_x = 0.495 \text{ s}$$

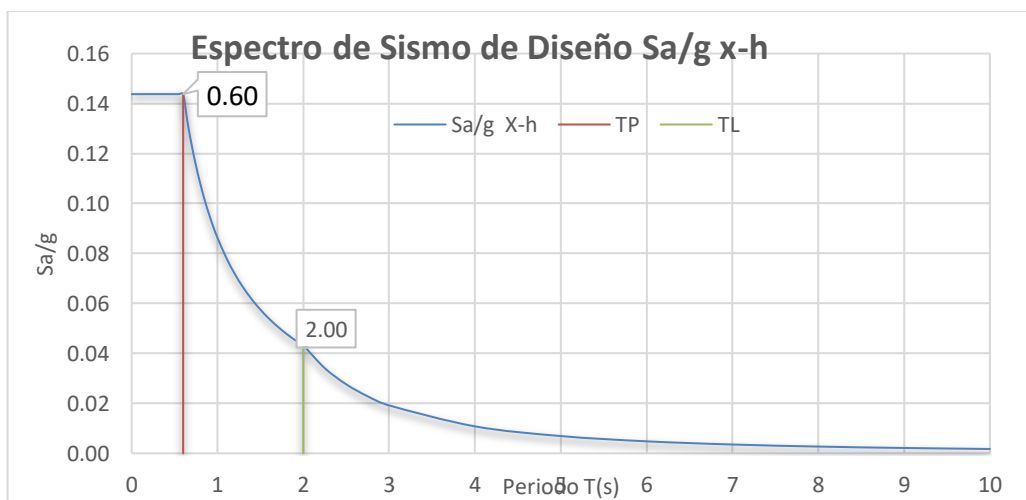


Figura XI. Espectro de sismo de diseño.

○ **Combinación de carga**

La NTP E.030 (2019), instituye una sucesión de combinaciones agrupadas a un elemento de desarrollo de carga los mismos que establecen las fuerzas ultimas de lineamiento, y estas están dadas por las combinaciones siguientes:

$$U=1.40.CM+1.70.CV$$

$$U=1.25.CM+1.25.CV\pm 1.0.CS$$

$$U=0.9.CM \pm 1.0.CS$$

○ **Confrontación de la cortante en la base estática y dinámica**

La NTP E.030 (2019) indica que, para estructuras regulares, la fuerza cortante generada por el AD no debe ser < 80 % con relación a la fuerza cortante generada por el AE, y para estructuras irregulares, no debe ser < 90 %. Sin embargo, se debe manejar factores de escala y revisar repetidamente la distorsión de entrepisos.

Sismo Dirección	Dinámico	Estático	Regularidad Estructural	%Vest	V Est min.	Escarlar
Dir X-X	533.64	647.94	Estructura Regular	80.00%	518.355	0.971

Tabla XXV. Cortantes basales estático y dinámico.

○ **Desplazamientos Laterales Relativos Admisibles**

De la misma forma la NTP E.030 (2019), refiere que el desplazamiento para una estructura regular se cuantifica castigando los valores obtenidos en el AEL por 0,75 R, con demandas sísmicas disminuidas. En el otro caso, se multiplican por 0,85 R para calcular los desplazamientos para estructuras irregulares.

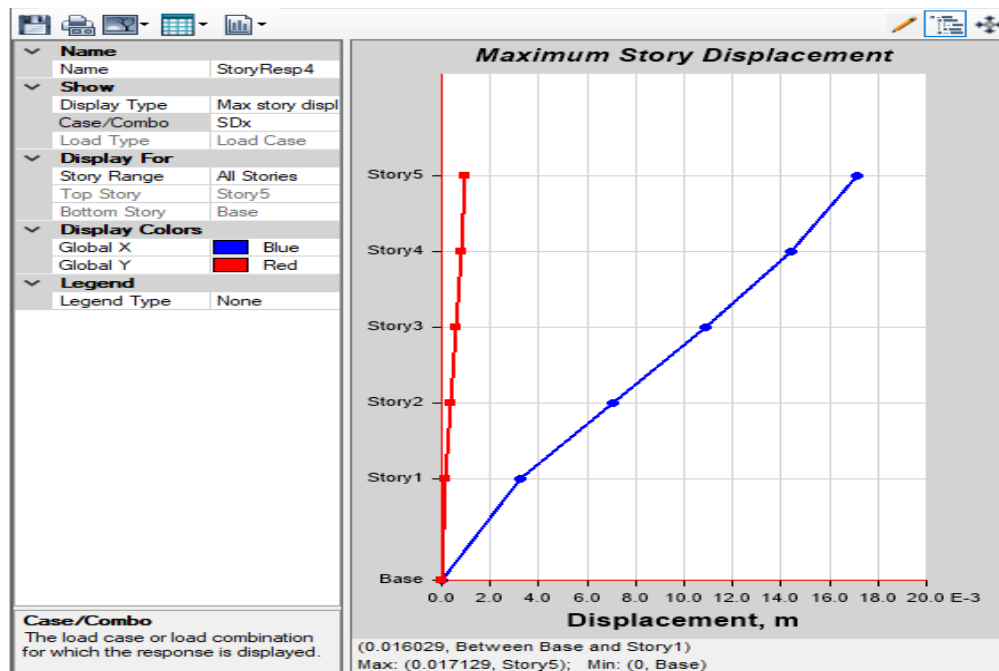


Figura XII. Desplazamientos laterales Dirección X-X- ETABS.

Piso	Altura entrepiso	Máx. Desplaz. del Piso	Deriva			
			Elástica	Factor	Rx	Inelástica
5	3.00	0.017129	0.000907	0.75	7.00	0.00476
4	3.00	0.014409	0.001168	0.75	7.00	0.00613
3	3.00	0.010905	0.001280	0.75	7.00	0.00672
2	3.00	0.007066	0.001273	0.75	7.00	0.00669
1	4.00	0.003246	0.000812	0.75	7.00	0.00426

Tabla XXVI. Historia de desplazamientos laterales Dirección X-X

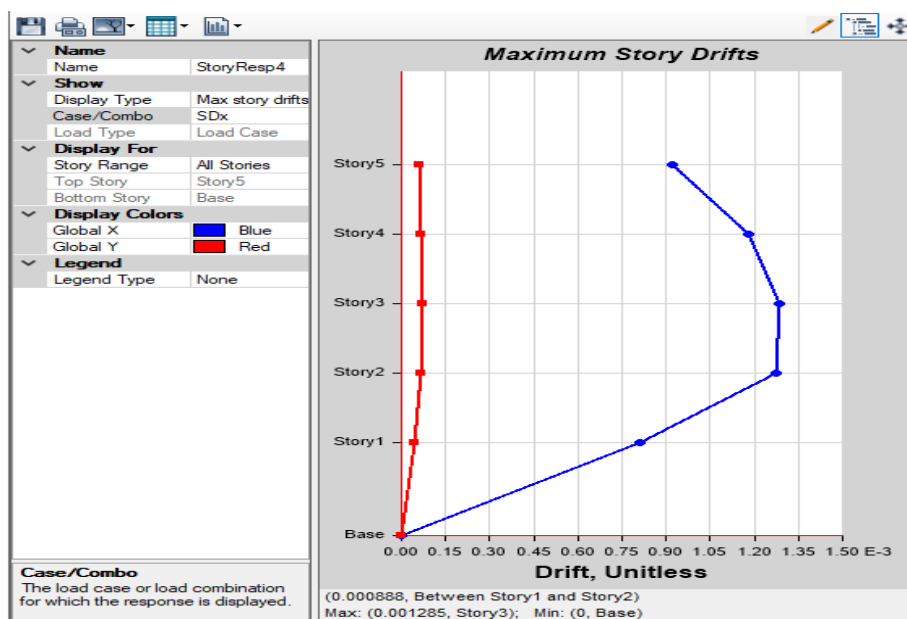


Figura XIII. Máxima deriva X-X – ETABS

Piso	Deriva		
	Inelástica	Máxima	Control
5	0.00476	0.007	¡Ok!
4	0.00613	0.007	¡Ok!
3	0.00672	0.007	¡Ok!
2	0.00669	0.007	¡Ok!
1	0.00426	0.007	¡Ok!

Tabla XXVII. Control de deriva máxima en la dirección X-X.

4. Aplicación del método de diseño basado en desplazamientos MBD. - Como dimensiones preliminares de la edificación se usó la evaluación de espectro modal elaborado en el apartado preliminar, donde se utilizaron los estándares. Después del proceso del diseño preliminar se desarrollará el proceso de cálculo con las secciones indicadas en la Tabla 28.

Como plantea Priestley et al. (2007), confirma que el enfoque de MBD es un tema creado para globalizar toda la estructura, regular o infrecuente, por razones de capacidad de diseño sísmico eficiente en la estructura, de esa manera lograr los excelentes resultados.

# PISO	VIGAS		Columnas Centrales		Columnas Perimetrales		Columnas Esquinas	
	B (m)	H (m)	B (m)	H (m)	B (m)	H (m)	B (m)	H (m)
5	0.25	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
4	0.25	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
3	0.25	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
2	0.25	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
1	0.25	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5

Tabla XXVIII. Secciones de elementos estructurales.

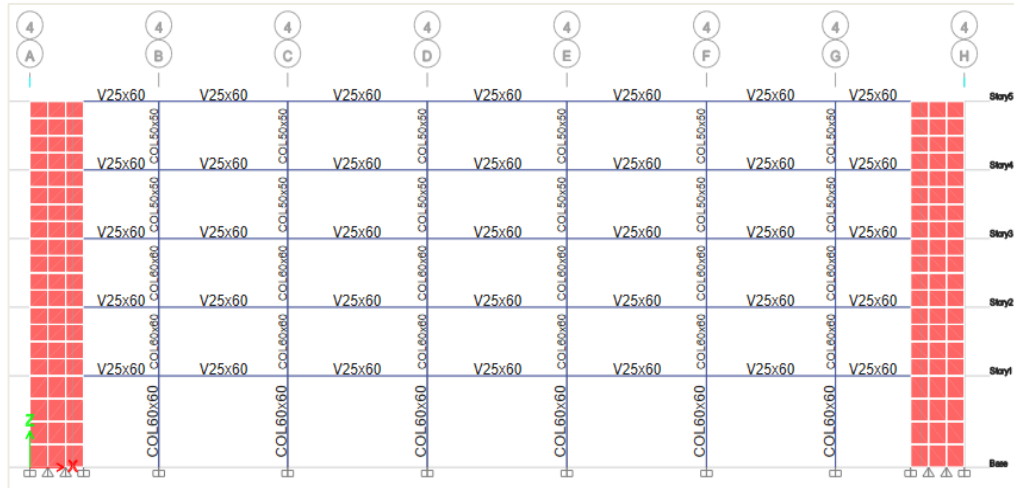


Figura XIV. Modelo estructural vista en corte 4-4.

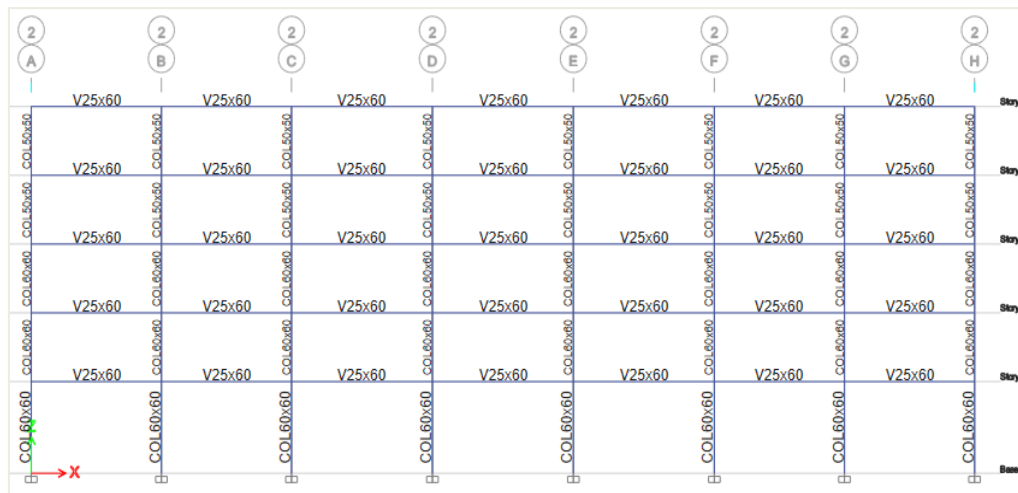


Figura XV. Modelo estructural vista en corte 2-2.

Determinación del desplazamiento de fluencia

$$E_y = \frac{1.1x F_y}{E_c}$$

$$E_y = \frac{1.1x 4200 \text{ kg/cm}^2}{2 * 10^6} = 0.0023$$

$$\theta_y = 0.50 * E_y * \left(\frac{L_b}{h_b}\right)$$

$$\theta_y = 0.50 * 0.0023 * \left(\frac{6.5}{0.6}\right) = 0.0125$$

Cálculo de desplazamientos de Diseño de sistema equivalente

$$\Delta_c = \Delta_1$$

$$\Delta_c = \Delta_1 = 0.02 * 4m = 0.08 m$$

Luego se establece la deformación relacionada con el modo inicial de la conducta sistema inelástico " δ_i " se puede determinar utilizando las ecuaciones sucesivas:

$$\delta_i = \left(\frac{Hi}{Hn}\right) \leq 4$$

$$\delta_i = \frac{4}{3} x \left(\frac{Hi}{Hn}\right) x \left(1 - \frac{Hi}{4Hn}\right) \quad n > 4$$

Donde:

Hi = Altura nivel iesimo

Hn = Altura total

$$\delta_1 = \frac{4}{3} x \left(\frac{4m}{16m}\right) x \left(1 - \frac{4m}{4 * 16m}\right) = 0.3125$$

$$\delta_2 = \frac{4}{3} x \left(\frac{7m}{16m}\right) x \left(1 - \frac{7m}{4 * 16m}\right) = 0.5195$$

$$\delta_3 = \frac{4}{3} x \left(\frac{10m}{16m}\right) x \left(1 - \frac{10m}{4 * 16m}\right) = 0.7031$$

$$\delta_4 = \frac{4}{3} x \left(\frac{13m}{16m}\right) x \left(1 - \frac{13m}{4 * 16m}\right) = 0.8633$$

$$\delta_5 = \frac{4}{3} x \left(\frac{16m}{16m}\right) x \left(1 - \frac{16m}{4 * 16m}\right) = 1$$

Nº Pisos	Hi	W (ton)	mi (tnf.s2/m)	δ_i	W0
5	16	684.525	69.778	1.0000	1.000
4	13	936.569	95.471	0.8633	1.000
3	10	947.012	96.535	0.7031	1.000
2	7	959.401	97.798	0.5195	1.000
1	4	979.904	99.888	0.3125	1.000

Tabla XXIX. Modo estandarizado elástico.

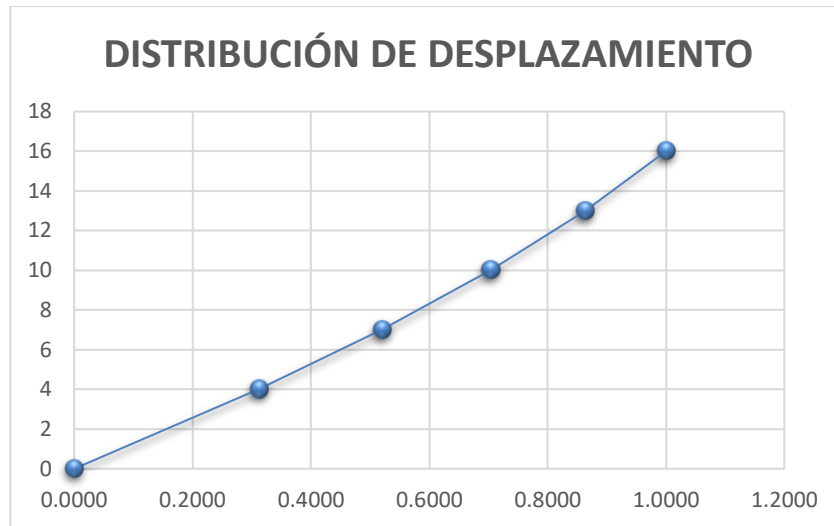


Figura XVI. Distribución de desplazamiento

Se calculan los desplazamientos correspondientes utilizando los datos encontrados.

$$\Delta_1 = w_\theta * \delta_i * \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c}\right)$$

$$w_\theta = 1.15 - 0.0034 * H_n \leq 1.0$$

$$w_\theta = 1.15 - 0.0034 * 16m = 1.0956 \leq 1.0$$

$$\Delta_1 = 1 * 0.313 * \left(\frac{0.08}{0.313}\right) = 0.08$$

$$\Delta_2 = 1 * 0.520 * \left(\frac{0.08}{0.313}\right) = 0.133$$

$$\Delta_3 = 1 * 0.703 * \left(\frac{0.08}{0.313}\right) = 0.180$$

$$\Delta_4 = 1 * 0.863 * \left(\frac{0.08}{0.313}\right) = 0.221$$

$$\Delta_5 = 1 * 1 * \left(\frac{0.08}{0.313}\right) = 0.256$$

Teniendo en cuenta la igualdad de puestos de trabajo de la estructura real, se utiliza la igualdad siguiente para fijar el cambio de delineación del sistema equivalente. La consecutiva igualdad es el formulario para los desplazamientos de delineación:

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i * \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i * \Delta_i)}$$

m_i = masa correspondiente al nivel superior

Para seguir desarrollando la ecuación anterior, determinemos las masas.

Nº Pisos	Hi	W (ton)	mi (tnf.s2/m)	δ_i	$\Delta c (m)$	$\Delta i (m)$	$m_i \cdot \Delta i$	$m_i \cdot \Delta i^2$	$m_i \cdot \Delta i \cdot H_i$
5	16	684.525	69.778	1.000	0.08	0.256	17.863	4.573	285.812
4	13	936.569	95.471	0.863	0.08	0.221	21.099	4.663	274.288
3	10	947.012	96.535	0.703	0.08	0.180	17.376	3.128	173.764
2	7	959.401	97.798	0.520	0.08	0.133	13.007	1.730	91.050
1	4	979.904	99.888	0.313	0.08	0.080	7.991	0.639	31.964
sumatoria	0		459.471	#¡REF!			77.337	14.733	856.878

Tabla XXX. Datos para el cálculo del desplazamiento de diseño

Como resultado tenemos:

$$\Delta_d = \frac{14.733}{77.337} = 0.191 \text{ m}$$

○ **Cálculo del Desplazamiento de Fluencia**

Para calcular " Δ_y ", en principio se debe establecer la " H_e " utilizando:

$$H_i = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i * \Delta_i * H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i * \Delta_i)}$$

$$H_e = \frac{856.878}{77.337} = 11.080 \text{ m}$$

○ **Obtención de la Ductilidad del Sistema**

Como resultado, se obtiene que:

$$\Delta_y = \theta_y * H_e = 0.0125 * 11.080 = 0.1386 \text{ m}$$

Calculando el Δ_y del sistema equivalente y el Δ_d computado previamente, se obtiene la ductilidad de desplazamiento con la siguiente flexión:

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} = \frac{0.191 \text{ m}}{0.1386 \text{ m}} = 1.374$$

○ **Cálculo del Amortiguamiento Viscoso Equivalente**

Se puede relacionar de manera conservadora el requisito de diseño de ductilidad de desplazamiento con la amortiguación viscosa equivalente a la estructura de la siguiente manera:

Muros de hormigón tienen:

$$\xi_e = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{\mu - 1}{\mu * \pi} \right)$$

$$\xi_e = 0.05 + 0.444 * \left(\frac{1.374 - 1}{1.374 * \pi} \right) = 0.0885$$

Para una amortiguación con un cambio de respuesta del período de esquina del 8,85%, el factor de corrección de la amortiguación es:

$$R_{\xi} = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi_e} \right)^{\alpha}$$

$$R_{\xi} = \left(\frac{0.07}{0.02 + 0.0885} \right)^{0.5} = 0.8033$$

○ *El factor R de reducción espectral es:*

$$R = \frac{1}{R_{\xi}}$$

$$R = \frac{1}{0.8033} = 1.245$$

La atenuación es del 5% en el espectro de desplazamiento correspondiente y los resultados de desplazamiento máximos son de 2 segundos para el período TL. El L.5% equivale a 0,30 metros. Nuestro "TL" calculado según el procedimiento es:

$$\Delta_{L*8.85\%} = \Delta_{L*5\%} * R_{\xi}$$

$$\Delta_{L*8.85\%} = 0.30 * 0.8033 = 0.241$$

T (s)	C	Sa (g)	Sa (m/s ²)	Sd - 5% (m)	Sd - 8.85% (m)
0.00	2.50	1.01	9.87	0.00	0.000
0.02	2.50	1.01	9.87	0.00	0.000
0.04	2.50	1.01	9.87	0.00	0.000
0.06	2.50	1.01	9.87	0.00	0.001
0.08	2.50	1.01	9.87	0.00	0.001
0.10	2.50	1.01	9.87	0.00	0.002
0.12	2.50	1.01	9.87	0.00	0.003
0.14	2.50	1.01	9.87	0.00	0.004
0.16	2.50	1.01	9.87	0.01	0.005
0.18	2.50	1.01	9.87	0.01	0.007
0.20	2.50	1.01	9.87	0.01	0.008
0.25	2.50	1.01	9.87	0.02	0.013
0.30	2.50	1.01	9.87	0.02	0.018
0.35	2.50	1.01	9.87	0.03	0.025
0.40	2.50	1.01	9.87	0.04	0.032
0.45	2.50	1.01	9.87	0.05	0.041
0.50	2.50	1.01	9.87	0.06	0.050
0.55	2.50	1.01	9.87	0.08	0.061
0.60	2.50	1.01	9.87	0.09	0.072
0.65	2.31	0.93	9.11	0.10	0.078
0.70	2.14	0.86	8.46	0.11	0.084
0.75	2.00	0.81	7.90	0.11	0.090
0.80	1.88	0.75	7.40	0.12	0.096
0.85	1.76	0.71	6.97	0.13	0.102
0.90	1.67	0.67	6.58	0.14	0.108
0.95	1.58	0.64	6.23	0.14	0.114

1.00	1.50	0.60	5.92	0.15	0.121
1.10	1.36	0.55	5.38	0.17	0.133
1.20	1.25	0.50	4.94	0.18	0.145
1.30	1.15	0.46	4.56	0.20	0.157
1.40	1.07	0.43	4.23	0.21	0.169
1.50	1.00	0.40	3.95	0.23	0.181
1.60	0.94	0.38	3.70	0.24	0.193
1.70	0.88	0.36	3.48	0.26	0.205
1.80	0.83	0.34	3.29	0.27	0.217
1.90	0.79	0.32	3.12	0.29	0.229
2.00	0.75	0.30	2.96	0.30	0.241
2.25	0.59	0.24	2.34	0.30	0.241
2.50	0.48	0.19	1.90	0.30	0.241
2.75	0.40	0.16	1.57	0.30	0.241
3.00	0.33	0.13	1.32	0.30	0.241
4.00	0.19	0.08	0.74	0.30	0.241
5.00	0.12	0.05	0.47	0.30	0.241
6.00	0.08	0.03	0.33	0.30	0.241
7.00	0.06	0.02	0.24	0.30	0.241
8.00	0.05	0.02	0.19	0.30	0.241
9.00	0.04	0.01	0.15	0.30	0.241
10.00	0.03	0.01	0.12	0.30	0.241

Tabla XXXI. Espectros de Aceleraciones, Velocidades y Desplazamientos

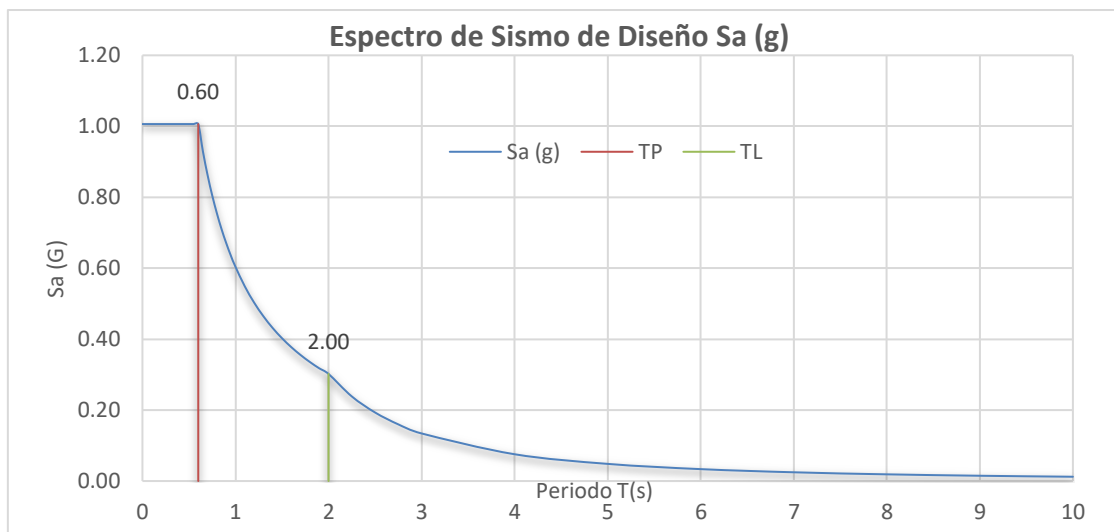


Figura XVII. Espectro de respuesta de aceleraciones

En la Figura XVIII se presenta la gráfica del espectro de aceleración con los parámetros del estándar E.030 para la ciudad de Arequipa, en la que se sitúa la estructura evaluada.

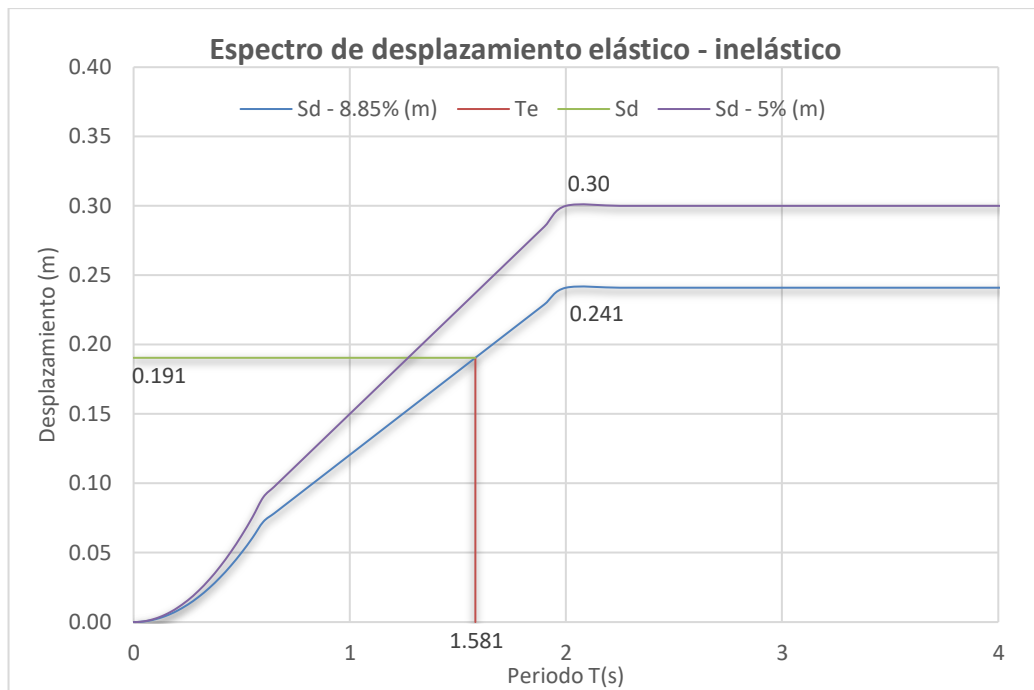


Figura XVIII. Espectro de desplazamientos

$$T_e = T_L * \frac{\Delta_d}{\Delta_L * 8.85\%}$$

$$T_e = 2 * \frac{0.191}{0.241} = 1.581$$

○ **Masa efectiva.**

De la igualdad 3.33 del texto de Priestley et al. (2007), se determina mediante la siguiente igualdad:

$$m_e = \sum_{i=1}^n (m_i * \Delta_i) / \Delta_d$$

$$m_e = \frac{77.337}{0.191} = 405.96 \text{ ton}$$

○ **Rigidez efectiva.**

$$K_e = \frac{4\pi^2}{T_e^2} M_e$$

$$K_e = \frac{4 * \pi^2}{1.581^2} * 405.96 = 6411.83$$

○ **Fuerza cortante basal**

Para terminar, la rigidez y el desplazamiento objetivo de delineación se utilizan para reemplazar la fuerza cortante en la base.

$$V_{basal} = K_e \Delta_d$$

$$V_{basal} = 6411.83 * 0.191 = 1221.47 \text{ tonf}$$

Cálculo de reparto de fuerza en cada piso

$$F_i = \frac{(m_i * \Delta_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i * \Delta_i)} V_B$$

$$F_5 = 1221.47 * \frac{17.86}{77.337} = 282.13 \text{ tn}$$

$$F_4 = 1221.47 * \frac{21.10}{77.337} = 333.24 \text{ tn}$$

$$F_3 = 1221.47 * \frac{17.38}{77.337} = 274.44 \text{ tn}$$

$$F_2 = 1221.47 * \frac{13.01}{77.337} = 205.44 \text{ tn}$$

$$F_1 = 1221.47 * \frac{7.99}{77.337} = 126.21 \text{ tn}$$

Nº Pisos	Hi	mi . Δ i	mi . Δ i^2	mi . Δ i.Hi	Fi (ton)	Vi (ton)
5	16.00	17.86	4.57	285.81	282.13	282.13
4	13.00	21.10	4.66	274.29	333.24	615.38
3	10.00	17.38	3.13	173.76	274.44	889.82
2	7.00	13.01	1.73	91.05	205.44	1095.26
1	4.00	7.99	0.64	31.96	126.21	1221.47
Sumatoria	0	77.337	14.733	856.878	1221.47	

Tabla XXXII. Distribución de fuerzas en los entrepisos.

5. Aplicación del método Análisis Estático No Lineal (Pushover). - Se utilizó la versión no lineal del programa ETABS para realizar un análisis de empuje en esta investigación (con pautas sugeridas por los informes ATC-40 y FEMA 440) para determinar la curva de capacidad del edificio y estimar el alcance máximo frente a un terremoto. Si se produce una conducta no lineal en ciertos puntos prefijados (articulaciones), se presta especial atención a la formación de bisagras plásticas mediante la compresión elástica del extremo de las columnas (articulaciones P-M2-M3) y la flexión de los extremos de las vigas (articulaciones M3).

○ **Condición de carga lateral según MBF**

El estudio sísmico según la NTP E.030 se utilizará para obtener el modelo de carga adyacente de Pushover. Aunque ASCE/SEI 41-13 requiere una repartición de energías para este caso de evaluación, los estándares exhibidos en este documento ofrecen una variedad de parámetros para Perú, por lo que se decidió utilizar fuerzas estructurales altamente escaladas y distribuidas. La condición especificada es válida para las dos direcciones de análisis porque sus fuerzas cortantes son iguales.

PISO	Vi (tnf)	Pi (tnf)	fi (tnf)
5	164.15	684.52	164.15
4	346.62	936.57	182.47
3	488.55	947.01	141.93
2	589.20	959.40	100.65
1	647.94	979.90	58.74

Tabla XXXIII. Distribución de fuerzas en los entresijos

○ **Condición de carga lateral según MBD**

Parejo al caso de FBD, la condición de carga lateral concernirá a los siguientes resultados obtenidos:

Nº Pisos	Hi	$m_i \cdot \Delta i$	$m_i \cdot \Delta i^2$	$m_i \cdot \Delta i \cdot Hi$	Fi (tnf)
5	16.00	17.86	4.57	285.81	282.13
4	13.00	21.10	4.66	274.29	333.24
3	10.00	17.38	3.13	173.76	274.44
2	7.00	13.01	1.73	91.05	205.44
1	4.00	7.99	0.64	31.96	126.21

Tabla XXXIV. Distribución de fuerzas en los entresijos.

○ **Atenciones finales del modelo**

Las condiciones de empotramiento se definen antes del análisis porque este análisis no considera la interacción suelo-estructura. Además, se requiere un nodo de revisión en el último piso del edificio para supervisar el proceso, para cada dirección el nodo seleccionado estará dispuesto en el centro de la masa. El análisis se ejecuta en pasos y se repite hasta encontrar una solución.

○ **Formación de rótulas plásticas**

Suárez J. A., (2018) afirma que, las bisagras plásticas son recomendables para alcanzar el nivel de resguardo de vida después de los 5 pasos de carga, se debe considerar que el orden de formación del mecanismo inicia con las vigas, luego se da en la columna y finalmente en el muro de corte.

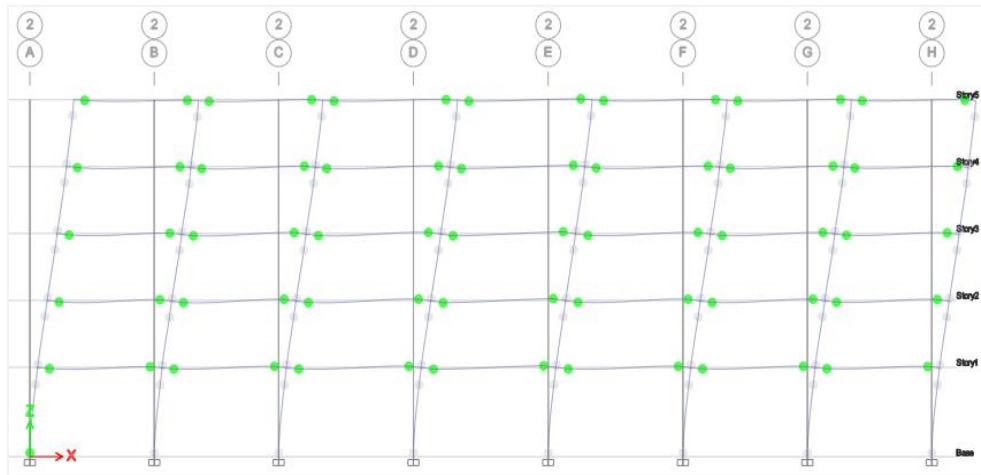


Figura XIX. Formación de rotulas plásticas.

○ **Curva de capacidad**

Como se mencionó anteriormente, la curvatura de capacidad que ejemplifica las estructuras es el resultado conclusivo del análisis de desplazamiento. El aumento de la resistencia al fallo se muestra en el gráfico. La estructura se mueve más en medida que acrecienta la fuerza lateral. Este carácter de conducta de la carga lateral es importante porque al utilizar los desplazamientos se puede estimar el alcance del posible daño a la estructura.

○ **Espectro de capacidad:**

La curvatura de capacidad debe convertirse a un espectro o señal de capacidad para interceptarla con el espectro de solicitud y encontrar el punto de eficiencia de desempeño. Siguiendo las nuevas contribuciones de (Building Seismic Safety Council, 2006). El espectro de pseudoaceleración del estándar E.030 debe convertirse a la dimensión Sa vs Sd para que sea compatible con la capacidad espectroscópica y determine los puntos de rendimiento.

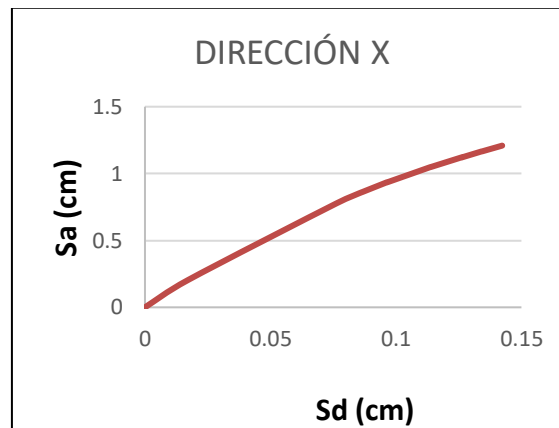


Figura XX. Espectro de capacidad

NTP E.030				
SEVERO		RARO		MUY RARO
Sa1=	1.00	Sa2 =	1.30	Sa3= 1.50

Tabla XXXV. Niveles de demanda sísmica.

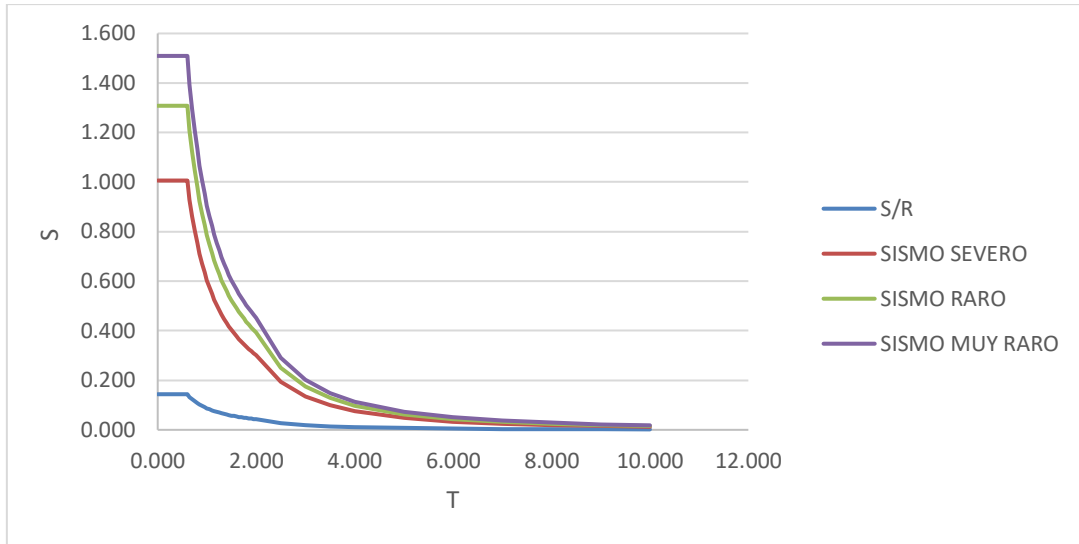


Figura XXI. Espectros de demanda para cada nivel de sismo.

VISION 2000, ASCE-SEI 41-13

FRECUENTE	OCACIONAL	RARO	MUY RARO
Sa1= 0.33	Sa2 = 1.40	Sa3= 1.00	Sa4= 1.30

Tabla XXXVI. Niveles de demanda sísmica.

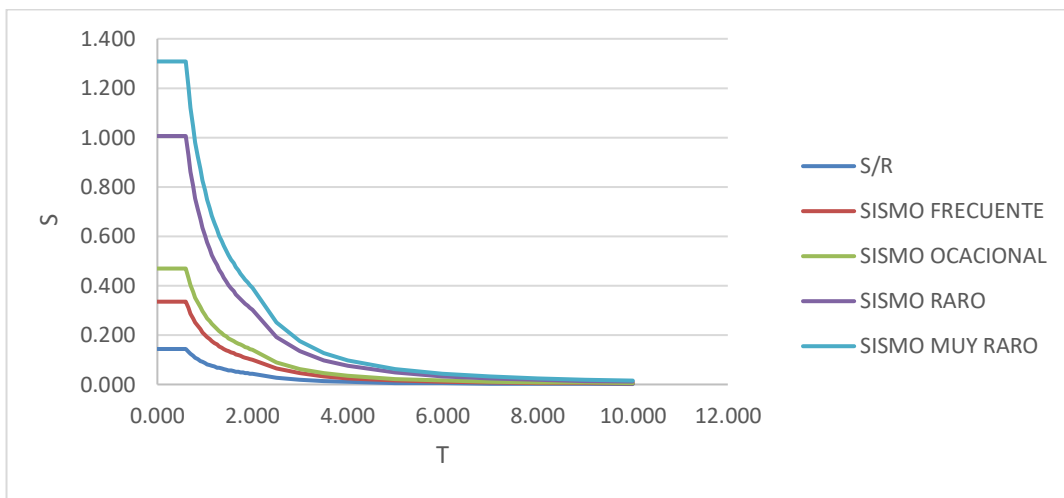


Figura XXII. Espectros de demanda para cada nivel de sismo.

ATC 40

SERVICIO	DISEÑO	MAXIMO
Sa1= 0.33	Sa2 = 1.40	Sa3= 1.25

Tabla XXXVII. Niveles de demanda sísmica.

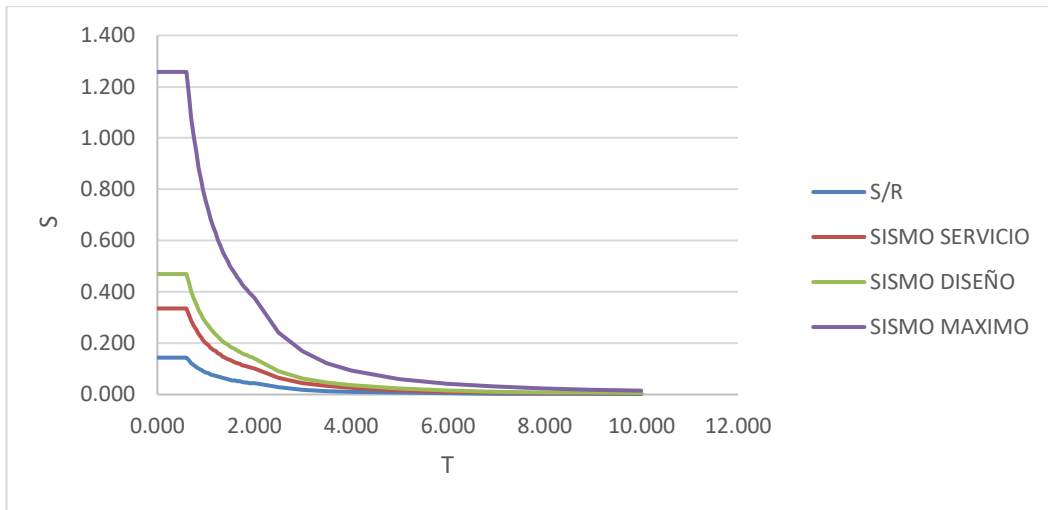


Figura XXIII. Espectros de demanda para cada nivel de sismo.

En cada trayectoria de evaluación se determina el punto de desempeño conveniente a un determinado nivel de sismo. Así, el desplazamiento alcanzado durante una determinada magnitud de un terremoto será comparable a este punto. A continuación, se ilustra el punto de rendimiento:

Se evidencia en las figuras consecutivas, los puntos de desempeño correspondientes a sismo severo para la Norma E.030, y sismo raro para VISION 2000 y ASCE/SEI 41-13, en la dirección X. Este proceso se efectúa de la misma manera para cada dirección, cada nivel de terremoto y delineamiento propuesto.

Se evidencia en las figuras consecutivas, los puntos de desempeño correspondientes a sismo severo para la Norma E.030, y sismo raro para VISION 2000 y ASCE/SEI 41-13, en la dirección X. Este proceso se efectúa de la misma manera para cada dirección, cada nivel de terremoto y delineamiento propuesto.

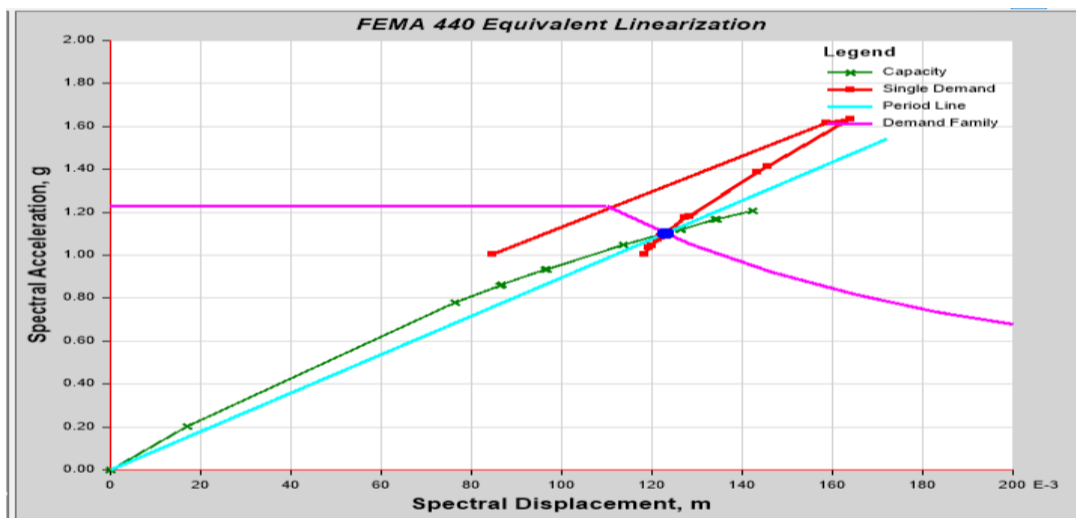


Figura XXIV. Obtención del punto de desempeño según FEMA 440.

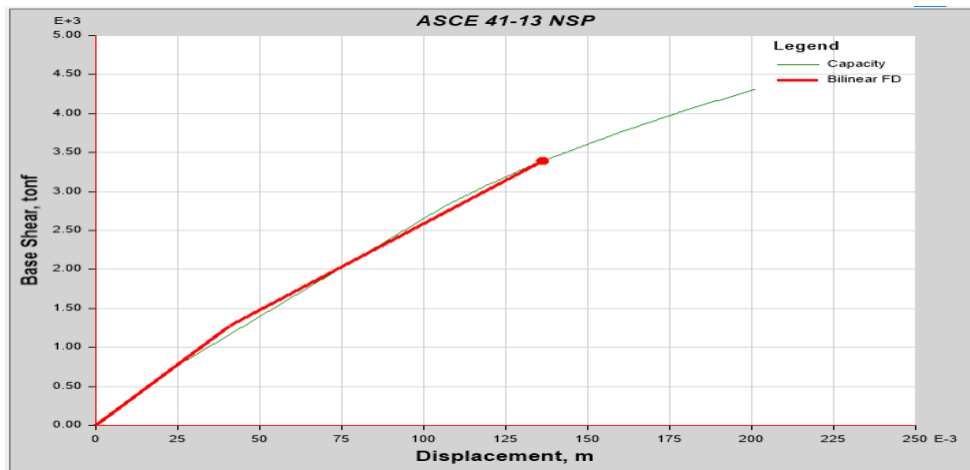


Figura XXV. Obtención del punto de desempeño según ASCE/SEI 41-13

Para comparar y determinar el nivel de daño alcanzado, se necesita un parámetro para los puntos de desempeño alcanzado para diferente nivel de solicitud sísmica. El método de valoración implica dividir la curva de capacidad en varias regiones mediante las fases de desempeño, y cada línea de análisis recibió las siguientes calificaciones de desempeño:

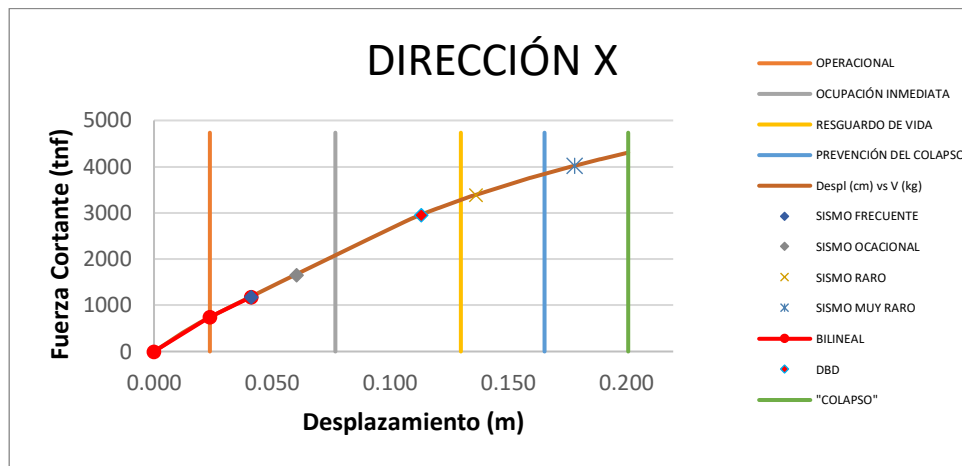


Figura XXVI. Niveles de desempeño – sismo-frecuente.

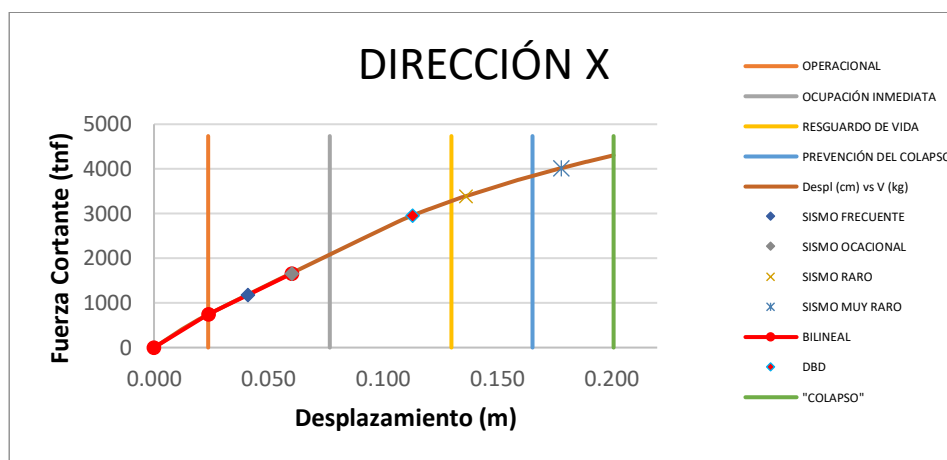


Figura XXVII. Niveles de desempeño – sismo-ocasional

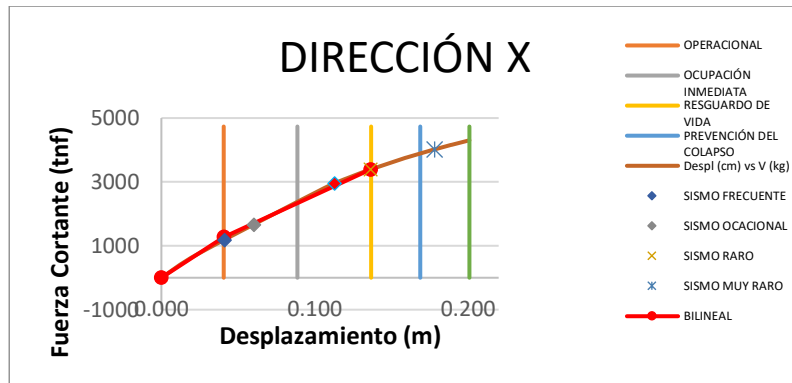


Figura XXVIII. Niveles de desempeño – sismo-raro, sismo-severo E-030.

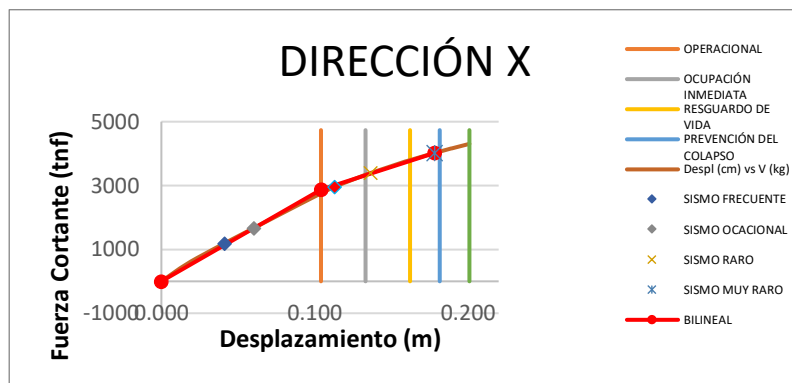


Figura XXIX. Niveles de desempeño – sismo-muy raro, sismo-raro E-030.

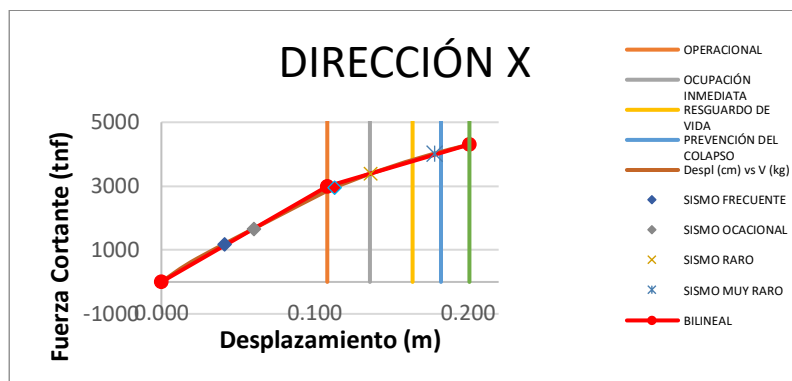


Figura XXX. Niveles de desempeño – sismo-muy raro E030.

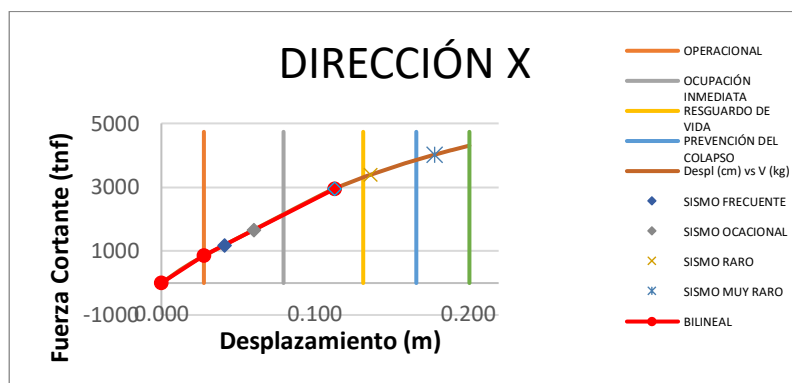


Figura XXXI. Niveles de desempeño – R1.245.

Sismos de Diseño	Nivel de Amenaza Sísmica	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad de Vida	Prevención del Colapso	Objetivos de desempeño (SEAOC Vision 2000 Committe, 1995)
Frecuente	43 años	1	0	0	0	Objetivo Básico
Ocasional	72 años	1	0	0	0	Objetivo Esencial
Raro	475 años	0	0	1	0	Objetivo Básico
Muy Raro	970 años	0	0	0	1	Objetivo Básico

Tabla XXXVIII. Objetivos de Desempeño VISION 2000

Sismos de Diseño	Nivel de Amenaza Sísmica	Operacional	Ocupación Inmediata	Seguridad de Vida	Prevención del Colapso
Frecuente	50 % en 50 años	a			
Ocasional	20 % en 50 años	e			
Raro	5 % en 50 años			k	
Muy Raro	ASCE 7 MCER				p

Tabla XXXIX. Objetivos de Desempeño ASCE/SEI 41-13

Sismos de Diseño	Nivel de Amenaza Sísmica	Operacional	Ocupación Inmediata	Seguridad de Vida	Estabilidad Estructural
Servicio	43 años	v			
Diseño	72 años	v			
Máximo	475 años			v	

Tabla XL. Objetivos de Desempeño ATC-40

NTP E0.30	ATC-40	ASCE 41-13, VISION 2000	INTERSECCIÓN		NIVEL DE DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA
SISMO	SISMO	SISMO	Desp (m)	Fc (ton)	
	SERVICIO	S-FRECUENTE	0.041	1176.45	OP
	DISEÑO	S-OCACIONAL	0.06	1656.851	OI
S-SEVERO		S-RARO	0.136	3389.835	LS
	MAXIMO		0.143	3499.291	PC
S-RARO		S-MUY RARO	0.178	4017.16	PC
S-MUY RARO			0.201	4304.92	>C
		MBD R1.245	0.113	2950.214	LS

Tabla XLI. Nivel de desempeño dirección X.

Condición	MBF	MBD
Estructuración	El modelo se modificó para adaptarse al sistema dual y la estructura consta de columnas, vigas y muros de secciones variables desde la base hasta la altura máxima.	El modelo se modificó para adaptarse al sistema dual y la estructura consta de columnas, vigas y muros de secciones variables desde la base hasta la altura máxima.
Cortante de la estructura	Los cortantes resultantes se determinan mediante métodos basados en fuerzas utilizando el código especificado en la NTP E.030.	El cambio el cortante basal se logra siguiendo las ilustraciones por Priestley et al. y combinando con la deriva límite definida en la NTP E.030.
Cortantes aplicadas a la estructura	El valor de fuerza cortante aplicados en cada trayectoria del edificio seleccionado es: para la trayectoria X:647.94 toneladas	El valor de fuerza cortante aplicados en cada dirección del edificio seleccionado es: X: 1221.89 toneladas
Validación esperada	Los resultados se verifican obteniendo el desplazamiento máximo según AEL y el método AENL (método de Pushover): MBF: Diseño X: 2.02 cm no lineal: X: 13.64 cm La estructura de los MBF está bien diseñada porque se ubican en el rango de niveles de resguardo de vida; por otro lado, se observa que los desplazamientos en la evaluación no lineal son mayores que en el AE.	Los siguientes resultados se derivaron de los desplazamientos del MBD y el análisis no lineal: MBD: Diseño X: 19.05 cm Estática no lineal: X: 11.31 cm El MBD alcanzó el nivel de resguardo de vida. Además, se consigue prestar atención que los desplazamientos son similares en comparativa con el MBF y por lo tanto se puede ultimar que el MBD es eficiente y consiguientemente opera correctamente.

Tabla XLII. Análisis comparativo y validación de MBD y el MBF.

Esta tabla de contraste muestra que el enfoque de diseño basado en el desplazamiento es efectivo ya que se obtienen resultados parejos y conservadores.

Sismo Dirección	Dinámico	Estático	MBD
<i>Dir X-X</i>	533.64	647.94	1221.47

Tabla XLIII. Resumen de cortantes basales

En la distribución de los desplazamientos laterales obtenida aplicando la metodología planteada por Priestley, donde la delineación se adapta a la capacidad, conlleva una aproximación superior al alcanzado por el estudio dinámico escalonado, se observa que el contraste de los desplazamientos laterales en planos superiores disminuye relativamente, muestra que el MBD tiene el desarrollo para pronosticar con mayor precisión la configuración del desplazamiento.

NIVEL	Pi (ton)	hi (m)	METODO MBF		Fi (tnf)	METODO MBD		Diferencia Porcentual
			(Pixhi)	(Pixhi)(Σ Pixhi)		Fi (tnf)		
5	684.52	16.00	10952.39	0.25	164.15	282.13	42%	
4	936.57	13.00	12175.40	0.28	182.47	333.24	45%	
3	947.01	10.00	9470.12	0.22	141.93	274.44	48%	
2	959.40	7.00	6715.81	0.16	100.65	205.44	51%	
1	979.90	4.00	3919.61	0.09	58.74	126.21	53%	
	4507.41		43233.33	1.00	647.94	1221.47		

Tabla XLIV. Comparación de fuerzas cortantes.

Se indica la variación porcentual de los empujes laterales sometidas en las distintas elevaciones, con un 42% como mínimo en el piso superior y un 53% como máximo en la base.

DESCRIPCION	METODO MBF	METODO MBD
Cortante estática	647.94 tnf	1221.47 tnf
Cortante dinámica	534.76 tnf	
Desplazamiento de diseño	-	19.05 cm
Desplazamiento de análisis	2.02 cm	19.05 cm
Ductilidad del sistema	-	1.37
Amortiguamiento equivalente	5.00%	8.85%
Amortiguamiento hysterético	-	24.10%
Factor Ro general	7	-
Factor Ro por ductilidad	-	1.24
Periodo	0.58 seg	1.58 seg
Rigidez	-	6411.83
Comportamiento	ELÁSTICO	INELÁSTICO

Tabla XLV. Confrontación de los parámetros del MBF vs MBD.

Al obtener los resultados es notorio identificar la diferenciación esencialmente de las cortantes en la base, marcando está a favor del MBD en un 47.8 %, se asume o se interpreta este valor como el mayor rendimiento de afrontar a un evento telúrico, estas incidencias que se muestran ayudan a identificar que la estructura soportará sin problema alguno los embates del sismo para lo cual fue delineado, con referencia a las derivas no obstante con el método usual se cumple con los estándares de diseño, sin embargo el MBD nos da un margen aun mayor de 19.05 cm en la planta superior.

MBF	MBD
Esta estructura es resistente a fuerzas sísmicas predeterminadas y el desplazamiento de sus elementos no excede el valor permisible bajo las condiciones de servicio	Los desplazamientos de elementos estructurales no exceden valores predeterminados para lograr los objetivos de diseño.
Seleccionar un nivel de resistencia suficiente para permitir que la estructura se deforme dentro de la región o rango elástico sin colapsar.	En el MBD el concepto no es lo que resiste el elemento sino cuanto se puede deformar el elemento estructural durante un sismo intenso sin colapsar.
Cuando una estructura es sometida a un terremoto, responde de tal manera que la estructura no siempre se mueve hacia la región inelástica, y aunque aun así llegue a ella, no colapsará. Teóricamente, el MBF se conceptualiza como un sistema con 1GDL, con sus propias propiedades y parámetros como la rigidez, periodo y masa.	Considera un sistema equivalente 1GDL al igual que el MBF, la simplificación se hace como un sistema con sus propias características un sistema real elástico con sus propias cualidades dinámicas, la simplificación del mismo genera una imprecisión.
Se tienen cuatro objetivos de desempeño que indica los estándares, el MBF supone que el periodo es elástico. Cuando la estructura se somete a sismos intensos, el periodo deja de ser elástico y pasa a ser inelástico por que la estructura se degrada y disipa energía con ese tipo de comportamiento, sin embargo, este método considera el periodo elástico.	A diferencia del caso FBD, el desplazamiento de cada nivel del MBD no está determinada por el período de retorno. Dependerán de las particularidades de la estructura, los métodos basados en el desplazamiento determinan el período estructural en función del desplazamiento
Una de las limitaciones que tiene el MBF, es la relación resistencia ductilidad, para considerar el periodo inelástico los reglamentos establecen factores de reducción, el método supone que el desplazamiento es elástico que será igual al desplazamiento inelástico de la estructura durante un sismo intenso. En sistemas inelásticos: la resistencia es menos importante que el desplazamiento, los factores de reducción prácticamente no influyen en el desplazamiento máximo de la estructura	En el MBD, el factor de comportamiento es hallado y dependen de la ductilidad y el amortiguamiento conveniente de cada estructura, a diferencia del MBF que considera que las estructuras tendrán un idéntico factor de comportamiento en un mismo sistema estructural.

Tabla XLVI. Condiciones contrapuestas del MBF y MBD.

6. Conclusiones

- El diseño basado en fuerzas toma en cuenta la rigidez independientemente de la resistencia, además de que este método todo lo trabaja en el rango elástico lineal cuando se sabe que los niveles de desplazamiento por ejemplo para seguridad de vidas ya están en el rango inelástico, también este método asume que la capacidad del desplazamiento elástico es proporcional a la resistencia es decir de que para cada curvatura de fluencia se tiene una diferente resistencia y esa suposición de diseño es falsa no es real, del mismo modo no se conocen las fuerzas tampoco se conoce el desplazamiento y muchas veces ese desplazamiento objetivo está muy por encima del punto de desplazamiento entonces ello conlleva a tener que volver a diseñar la estructura.
- Se logró un alto valor de amortiguamiento del 8.85% amortiguamiento y 24.10% histerético utilizando MBD es inferior al 5% teórico considerado por el MBF. Muestra el MBD tiene en cuenta las propiedades de ductilidad y amortiguación conformes a cada estructura, a diferencia del MBF, que perennemente se delinea para un 5% de amortiguación.
- El período obtenido por MBD (1.58 s) es mayor que el obtenido por MBF (0.58 s), lo que puede explicarse, el nivel de desproporción de deformación para ambos delineamientos de diseño. Este enfoque se utiliza en uno y otro método porque el MBD logra desplazamientos mucho mayores que el MBF.
- La rigidez lateral en el MBF es un valor utilizado para contrastar y comprobar la irregularidad estructural. Por otro lado, para el MBD este valor es significativo en la fase de diseño, ya que consiente determinar la cortante en la base. La rigidez MBD (es 6411.83 tnf/m, el resultado es inferior a los valores MBF (X: 535382 tnf/m, Y: 605995 tnf/m) porque la degradación resultante se tiene en cuenta en el delineamiento sísmico. Revisando la norma y colaborando con otras normas actualmente, la rigidez lateral cumple un papel transcendental en el periodo de la estructura a mayor rigidez menor periodo y la inversa se cumple también a menor rigidez mayor periodo qué quiere decir con eso de que esta rigidez cuando esté, esta estructura puesta en servicio y haya experimentado niveles de sismos en su vida útil pues la rigidez inicial no será la misma que cuando se haya construido la edificación. En el MBD se calcula de manera inelástica, se considera la rigidez secante a máxima deformación, esta rigidez ya no es la rigidez inicial, esta rigidez es en el punto de desplazamiento máximo.
- Los desplazamientos MBD y análisis no lineal dieron los siguientes resultados: MBD: Diseño X: 19.05 cm, este valor se entiende como el punto máximo de desplazamiento de la estructura, en tanto que en la condición Estática no lineal: X: 11.31 cm, considerando un factor $R=1.245$ estos valores indican que la estructura se encuentra en el rango de Seguridad de vida, asimismo se puede observar que los desplazamientos son similares en comparación con el MBF: Diseño X: 2.02 cm, Y: 1.78 cm estos valores corresponden al análisis lineal, y en la condición Estática no lineal: X: 13.64 cm y por lo tanto se puede ultimar que el MBD es eficiente y opera correctamente.
- Se alcanzaron la fuerza cortante en la base más alta utilizando el MBD (X: 1221.47tnf) en comparación con las fuerzas cortantes en la base conseguidas con el diseño MBF (AE 647.94 tnf e AD: 534.76 tnf). Esto se debe al hecho de que durante el diseño la respuesta no lineal se tiene en cuenta en el MBD, pero no en el MBF. No obstante, con respecto a la fuerza de diseño que no se considera la sobre resistencia de la estructura, puesto que si diseñamos con esa fuerza que obtenemos de multiplicar la rigidez efectiva por el desplazamiento objetivo se obtendrá una fuerza mucho mayor y si se diseña con esa fuerza sin duda se conseguiría una estructura elástica entonces ahí se tiene que considerar y hacer algunos ajustes y considerar la sobre resistencia de la estructura.
- El MBD demostró ser efectivo utilizando AENL tipo Pushover porque tiene en cuenta la ductilidad del edificio. El AENL utilizando la norma ASCE/SEI 41-13 mostró una ductilidad de 4.078, mientras que el método de diseño por desplazamiento (MBD) tuvo un valor de 1.374, mostrando una desviación del 34%. Esto

se debe a que el análisis de empuje tiene en cuenta el efecto P- Δ y la capacidad de desempeño máxima de la estructura, este valor es semejante al obtenido por otras investigaciones (Suarez, 2018), obtuvo una ductilidad de 4.722, mientras que en el MBD tuvo un valor de 1.540, mostrando una desviación del 33%.

- Considerando que ambos métodos planteados, conllevan fundamentos de análisis de comportamientos opuestos, mientras que el MBF asume el desarrollo del edificio en el rango elástico, el MBD plantea lo mismo, pero en la categoría inelástico. Los resultados conseguidos son consistentes con los estudios FEMA 440, VISION 2000, ASCE/SEI 41-13 y ATC-40. Después de penetrar en la zona plástica, la resistencia estructural continúa aumentando.
- En la distribución de los desplazamientos laterales obtenida aplicando la metodología planteada por Priestley, donde la delineación se adapta a la capacidad, conlleva una aproximación superior alcanzado por el estudio dinámico escalonado, se observa que el contraste de los desplazamientos laterales en planos superiores disminuye relativamente, muestra que el MBD tiene el desarrollo para pronosticar con mayor precisión la configuración del desplazamiento.
- Los resultados conseguidos de ambos métodos son admisibles para la valoración de edificios, ya que los objetivos de desempeño para el sismo de diseño se encuentran en seguridad de vida para el MBF y el MBD. Estos enfoques permiten un mejor control y seguridad al definir los delineamientos de resguardo requeridos. El MBD permiten una mejor estimación de los desplazamientos estructurales, por lo que estos cálculos de desplazamiento ayudarán a mejorar algunas de las deficiencias del MBF.
- Al efectuar el análisis de ambos métodos bajo las consideraciones vigentes de la norma E-0.30 permitió obtener resultados apropiados asegurando un comportamiento verdaderamente conveniente de la estructura, por ende, se consolida el estudio por los criterios de aceptación. Basado en los principios de la dinámica estructural y el concepto de propiedades modales generales en la respuesta del edificio, aplica este estudio para diferentes contextos siempre en cuando esta, esté ceñida estrechamente a los estándares vigentes.
- Al hallar los resultados y todos los parámetros de análisis estructural con apoyo del Software ETABS permitió efectivamente, comprobar, interpretar y alcanzar efectos más confiables, en la etapa de análisis y cálculo de los elementos estructurales. Cuando se utiliza un programa de diseño y análisis estructural, es una buena idea verificar cuidadosamente cómo se efectúa el análisis y si los resultados obtenidos están dentro de los rangos esperados de los valores de acceso ingresados en el programa, los errores pueden cambiar significativamente los resultados y las decisiones.
- El MBD es un método más racional solo que se tiene que evaluar mejor y hacer ajustes con respecto a la fuerza de diseño que no consideran la sobre resistencia de la estructura. El enfoque del MBD es un método fácil de utilizar, pero por su rango dinámico resumida es cuestionable. A diferencia de MBF, tiene diferentes períodos y modos de vibración. Probablemente esta sea la razón por la que el enfoque MBF todavía se utiliza y se seguirá utilizando.
- Los resultados muestran que siempre que se utilice un enfoque basado en el desempeño, el MBF puede lograr resultados de diseño óptimos y se ha demostrado que su variación de carácter de diseño es factible. Su verificación se realiza mediante análisis de tipo Pushover.
- Se debe definir y ahondar más, es sobre si algún tipo de estructuras por su tamaño por su complejidad arquitectónica por su importancia o porque se está abusando de la irregularidad estructural requiere de análisis más refinados fundamentalmente para asegurar que ese tipo de estructuras se van a comportar bien. Al emplear

variables más difíciles pero similares y/o comparables, se conseguirá una evaluación más precisa del rendimiento de las estructuras en distintos entornos y condiciones sísmicas, así como normativos.

- El método basado en desplazamiento en comparación con el método tradicional es un método más real, además es un método de delineamiento muy didáctico, rápido y práctico, puesto que se puede determinar simplemente con apoyo del programa básico de Microsoft como es el Excel, por tanto, es menos complejo y consiguientemente resulta más barato el uso de este, sin embargo, para la implementación de esta, en la norma técnica peruana se requiere efectuar análisis sísmicos más refinados. Se propone utilizar criterios más estrictos y rigurosos en los delineamientos sísmicos, manteniendo una relación significativa con los estándares actuales, para avanzar en futuras investigaciones.
- El planteamiento que se hace es que el diseño se tiene que hacer desde una perspectiva conceptual con pocos números y la computadora no debe ser el centro de diseño, sino debe ser la herramienta que confirme, que el diseño que se conceptualice sea exitoso, por ende, es importante notar que en el proceso del modelado y/o análisis con el Etabs, se debe tener cuidado al ingresar datos así como entender cuál es el proceso que efectúa el programa de análisis sísmico, dentro de ese esquema el software de aplicación es una herramienta de evaluación de consecuencias es decir una herramienta para verificar y garantizar que el diseño esté bien hecho.

Referencias

- [1] Aguiar F, R. (2007). *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte*. Barcelona: Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/28502>
- [2] American Society of Civil Engineers [ASCE]. (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13)*. doi:<http://dx.doi.org/10.1061/9780784412855>
- [3] Applied Technology Council [ATC]. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)*. Obtenido de <http://tanbakoochi.com/File/www.tanbakoochi.com-ATC40.pdf>
- [4] Applied Technology Council [ATC-55 Project]. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440)*. Obtenido de <https://mitigation.eeri.org/wp-content/uploads/fema-440.pdf>
- [5] Building Seismic Safety Council. (2006). *NEHRP Recommended Provisions: For Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures and Accompanying Commentary and Maps (FEMA 451)*. Obtenido de <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2008108226.pdf>
- [6] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS]. (2019). *Reglamento Nacional de Edificaciones - R.N.E. (E 030 Diseño Sismo-resistente). Aprobado por RM-043-2019-Vivienda. (Perú)*. Obtenido de <https://infocad3d.com/reglamento-nacional-de-edificaciones/>
- [7] Niquen, K., Villarreal, G., & Niquen, V. (2023). Análisis comparativo del comportamiento estructural de una edificación de cuatro niveles con base fija y base aislada. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 107-136. doi:<https://doi.org/10.36561/ING.25.8>
- [8] Priestley, M., Calvi, G., & Kowalsky, M. (2007). *Displacement-based Seismic Design of Structures*. Pavia: IUSS Press. Obtenido de https://books.google.com.pe/books/about/Displacement_based_Seismic_Design_
- [9] Structural Engineers Association of California [SEAOC] VISION 2000 . (1995). *Performance Based Seismic Engineering of Buildings*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/416420604/seaoc-vision-2000-pdf>
- [10] Suárez, J. A. (2018). *Análisis sísmico comparativo entre el método de diseño basado en fuerzas y el método de diseño directo basado en desplazamientos [Tesis de bachiller, Universidad Estatal del Sur de Manabí]*. Obtenido de <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1410>
- [11] VISION 2000. (1995). *Desempeño sísmico de edificios: binomio capacidad-demanda*. Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6230/04CAPITULO3.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

GZC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

GVC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Machine Learning en la detección y predicción de enfermedades del ganado: una visión general

*Machine Learning in the detection and prediction of livestock diseases: an
overview*

*Aprendizado de Máquina na detecção e previsão de doenças do gado: uma visão
geral*

Marco Vieto-Vega^{1(*)}, Yaliska Moreno-Gonzalez²

Recibido: 28/03/2024

Aceptado: 09/10/2024

Resumen. - La detección temprana y la predicción de enfermedades en el ganado son esenciales para garantizar la salud y el bienestar de los animales, mejorar la productividad y reducir las pérdidas económicas. En este contexto, el Machine Learning (ML), un avance prominente dentro de la inteligencia artificial emerge como una herramienta revolucionaria para transformar el proceso de identificación y manejo de enfermedades en los animales. Esta tecnología permite desarrollar algoritmos complejos capaces de analizar grandes volúmenes de datos clínicos y ambientales, identificando patrones de alerta temprana en síntomas y comportamientos asociados a enfermedades. A través de modelos predictivos, el ML evalúa factores de riesgo y estima la probabilidad de aparición de enfermedades, lo que mejora significativamente la precisión diagnóstica y la efectividad de los tratamientos. Este artículo revisa de manera exhaustiva el uso de ML en la producción ganadera, abordando aplicaciones, modelos y técnicas de vanguardia para la detección y manejo sanitario del ganado, y plantea oportunidades para una gestión ganadera más eficiente y ética, considerando además los desafíos éticos y de privacidad inherentes a la implementación de estas tecnologías.

Palabras clave: Machine learning; predicción; ganadería; ciencia de datos.

(*) Autor de correspondencia

¹ Ingeniero en Sistemas y Computación. Investigador Independiente, Panamá, mv030790@gmail.com,

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-0752-0205>

² Ingeniera en Producción Animal (MSc). Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Panamá, milena2y@gmail.com,

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6643-7713>

Summary. - *Early detection and prediction of diseases in livestock are essential to ensure animal welfare, improve productivity, and reduce economic losses in the livestock sector. In this context, Machine Learning (ML), a key advancement within artificial intelligence, emerges as a transformative tool for managing animal health. This technology enables the development of complex algorithms capable of analyzing large volumes of clinical and environmental data, identifying early warning patterns in symptoms and behaviors associated with diseases. Through predictive models, ML assesses risk factors and estimates the likelihood of disease occurrence, significantly enhancing diagnostic accuracy and treatment effectiveness. This article provides a comprehensive review of ML's use in livestock production, covering cutting-edge applications, models, and techniques for disease detection and management in livestock. It also highlights the ethical and privacy challenges that accompany the implementation of these technologies, aiming to pave the way for more efficient and responsible livestock management.*

Keywords: *Machine learning; prediction; livestock; data science.*

Resumo. - *A detecção e previsão precoce de doenças em animais de produção são essenciais para garantir o bem-estar animal, otimizar a produtividade e minimizar as perdas econômicas no setor pecuário. Nesse contexto, o Machine Learning (ML), um avanço importante dentro da inteligência artificial, surge como uma ferramenta transformadora para a gestão da saúde animal. Esta tecnologia possibilita o desenvolvimento de algoritmos complexos capazes de analisar grandes volumes de dados clínicos e ambientais, identificando padrões de alerta precoce em sintomas e comportamentos associados a doenças. Através de modelos preditivos, o ML avalia fatores de risco e estima a probabilidade de ocorrência de doenças, aumentando significativamente a precisão diagnóstica e a eficácia dos tratamentos. Este artigo oferece uma revisão abrangente do uso do ML na produção pecuária, abordando as aplicações, modelos e técnicas mais avançadas para a detecção e gestão de doenças no setor. Também discute os desafios éticos e de privacidade inerentes à implementação dessas tecnologias, com o objetivo de abrir caminhos para uma gestão pecuária mais eficiente e ética.*

Palavras-chave: *Aprendizado de máquina; previsão; pecuária; ciência de dados.*

1. Introducción. - La agricultura y ganadería representan sectores fundamentales de la economía global y lo seguirá siendo a medida que la población mundial continúe creciendo. Las enfermedades del ganado representan una preocupación para la seguridad alimentaria mundial, las cuales impactan negativamente la producción y causan pérdidas económicamente significativas. La detección de patógenos se basa en métodos convencionales, como inspecciones visuales y análisis de laboratorio, que requieren tiempo y mano de obra intensiva, lo que retrasa el diagnóstico y eleva los costos de producción [1,2].

En la ganadería moderna, el monitoreo continuo de la salud animal es esencial, y el uso de tecnologías avanzadas con datos en tiempo real permite una gestión más proactiva. Al analizar estos datos mediante técnicas de ciencia de datos y Machine Learning (ML), es posible identificar tempranamente signos de enfermedades, facilitando intervenciones oportunas y reduciendo los costos asociados a diagnósticos tardíos [3].

El ML, una disciplina de la ciencia de datos que combina matemáticas, estadística y programación, desempeña un papel crucial en la extracción de información valiosa de grandes volúmenes de datos [4]. En la ganadería, el ML ha demostrado ser una herramienta poderosa, capaz de detectar patrones en los datos que son invisibles al ojo humano, permitiendo la predicción de enfermedades antes de que los síntomas sean evidentes [5]. Año tras año, el ML encuentra nuevas aplicaciones en campos científicos tan variados como la bioinformática [6,7], bioquímica [8,9], medicina [10,11], meteorología [12]–[14], robótica [15], acuicultura [16,17], demostrando su versatilidad y potencial. Su aplicación en la ganadería se suma a esta lista creciente, marcando un antes y un después en cómo se monitorean y tratan las enfermedades en los animales.

Este documento explora los modelos de ML más efectivos para detectar y predecir enfermedades en el ganado, destacando aplicaciones innovadoras y casos de estudio que evidencian el potencial de esta tecnología en el sector ganadero.

2. Una visión general sobre el ML. - El concepto de ML, introducido por Arthur Samuel en 1959, inauguró una era donde las computadoras pueden aprender de la experiencia, reduciendo la necesidad de programación específica para cada tarea [18]. En ese sentido, como subcampo de la inteligencia artificial, el ML se centra en algoritmos informáticos de autoaprendizaje, que mejoran a través de la experiencia, sin ser programados para ello [19]. Esto resulta en modelos capaces de clasificar, predecir y agrupar datos basados en patrones que emergen de ejemplos previos [20,21].

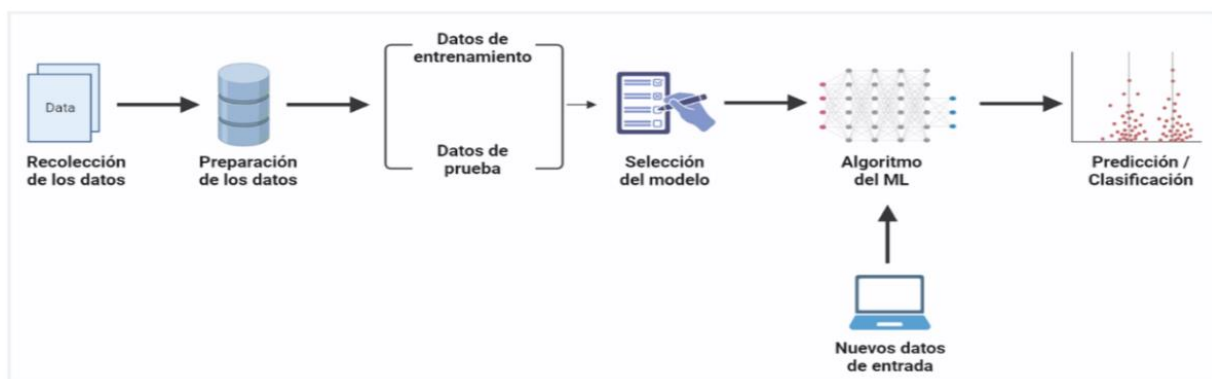


Figura I. Flujo del trabajo del ML. Fuente: Elaboración propia

El rendimiento de los modelos de ML se mide mediante técnicas estadísticas y matemática, y tras el entrenamiento, se utilizan para analizar nuevos datos basándose en el conocimiento adquirido [20]. Este proceso, ilustrado en la Figura I, es fundamental para entender cómo el ML aplica la experiencia previa a nuevas situaciones. Una vez que se completa el proceso de aprendizaje, el modelo entrenado se puede utilizar para clasificar, predecir o agrupar nuevos ejemplos (datos de prueba) utilizando la experiencia adquirida durante el proceso de entrenamiento [20]. La Figura I representa el proceso tradicional desde la perspectiva de ML.

2.1. Tipos de ML. - Existen tres categorías principales en ML, cada una con aplicaciones específicas en ganadería:

- **Aprendizaje supervisado:** se define como la tarea de ML empleada para inferir resultados a partir de datos etiquetados. Se usan datos de entrenamiento compuestos por datos de ejemplos, y mediante un algoritmo de aprendizaje supervisado, se analizan los datos obteniendo una función que permite inferir resultados a partir de nuevos datos [22].
- **Aprendizaje no supervisado:** se refiere a la tarea de ML encargada de obtener una función que represente el comportamiento o patrón oculto a partir de datos sin etiquetar. Como los datos no tienen etiquetas, no hay una evaluación de la precisión de los resultados del algoritmo [22].
- **Aprendizaje por refuerzo:** es similar al aprendizaje supervisado, pero no utiliza datos de entrenamiento. El algoritmo intenta aprender por ensayo y error, donde una secuencia de resultados satisfactorios refuerza (señalan) los resultados previstos correctamente [21].

La figura II muestra el flujo de los métodos de ML mencionados en esta sección.

2.2. Algoritmos de ML en ganadería. - A continuación, se describen algunos algoritmos clave de ML, destacando sus aplicaciones para la detección y monitoreo de enfermedades en el ganado.

Modelos bayesianos. Son un tipo de modelo estadístico que utiliza el teorema de Bayes y reglas matemáticas para mejorar nuestras predicciones a medida que obtenemos nueva información. Son útiles para tanto para clasificar como para predecir datos, y un ejemplo común es el Naive Bayes para el aprendizaje supervisado [24]. El Naive Bayes, una versión simplificada, es popular para clasificación y predicción, especialmente cuando se cuenta con múltiples indicadores de salud. En ganadería, ha sido empleado para clasificar condiciones de salud como mastitis y predecir riesgos futuros al detectar patrones específicos en datos de historial de salud y actividad.

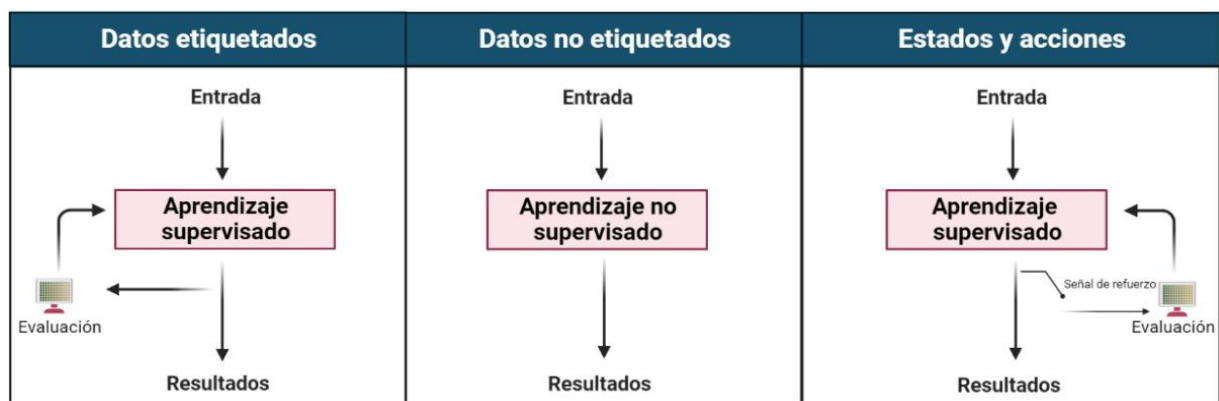


Figura II. Representación de los modelos de ML. Adaptado de [23]

Árboles de decisión. Son un tipo de algoritmo de clasificación y regresión que construyen un árbol de decisiones para llegar a una clasificación final. Se construyen en una estructura similar a un árbol [25], en la que cada nodo representa una decisión o punto de división y cada rama representa un posible resultado de esta división. Las hojas del árbol representan la predicción o clasificación final [26]. Son útiles para la detección de enfermedades, ya que permiten identificar fácilmente factores de riesgo en datos de salud animal, como indicadores de inflamación en análisis de leche. Además, los árboles de decisión brindan transparencia en los resultados, lo cual es importante para interpretar cómo cada factor influye en el diagnóstico final [46].

Redes neuronales (NN). Inspiradas en el cerebro humano, estas redes son sistemas de puntos interconectados que pueden aprender y tomar decisiones, imitando funciones como el reconocimiento de patrones [27]. Se dividen en dos categorías: NN tradicionales y NN profundas. Se usan tanto en aprendizaje supervisado como no supervisado y varían desde estructuras simples hasta redes profundas y complejas. En ganadería, las NN profundas se han utilizado para analizar imágenes termográficas y detectar anomalías en la temperatura corporal de los animales, ayudando en la

identificación temprana de infecciones. Las redes neuronales también se aplican para monitorear actividad y patrones de movimiento, detectando cambios en el comportamiento que podrían indicar estrés o enfermedades [45-48].

K-means clustering. Este algoritmo de agrupamiento, perteneciente al aprendizaje no supervisado, clasifica datos en grupos según la cercanía de los puntos entre sí. Se usan en tareas como agrupamiento de documentos y la segmentación y la compresión de imágenes [28]. Es particularmente útil para monitorear el comportamiento en grandes grupos de animales, agrupando patrones de actividad. En ganadería, K-means ayuda a identificar animales con comportamientos atípicos (por ejemplo, menor actividad o aislamiento), lo cual puede señalar problemas de salud tempranos [38,39].

Support Vector machines (SVM). Las máquinas de soporte vectorial son algoritmos de clasificación y regresión que maximizan la distancia entre clases de datos. Las SVM se introdujeron por primera vez en 1995 [29], sobre la base de la teoría del aprendizaje estadístico. Las SVM funcionan encontrando un hiperplano que separa dos clases de puntos de datos con el mayor margen posible [30], [31]. Los algoritmos SVM son empleados en el aprendizaje supervisado y los más utilizados incluyen la regresión de vectores de soporte [32], máquina de vectores de soporte de algoritmo de proyección sucesiva [33], entre otros. En la ganadería, se aplican para distinguir entre animales sanos y aquellos en riesgo de desarrollar enfermedades. Por ejemplo, en estudios de comportamiento, las SVM pueden separar animales con patrones de movimiento normales de aquellos que muestran signos de cojera o estrés, optimizando la intervención temprana.

Bosques aleatorios. Un bosque aleatorio combina múltiples árboles de decisión para mejorar la precisión y reducir el sobreajuste. Al utilizar un conjunto de árboles, este método aprende tendencias generales en los datos sin ser excesivamente sensible a variaciones específicas [34]. Los bosques aleatorios son efectivos para el análisis de datos complejos de salud animal, como registros de temperatura, producción de leche y frecuencia de visitas al bebedero. Esta técnica permite identificar patrones en grandes volúmenes de datos sin perder precisión en cada decisión individual, ayudando a detectar anomalías como variaciones en el consumo de agua o alimentación que indican posibles problemas de salud [45-48].

2.3. Ejemplos de aplicación del ML en la ganadería. - La implementación de ML en ganadería permite un monitoreo constante de la salud animal y la detección temprana de enfermedades, mejorando así la producción [36,37]. La Figura III muestra el flujo de trabajo para aplicar ML en ganadería de precisión, desde la recopilación y procesamiento de datos hasta el desarrollo y uso de modelos para monitoreo de salud y gestión eficiente de recursos.

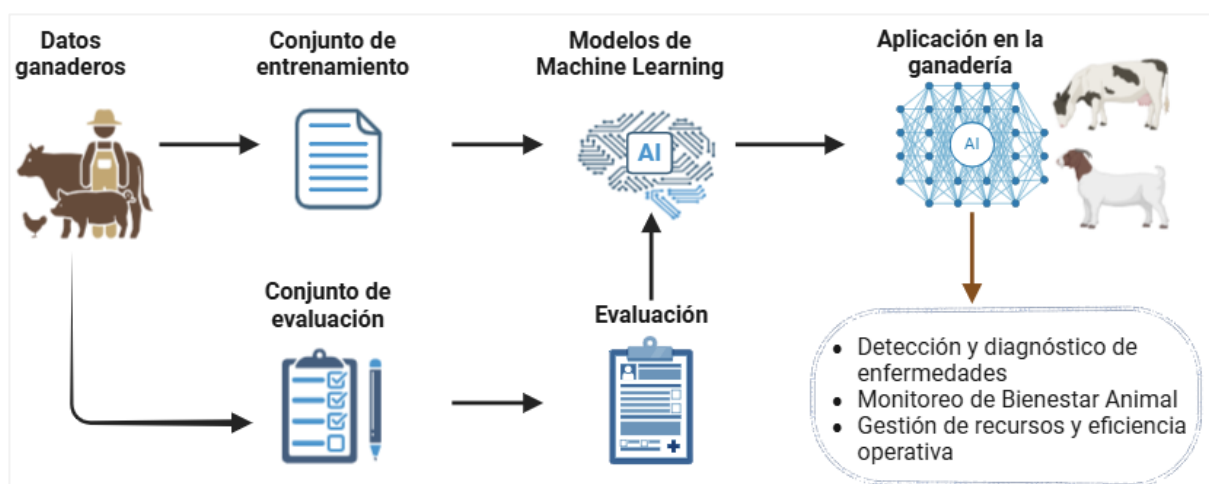


Figura III. Proceso de Implementación de ML en Ganadería de Precisión.

Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Bienestar Animal. - Existe una preocupación constante por el bienestar de los animales ya que está estrechamente relacionado con la calidad del producto, la salud del consumidor y la eficiencia económica [38]. Para la evaluación del bienestar animal, existen varios índices, incluidos los indicadores de estrés fisiológico y

comportamiento.

Monitorear el comportamiento de los animales es clave para su bienestar, ya que enfermedades o estrés pueden alterar sus patrones de actividad. Algoritmos de ML, como K-means, permiten identificar cambios en el comportamiento, como la reducción de la actividad o el letargo, que pueden señalar problemas de salud inminentes [38]. Un estudio utilizó K-means para clasificar el comportamiento de aves de corral y detectar signos tempranos de enfermedad [39].

Igualmente, diversos modelos de ML han sido implementados en la producción animal para identificar enfermedades en el ganado, los cuales se detallarán a continuación.

2.3.2 Detección de Mastitis. - La mastitis bovina es la enfermedad con mayor impacto económico en las lecherías a nivel mundial [40], provocada por bacterias, virus y lesiones [41]. Tradicionalmente, esta enfermedad se diagnostica mediante métodos como el conteo de células somáticas y la prueba de mastitis de California; sin embargo, estas técnicas suelen ser subjetivas y requieren personal capacitado, lo cual limita su aplicabilidad a gran escala [42-44].

Modelos como redes neuronales y bosques aleatorios han demostrado eficacia en la detección temprana de mastitis, alcanzando una sensibilidad de hasta el 81% en estudios recientes [45-48]. Asimismo, la combinación de termografía infrarroja con redes neuronales ha logrado una precisión del 90% en la detección de áreas inflamadas, un indicio temprano de infección [49-50].

Además de la detección directa, el ML permite monitorear la salud del hato e identificar vacas en riesgo de desarrollar mastitis, facilitando la toma de medidas preventivas. Por ejemplo, se ha reportado que redes neuronales pueden predecir correctamente el riesgo de mastitis con una sensibilidad del 75% [49]. Otros enfoques en el diagnóstico de mastitis incluyen modelos bayesianos, árboles de decisión y modelos mixtos lineales generalizados, ampliando las opciones y aplicabilidad de los modelos de ML para su detección [46, 51, 52].

2.3.3 Detección de cojeras. - La cojera es una condición dolorosa en animales de producción, caracterizada por anomalías en la marcha debido a lesiones en las extremidades, que puede ser causada por lesiones, enfermedades o deficiencias nutricionales [53,54]. Esta afección provoca pérdidas económicas significativas, afectando la producción de leche, la fertilidad, y generando mayores costos de tratamiento, además de reducir el peso de los animales al sacrificio [55,56].

Para su detección, se han empleado algoritmos de ML como bosques aleatorios, árboles de decisión y el clasificador Naive Bayes, logrando identificar patrones asociados a la cojera de manera efectiva [57-59].

2.3.4. Detección de anemia en cabras y ovejas. - La infección por nematodos gastrointestinales es un problema significativo en la producción de carne de ovejas y cabras, causando impactos económicos directos e indirectos debido a la salud comprometida de los animales. Los animales infectados pueden presentar pérdida de peso subclínica, anemia, reducción de proteínas y disminución en el consumo de alimento debido a la anorexia; en casos graves, estas infecciones pueden llevar a tasas altas de mortalidad [60,61].

Tradicionalmente, se ha utilizado pruebas de sangre y heces para detectar estas infecciones, aunque resultan costosas y conllevan el riesgo de propagación de enfermedades. Esto ha impulsado la creación de métodos más eficaces y menos invasivos. Un ejemplo es el sistema FAMACHA, que evalúa el color de la membrana ocular para identificar animales en riesgo de anemia, facilitando un tratamiento adecuado sin procedimientos invasivos.

Un estudio reciente desarrolló un clasificador de ML basado en SVM para predecir qué animales necesitan tratamiento según su puntuación FAMACHA, alcanzando un 80% de precisión [62]. Este clasificador optimiza la detección temprana y el tratamiento de anemia en ovejas y cabras, contribuyendo a la mejora de su salud y productividad.

3. Estudios de casos en la detección de enfermedades en ganadería con ML. - Un estudio demuestra el uso de ML para detectar enfermedades en vacas lecheras mediante la espectrometría de infrarrojo medio (MIR) [64], en el cual

recolectaron y analizaron 1909 muestras de leche de 467 vacas en dos granjas de Nueva Zelanda. El espectrómetro MIR, una herramienta no invasiva que mide la absorción de luz en varias longitudes de onda, generó perfiles químicos de la leche, permitiendo la detección temprana de condiciones como la mastitis y la cojera sin necesidad de pruebas adicionales. Los datos espectrales fueron preprocesados mediante filtrado y normalización para reducir ruido y mejorar la consistencia. En el análisis se utilizaron algoritmos de ML como Random Forest, SVM y NN, evaluados mediante métricas como sensibilidad, especificidad y el coeficiente de correlación de Matthews (MCC). El modelo de NN fue el más efectivo, logrando una sensibilidad del 62%, una especificidad del 97%, un MCC de 0.57 y un AUC de 79%, destacándose por su balance entre precisión y capacidad de detección.

Otro estudio realizado en Francia investigó el uso de ML para identificar cambios de comportamiento en vacas lecheras con acidosis ruminal subaguda (SARA) [70]. Durante nueve semanas, monitorearon a 28 vacas Holstein con un sistema de posicionamiento en tiempo real para registrar su actividad. De las vacas, 14 fueron inducidas a SARA mediante un cambio dietético, mientras las otras mantuvieron una dieta controlada. Se probaron varios algoritmos de ML, como K-Nearest Neighbors para regresión (KNNR) y árboles de decisión. El KNNR detectó el 83% de episodios de SARA, aunque generó un 66% de falsos positivos. Esto sugiere la necesidad de datos más amplios y modelados individuales para mejorar la precisión en granjas comerciales.

Un estudio desarrollado en 2022 implementó un sistema prototipo de diagnóstico de enfermedades bovinas usando un sistema experto y procesamiento de imágenes con redes neuronales convolucionales (CNN) [71]. Este sistema, dirigido a enfermedades visibles como la enfermedad de la piel y el gusano anular, empleó teléfonos móviles para capturar imágenes y registrar síntomas visuales, además de datos textuales para síntomas detectables solo mediante palpación. Las imágenes fueron procesadas y clasificadas por un modelo CNN que logró un 95% de precisión. Aunque el sistema mostró efectividad en diagnósticos rápidos, tuvo limitaciones en diferenciar enfermedades con síntomas similares, como el gusano anular y el virus de la piel verrugosa. Este sistema tiene un alto potencial para mejorar el diagnóstico en áreas rurales con acceso limitado a veterinarios, especialmente en economías en desarrollo.

En Irlanda, se desarrolló un sistema IoT que combina fog computing y ML para la detección temprana de cojera en vacas lecheras [69]. En el ámbito de la ganadería de precisión, el fog computing permitió procesar los datos de sensores de actividad, posición y signos vitales en un servidor local cercano a la granja, lo que redujo la latencia y evitó la transmisión masiva de datos a un centro remoto. Este sistema monitoreó continuamente a 150 vacas mediante podómetros y sensores para capturar datos sobre pasos, tiempo de descanso y cambios de postura. Gracias al fog computing, el volumen de datos enviados a la nube disminuyó en un 84%, crucial en zonas con conectividad limitada. El modelo de ML, que usó algoritmos de agrupamiento y clasificación, detectó la cojera con un 87% de precisión, hasta tres días antes de su detección visual, superando métodos tradicionales en un 8%. Además, su diseño en microservicios facilita la integración con otros sistemas, ofreciendo una solución adaptable y escalable para distintos entornos agrícolas.

3.1. Limitaciones metodológicas. - Los estudios revisados sobre ML en la ganadería de precisión en la Sección 3, presentan limitaciones metodológicas que afectan la generalización de los resultados. Por ejemplo, un estudio con solo 5.4% de observaciones de vacas enfermas muestra un desbalance de clases, limitando la capacidad del modelo para aplicarse en otros sistemas de producción [64]. Futuras investigaciones con muestras balanceadas mejorarían su precisión y aplicabilidad en la industria ganadera.

Asimismo, la tecnología MIR combinada con ML es una herramienta eficaz y no invasiva para monitorear la salud del ganado, aunque su precisión depende de la calidad y consistencia de los datos. Variaciones en la recolección de muestras pueden afectar los resultados, destacando la necesidad de estudios adicionales para adaptar el modelo a distintos entornos ganaderos.

Otra limitación es la alta tasa de falsos positivos en algunos modelos, como en el caso de la detección de acidosis ruminal, lo cual puede reducir la confianza en estos sistemas [70]. Mejorar la especificidad de los modelos es clave para su adopción en granjas a gran escala.

Por último, el sistema basado en fog computing del estudio [69] requiere configuraciones específicas de cada granja, lo que limita su precisión en lugares sin calibración previa. Además, su implementación enfrenta desafíos en áreas con conectividad limitada, afectando su escalabilidad en regiones rurales.

Estas limitaciones resaltan la importancia de estudios futuros que utilicen metodologías más robustas y muestras representativas para mejorar la aplicabilidad de los modelos en contextos diversos de ganadería.

4. Comparativa del ML en ganadería y otros sectores. - En el desarrollo de aplicaciones de ML en ganadería y medicina humana, existen importantes paralelismos y diferencias. Ambos sectores buscan optimizar la salud y eficiencia, pero enfrentan desafíos específicos relacionados con los datos disponibles, el contexto de aplicación y las implicaciones éticas y de privacidad. Esta sección compara sus aplicaciones y explora posibles oportunidades de transferencia de conocimiento.

En detección de enfermedades y diagnóstico, el ML ha avanzado en medicina para identificar patologías complejas, como el cáncer y enfermedades cardiovasculares, mediante el análisis de imágenes y registros electrónicos [68]. Estos algoritmos destacan en mejorar la rapidez y precisión de los diagnósticos. En ganadería, aunque los datos provienen de sensores de salud y comportamiento animal, el objetivo es igualmente identificar problemas de salud en etapas tempranas para mejorar la productividad y el bienestar animal [64]. Ambos sectores buscan reducir la dependencia de métodos manuales, pero en ganadería la implementación debe adaptarse a entornos rurales y operar con menor supervisión directa.

Respecto a la personalización del tratamiento, el ML en medicina permite diseñar tratamientos individualizados analizando variaciones genéticas y respuestas específicas a medicamentos [66]. En ganadería, el ML puede personalizar el manejo de cada animal, adaptando la alimentación y los tratamientos para optimizar la salud del rebaño y reducir costos, aunque con menos datos clínicos. En ambos casos, la personalización mediante ML permite un manejo más eficiente y reduce el riesgo de complicaciones a largo plazo.

En optimización de recursos y eficiencia, el ML permite en medicina mejorar la administración de registros y flujos de trabajo hospitalarios, reduciendo la carga de los profesionales y mejorando la eficiencia [67]. En ganadería, los sistemas ML facilitan el monitoreo automático del ganado, minimizando la necesidad de inspecciones manuales. Este ahorro de tiempo y recursos es esencial en granjas de gran escala, optimizando la asignación de personal y permitiendo que los ganaderos se enfoquen en actividades de mayor valor añadido.

5. Impacto económico y perspectivas a futuro. - La implementación de ML en la ganadería de precisión tiene un gran potencial económico, aunque se requieren estudios a largo plazo en escenarios comerciales reales para evaluar sus beneficios completos. En general, el ML reduce costos de diagnóstico y tratamiento al permitir una detección temprana de enfermedades, disminuyendo así el uso de antibióticos y tratamientos en granjas de gran escala. También aumenta la productividad con decisiones de manejo basadas en datos, optimizando el uso de recursos del hato. Al automatizar el monitoreo y reducir la necesidad de inspecciones manuales, el ML ahorra mano de obra y mitiga riesgos económicos al prever brotes de enfermedades, protegiendo la estabilidad financiera de las granjas y reduciendo la mortalidad del ganado.

Para alcanzar estos beneficios, es clave la colaboración entre especialistas en ciencias de datos y ML, veterinarios, ingenieros zootecnistas, ingenieros de computación y productores. Cada grupo aporta conocimientos esenciales: los expertos en ML desarrollan algoritmos avanzados; los veterinarios y zootecnistas, comprensión de la salud y comportamiento animal; los ingenieros de computación, la implementación y optimización de sistemas; y los productores, experiencia directa en la gestión del ganado. Esta colaboración permite adaptar las soluciones de ML a las condiciones específicas de cada granja, logrando sistemas más confiables y efectivos.

6. Ética y privacidad. - El uso de ML en la ganadería de precisión plantea consideraciones éticas y de privacidad que son clave para una adopción responsable y equitativa. La recolección de grandes volúmenes de datos sobre la salud y el comportamiento animal requiere medidas de seguridad, como cifrado y almacenamiento seguro, para prevenir

accesos no autorizados y el mal uso de la información. La transparencia en el acceso y uso de datos permite a los productores mantener control sobre cómo se emplea la información generada en sus granjas, lo cual es fundamental para construir confianza y seguridad en estas tecnologías [65].

Además, es crucial que las decisiones automatizadas del ML, como alertas de salud o ajustes de manejo, sean comprensibles y permitan la intervención humana cuando sea necesario. Esto asegura que los sistemas complementen el juicio y la experiencia del productor en lugar de reemplazarlos, preservando el enfoque en el bienestar integral de los animales y evitando tratarlos solo como datos.

Finalmente, es importante que el acceso a estas tecnologías sea equitativo, ya que los costos y la complejidad pueden crear una brecha entre grandes y pequeñas operaciones. Para mitigar este desafío, es esencial desarrollar modelos escalables y accesibles, acompañados de políticas de apoyo y programas de capacitación que permitan a todos los productores beneficiarse del ML. Al abordar estos aspectos de seguridad, equidad y transparencia, el ML puede integrarse de manera ética en la ganadería, promoviendo la productividad y el bienestar animal sin comprometer la privacidad de los datos.

7. Conclusión. - La incorporación de ML en la ganadería de precisión muestra un gran potencial para transformar el diagnóstico y la prevención de enfermedades, optimizando tanto la salud animal como la rentabilidad de las granjas. Los algoritmos de ML analizan de forma automatizada y rápida grandes volúmenes de datos provenientes de sensores, registros médicos y patrones de comportamiento, permitiendo identificar correlaciones y señales tempranas de enfermedades que de otro modo serían difíciles de detectar. Esto no solo posibilita intervenciones rápidas y menos costosas, sino que también reduce la dependencia de tratamientos extensivos, mejorando la eficiencia operativa.

8. Perspectivas para investigaciones futuras

Para maximizar estos beneficios, es fundamental profundizar en áreas clave que permitan la implementación eficiente y confiable de ML en la ganadería:

- 1. Desarrollo de modelos más interpretables y específicos:** Los modelos deben ser más comprensibles y adaptables a las particularidades de la producción animal. Esto permitirá que veterinarios y productores confíen y apliquen los resultados de ML en su manejo diario, logrando intervenciones oportunas y ajustadas a cada caso.
- 2. Integración de datos heterogéneos:** La integración de diversas fuentes de datos, desde biometría y comportamiento hasta variables ambientales, ampliará la capacidad predictiva del ML, proporcionando una visión holística del estado de salud animal.
- 3. Aplicación de aprendizaje activo y continuo:** La incorporación de técnicas de aprendizaje activo permitirá que los modelos se adapten constantemente a nuevos datos y escenarios, como cambios estacionales o de manejo, mejorando su precisión y relevancia en tiempo real.
- 4. Evaluación económica a largo plazo:** Estudios futuros deberán abordar de forma integral los costos y beneficios de implementar ML en escenarios de producción real, evaluando el retorno de inversión y el impacto en la sostenibilidad de las granjas. Esta información facilitará una adopción más fundamentada y generalizada del ML en el sector ganadero.

En conjunto, el ML promete una ganadería de precisión más eficiente y sostenible. Su éxito dependerá de la colaboración entre científicos de datos, veterinarios y productores, quienes, al compartir conocimientos y experiencia, podrán adaptar estas tecnologías a las necesidades específicas del sector ganadero.

Referencias

- [1] J. Chen et al., "Retrospect and Risk Analysis of Foot-and-Mouth Disease in China Based on Integrated Surveillance and Spatial Analysis Tools," *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 6, 2020. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2019.00511>. [Accessed April 24, 2023].
- [2] K. Džermeikaitė, D. Bačėninaitė, and R. Antanaitis, "Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases," *Animals*, vol. 13, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2023, doi: 10.3390/ani13050780.
- [3] S. Neethirajan, "The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 29, p. 100367, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100367.
- [4] X. Kang, S. Li, Q. Li, and G. Liu, "Dimension-reduced spatiotemporal network for lameness detection in dairy cows," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 197, p. 106922, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.106922.
- [5] M. Marimuthu, M. Abinaya, K. S. Hariesh, K. Madhankumar, and V. Pavithra, "A Review on Heart Disease Prediction using Machine Learning and Data Analytics Approach," *International Journal of Computer Applications*, vol. 181, no. 18, pp. 20–25, Sep. 2018.
- [6] S. D. Mackowiak et al., "Extensive identification and analysis of conserved small ORFs in animals," *Genome Biology*, vol. 16, p. 179, Sep. 2015, doi: 10.1186/s13059-015-0742-x.
- [7] L. Kong et al., "CPC: assess the protein-coding potential of transcripts using sequence features and support vector machine," *Nucleic Acids Research*, vol. 35, no. Web Server issue, pp. W345–W349, Jul. 2007, doi: 10.1093/nar/gkm391.
- [8] A. Richardson, B. M. Signor, B. A. Lidbury, and T. Badrick, "Clinical chemistry in higher dimensions: Machine-learning and enhanced prediction from routine clinical chemistry data," *Clinical Biochemistry*, vol. 49, no. 16, pp. 1213–1220, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.clinbiochem.2016.07.013.
- [9] J. Wildenhain et al., "Prediction of Synergism from Chemical-Genetic Interactions by Machine Learning," *Cell Systems*, vol. 1, no. 6, pp. 383–395, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cels.2015.12.003.
- [10] J. Kang, R. Schwartz, J. Flickinger, and S. Beriwal, "Machine Learning Approaches for Predicting Radiation Therapy Outcomes: A Clinician's Perspective," *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, vol. 93, no. 5, pp. 1127–1135, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ijrobp.2015.07.2286.
- [11] H. Asadi, R. Dowling, B. Yan, and P. Mitchell, "Machine Learning for Outcome Prediction of Acute Ischemic Stroke Post Intra-Arterial Therapy," *PLOS ONE*, vol. 9, no. 2, p. e88225, Feb. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0088225.
- [12] A. Aybar-Ruiz et al., "A novel Grouping Genetic Algorithm–Extreme Learning Machine approach for global solar radiation prediction from numerical weather models inputs," *Solar Energy*, vol. 132, pp. 129–142, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.015.
- [13] J. Rhee and J. Im, "Meteorological drought forecasting for ungauged areas based on machine learning: Using long-range climate forecast and remote sensing data," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 237–238, pp. 105–122, May 2017, doi: 10.1016/j.agrformet.2017.02.011.
- [14] S. Cramer, M. Kampouridis, A. A. Freitas, and A. K. Alexandridis, "An extensive evaluation of seven machine learning methods for rainfall prediction in weather derivatives," *Expert Systems with Applications*, vol. 85, pp. 169–181, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.eswa.2017.05.029.
- [15] K. Takahashi, K. Kim, T. Ogata, and S. Sugano, "Tool-body assimilation model considering grasping motion through deep learning," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 91, pp. 115–127, May 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.01.002.
- [16] C. Zhou et al., "Near infrared computer vision and neuro-fuzzy model-based feeding decision system for fish in aquaculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 146, pp. 114–124, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.02.006.
- [17] X. A. López-Cortés et al., "Fast detection of pathogens in salmon farming industry," *Aquaculture*, vol. 470, pp. 17–24, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.aquaculture.2016.12.008.
- [18] A. L. Samuel, "Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 3, no. 3, pp. 210–229, Jul. 1959, doi: 10.1147/rd.33.0210.
- [19] T. M. Mitchell, *Machine Learning*, New York: McGraw-Hill, 1997, in McGraw-Hill Series in Computer Science.
- [20] K. Liakos, P. Busato, D. Moshou, S. Pearson, and D. Bochtis, "Machine Learning in Agriculture: A Review,"

Sensors, vol. 18, no. 8, p. 2674, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18082674.

- [21] "What is Machine Learning?" IBM. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/machine-learning>. [Accessed March 5, 2024].
- [22] D. Sharma and N. Kumar, "A Review on Machine Learning Algorithms, Tasks and Applications," 2017, vol. 6, pp. 2278–1323, Oct. 2017.
- [23] M. T. J. P., "Models for machine learning," *IBM Developer*, Dec. 5, 2017. [Online]. Available: <https://developer.ibm.com/articles/cc-models-machine-learning/#reinforcement-learning>. [Accessed December 20, 2023].
- [24] S. N. Peter Russell, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Englewood Cliffs, N.J, 1995.
- [25] W. A. Belson, "Matching and Prediction on the Principle of Biological Classification," *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, vol. 8, no. 2, pp. 65–75, 1959, doi: 10.2307/2985543.
- [26] L. Breiman, *Classification and Regression Trees*, Routledge, 2017.
- [27] J. R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann, 1993.
- [28] "What is Unsupervised Learning?" IBM. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/unsupervised-learning>. [Accessed November 29, 2023].
- [29] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, Sep. 1995, doi: 10.1007/BF00994018.
- [30] C.-C. Chang and C.-J. Lin, "LIBSVM: A library for support vector machines," *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 2, no. 3, p. 27:1-27:27, May 2011, doi: 10.1145/1961189.1961199.
- [31] J. A. K. Suykens and J. Vandewalle, "Least Squares Support Vector Machine Classifiers," *Neural Processing Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 293–300, Jun. 1999, doi: 10.1023/A:1018628609742.
- [32] A. Smola et al., "Regression Estimation with Support Vector Learning Machines," 1996.
- [33] R. K. H. Galvão et al., "A variable elimination method to improve the parsimony of MLR models using the successive projections algorithm," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 92, no. 1, pp. 83–91, May 2008, doi: 10.1016/j.chemolab.2007.12.004.
- [34] B. Liu, M. Ma, and J. Chang, Eds., *Information Computing and Applications*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7473, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-34062-8.
- [35] R. García, J. Aguilar, M. Toro, A. Pinto, and P. Rodríguez, "A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 179, p. 105826, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105826.
- [36] L. Benos, A. C. Tagarakis, G. Dolias, R. Berruto, D. Kateris, and D. Bochtis, "Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated Review," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3758, May 2021, doi: 10.3390/s21113758.
- [37] A. I. Awad, "From classical methods to animal biometrics: A review on cattle identification and tracking," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 123, pp. 423–435, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.compag.2016.03.014.
- [38] D. Berckmans and M. Guarino, "From the Editors: Precision livestock farming for the global livestock sector," *Animal Frontiers*, vol. 7, no. 1, pp. 4–5, Jan. 2017,
- [39] Z. Feiyang, H. Yueming, C. Liancheng, G. Lihong, D. Wenjie, and W. Lu, "Monitoring behavior of poultry based on RFID radio frequency network," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 9, no. 6, Dec. 2016, doi: 10.25165/ijabe.v9i6.1568.
- [40] H. Hogeveen, W. Steeneveld, and C. A. Wolf, "Production Diseases Reduce the Efficiency of Dairy Production: A Review of the Results, Methods, and Approaches Regarding the Economics of Mastitis," *Annual Review of Resource Economics*, vol. 11, pp. 289–312, 2019, doi: 10.1146/annurev-resource-100518-093954.
- [41] S. De Vliegher, L. K. Fox, S. Piepers, S. McDougall, and H. W. Barkema, "Invited review: Mastitis in dairy heifers: Nature of the disease, potential impact, prevention, and control," *Journal of Dairy Science*, vol. 95, no. 3, pp. 1025–1040, Mar. 2012, doi: 10.3168/jds.2010-4074.
- [42] Y. Wang, Q. Li, M. Chu, X. Kang, and G. Liu, "Application of infrared thermography and machine learning techniques in cattle health assessments: A review," *Biosystems Engineering*, vol. 230, pp. 361–387, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2023.05.002.
- [43] C. J. Sanford et al., "Test characteristics from latent-class models of the California Mastitis Test," *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 77, no. 1, pp. 96–108, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.prevetmed.2006.06.006.
- [44] P. L. Ruegg, "A 100-Year Review: Mastitis detection, management, and prevention," *Journal of Dairy Science*, vol. 100, no. 12, pp. 10381–10397, Dec. 2017, doi: 10.3168/jds.2017-13023.

- [45] D. Cavero, K.-H. Tölle, C. Henze, C. Buxadé, and J. Krieter, "Mastitis detection in dairy cows by application of neural networks," *Livestock Science*, vol. 114, no. 2, pp. 280–286, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.livsci.2007.05.012.
- [46] C. Kamphuis, H. Mollenhorst, J. A. P. Heesterbeek, and H. Hogeveen, "Detection of clinical mastitis with sensor data from automatic milking systems is improved by using decision-tree induction," *Journal of Dairy Science*, vol. 93, no. 8, pp. 3616–3627, Aug. 2010, doi: 10.3168/jds.2010-3228.
- [47] S. A. Naqvi, M. T. M. King, R. D. Matson, T. J. DeVries, R. Deardon, and H. W. Barkema, "Mastitis detection with recurrent neural networks in farms using automated milking systems," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 192, p. 106618, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2021.106618.
- [48] H. Motohashi, H. Ohwada, and C. Kubota, "Early Detection Method for Subclinical Mastitis in Auto Milking Systems Using Machine Learning," in *2020 IEEE 19th International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCC)*, Sep. 2020, pp. 76–83, doi: 10.1109/ICCC50026.2020.9450258.
- [49] S. Ankinakatte, E. Norberg, P. Løvendahl, D. Edwards, and S. Højsgaard, "Predicting mastitis in dairy cows using neural networks and generalized additive models: A comparison," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 99, pp. 1–6, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.compag.2013.08.024.
- [50] Y. Wang, X. Kang, Z. He, Y. Feng, and G. Liu, "Accurate detection of dairy cow mastitis with deep learning technology: a new and comprehensive detection method based on infrared thermal images," *animal*, vol. 16, no. 10, p. 100646, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.animal.2022.100646.
- [51] L. Fadul-Pacheco, H. Delgado, and V. E. Cabrera, "Exploring machine learning algorithms for early prediction of clinical mastitis," **International Dairy Journal**, vol. 119, p. 105051, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.idairyj.2021.105051.
- [52] M. Khatun et al., "Development of a new clinical mastitis detection method for automatic milking systems," *Journal of Dairy Science*, vol. 101, no. 10, pp. 9385–9395, Oct. 2018, doi: 10.3168/jds.2017-14310.
- [53] C. Foditsch et al., "Lameness Prevalence and Risk Factors in Large Dairy Farms in Upstate New York. Model Development for the Prediction of Claw Horn Disruption Lesions," *PLOS ONE*, vol. 11, no. 1, p. e0146718, Jan. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0146718.
- [54] F. C. Flower and D. M. Weary, "Gait assessment in dairy cattle," *Animal*, vol. 3, no. 1, pp. 87–95, Jan. 2009, doi: 10.1017/S1751731108003194.
- [55] L. Ózsvári, "Economic Cost of Lameness in Dairy Cattle Herds," *Journal of Dairy, Veterinary & Animal Research*, vol. 6, p. 00176, Dec. 2017, doi: 10.15406/jdvar.2017.06.00176.
- [56] E. Cha, J. A. Hertl, D. Bar, and Y. T. Gröhn, "The cost of different types of lameness in dairy cows calculated by dynamic programming," *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 97, no. 1, pp. 1–8, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.prevetmed.2010.07.011.
- [57] N. Volkmann, B. Kulig, S. Hoppe, J. Stracke, O. Hensel, and N. Kemper, "On-farm detection of claw lesions in dairy cows based on acoustic analyses and machine learning," *Journal of Dairy Science*, vol. 104, no. 5, pp. 5921–5931, May 2021, doi: 10.3168/jds.2020-19206.
- [58] S. Shahinfar, M. Khansefid, M. Haile-Mariam, and J. E. Pryce, "Machine learning approaches for the prediction of lameness in dairy cows," *Animal*, vol. 15, no. 11, p. 100391, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.animal.2021.100391.
- [59] D. Warner, E. Vasseur, D. M. Lefebvre, and R. Lacroix, "A machine learning based decision aid for lameness in dairy herds using farm-based records," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 169, p. 105193, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2019.105193.
- [60] F. Mavrot, H. Hertzberg, and P. Torgerson, "Effect of gastro-intestinal nematode infection on sheep performance: A systematic review and meta-analysis," *Parasites & Vectors*, vol. 8, no. 1, p. 557, Dec. 2015, doi: 10.1186/s13071-015-1164-z.
- [61] A. C. de S. Chagas, O. Tupy, I. B. dos Santos, and S. N. Esteves, "Economic impact of gastrointestinal nematodes in Morada Nova sheep in Brazil," *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária*, vol. 31, p. e008722, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1590/S1984-29612022044>.
- [62] Montout, A. X., Bamber, R. S., Lange, D. S., Ndlovu, D. Z., Morgan, E. R., Ioannou, C. C.,
- [63] Dowsey, A. W., "Accurate and interpretable prediction of poor health in small ruminants with accelerometers and machine learning," bioRxiv, Aug 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.08.03.234203>.
- [64] Contla Hernández, B., Lopez-Villalobos, N., & Vignes, M. (2021). "Identifying health status in grazing dairy cows from milk mid-infrared spectroscopy by using machine learning methods." *Animals*, 11(8), 2154.
- [65] Neethirajan, S. (2023). "The significance and ethics of digital livestock farming." *AgriEngineering*, 5(1), 488-505.

- [66] Zhang, Y., Wu, M., Tian, G. Y., Zhang, G., & Lu, J. (2021). "Ethics and privacy of artificial intelligence: Understandings from bibliometrics." *Knowledge-Based Systems*, 222, 106994.
- [67] Secinaro, S., Calandra, D., Secinaro, A., Muthurangu, V., & Biancone, P. (2021). "The role of artificial intelligence in healthcare: a structured literature review." *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 21, 1-23.
- [68] Kumar, Y., Koul, A., Singla, R., & Ijaz, M. F. (2023). "Artificial intelligence in disease diagnosis: a systematic literature review, synthesizing framework and future research agenda." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(7), 8459-8486.
- [69] Taneja, M., Byabazaire, J., Jalodia, N., Davy, A., Olariu, C., & Malone, P. (2020). "Machine learning based fog computing assisted data-driven approach for early lameness detection in dairy cattle." *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105286>.
- [70] Wagner, N., Antoine, V., Mialon, M.-M., Lardy, R., Silberberg, M., et al. (2020). "Machine learning to detect behavioural anomalies in dairy cows under subacute ruminal acidosis." *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105233. doi: [10.1016/j.compag.2020.105233](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105233).
- [71] Lake, B., Getahun, F., & Teshome, F. T. (2022). "Application of artificial intelligence algorithm in image processing for cattle disease diagnosis." *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 14(4), 71-88.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

MVV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

YMG ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Synthesis and characterization of methyl methacrylate - glycerol hydrogels by polymerization in acid medium

Síntesis y caracterización de hidrogeles de glicerol-metacrilato obtenido por polimerización en medio ácido

Síntese e caraterização de hidrogéis de glicerol-metacrilato obtidos por polimerização em meio ácido

Laura Trujillo-Vargas^{1(*)}

Recibido: 24/04/2024

Aceptado: 09/10/2024

Summary. - Hydrogels were prepared from methyl methacrylate, glycerol, and sulfuric or citric acid. A novel route for the synthesis of crosslinked materials using unconventional initiators was evaluated using a 23 factorial experimental design. Effects of independent variables (polymerization time, type, and acid concentration) were statistically analyzed through ANOVA. The synthesis route includes condensation, free-radical and transesterification reactions with modifications of the polymer chemical properties such as the formation of a crosslinking polyester with polymethylmethacrylate (PMMA) and improvement of the mechanical and thermal properties of the hydrogel. A polymerization time of 4-hour produced the highest amount of material when 1.37 g sulfuric acid was used and 3.46 g when citric acid was added. The polymer synthesized with citric acid has a swelling rate up to 214.6%, compared with the materials produced with sulfuric acid that reach up to 31.3% of water absorption.

Keywords: Poly (methyl methacrylate); Glycerol; Sulfuric acid; Citric acid; Cross Linking.

(*) Corresponding Author

¹ Docente Investigador Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia (Colombia), lauramtrujillov@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9998-5916>

Resumen. - Los hidrogeles fueron preparados empleando metil metacrilato, glicerol y ácido sulfúrico o cítrico. Una ruta novedosa para la síntesis de materiales entrecruzados empleando iniciadores no convencionales fue evaluada empleando un diseño experimental tipo factorial 23. Los efectos de las variables independientes (tiempo de polimerización, tipo y concentración de ácido) fue evaluado estadísticamente empleando ANOVA. La ruta de síntesis incluye condensación, radical libre y reacciones de transesterificación con modificaciones de las propiedades químicas del polímero, como la formación de un poliéster entrecruzado con polimetilmetacrilato (PMMA) y mejoras en las propiedades mecánicas y térmicas del hidrogel. Un tiempo de polimerización de 4 horas produjo la mayor cantidad de material: 1.37 g cuando ácido sulfúrico fue empleado y 3.46 g cuando ácido cítrico fue adicionado. El polímero sintetizado con ácido cítrico alcanzó una tasa de absorción de agua del 214.6%, comparado con los materiales producidos con ácido sulfúrico que alcanzan hasta el 31.3% de absorción de agua.

Palabras clave: Poli (metil metacrilato), Glicerol, Ácido sulfúrico, Ácido cítrico, Entrecruzamiento.

Resumo. - Os hidrogéis foram preparados utilizando metacrilato de metilo, glicerol e ácido sulfúrico ou cítrico. Uma nova rota para a síntese de materiais reticulados usando iniciadores não convencionais foi avaliada usando um desenho experimental fatorial 23. Os efeitos das variáveis independentes (tempo de polimerização, tipo e concentração de ácido) foram avaliados estatisticamente usando ANOVA. A rota de síntese inclui reações de condensação, radicais livres e transesterificação com modificações das propriedades químicas do polímero, tais como a formação de um poliéster reticulado com polimetilmetacrilato (PMMA) e melhorias nas propriedades mecânicas e térmicas do hidrogel. Um tempo de polimerização de 4 horas produziu a maior quantidade de material: 1,37 g quando se utilizou ácido sulfúrico e 3,46 g quando se adicionou ácido cítrico. O polímero sintetizado com ácido cítrico atingiu uma taxa de absorção de água de 214,6%, em comparação com os materiais produzidos com ácido sulfúrico que atingiram até 31,3% de absorção de água.

Palavras-chave: Poli (metacrilato de metilo), Glicerol, Ácido sulfúrico, Ácido cítrico, Reticulação.

1. Introduction. - Hydrogels represent three-dimensional polymeric networks adept at retaining significant amounts of water [1] and, this ability stems from the presence of hydrophilic groups attached to the polymeric chains [2]. They are categorized as either physical or chemical, depending on the nature of their crosslinking [3]. Physical hydrogels rely on electrostatic forces or hydrogen bonding between polymer chains, which can be altered by changes in environmental conditions [4]. Chemical crosslinking involves reactions that often necessitate catalysts or photoinitiators to enhance mechanical strength while potentially compromising material biocompatibility [5].

The crosslinked polymers are typically produced through polymerization or copolymerization of suitable monomers and crosslinking agents, employing free radical polymerization, condensation, or transesterification reactions. Various physical properties, such as swelling capacity and surface characteristics, can be tailored based on the degree of crosslinking and the network formation process. Free radical polymerization, employing chemical initiators [6], biocatalysts [7], or UV light [8], stands out as the predominant method for synthesizing hydrogels from polymethyl methacrylate (PMMA). The polymer configuration is contingent upon the ionization degree of the reaction medium.

Common crosslinking agents for PMMA include ethylene glycol dimethacrylate (EGDM) [9] and trimethylolpropane triacrylate (TMPTMA) [10], with glycerol remaining relatively underexplored. Glycerol, or propane-1,2,3-triol, garners significant attention in polymer production due to its versatility in yielding diverse polymers with distinct swelling properties and the capacity to form intricate three-dimensional structures [11], [12], [13], [14]. With its three hydrophilic hydroxyl groups capable of intra- and intermolecular hydrogen bonding [15], glycerol exhibits water solubility and a hygroscopic nature, enabling selective manipulation of functional groups to facilitate polymerization using various monomers [11]. In reactions with PMMA, glycerol's hydroxyl groups condense with the acrylate, yielding a network structure suitable for slow-release applications [7].

Vinyl monomer polymerization with strong inorganic acids like nitric acid, hydrochloric acid, or aqueous sulfuric acid as initiating agents achieves reproducible results without requiring high temperatures [16], [17], UV irradiation, or electro initiation. Researchers have investigated the role of oxygen in vinyl polymerizations [18], [19], [20], attributing its effects to peroxide species formed from monomer and dissolved oxygen (present in monomers and solvents). MMA peroxides produced can include an MMA-Oxygen interpolymer with a terminal hydroperoxide group [16], [19]. This compound decomposes into active radicals by action of sulfuric acid, initiating the polymerization of MMA [16]. The radicals are formed according to a reaction as shown in Eq. 1:



An alternative approach to replacing synthetic agents in polymerization reactions involves utilizing carboxylic acids due to their similar chemical structure and advantageous properties, including their organic nature, wide availability, and biodegradability [21], [22], [23]. These acids often serve as compatibilizing agents, enhancing the mechanical, physical, and thermal properties of the resulting materials [22]. Unlike conventional initiators, different acids offer a route to obtaining crosslinked PMMA with glycerol.

Attempts to polymerize sulfuric acid or citric acid with MMA-glycerol over a 4-hour period at room temperature did not yield any products [16]. However, a combination of radical, condensation, and transesterification polymerization pathways could lead to the formation of crosslinked material when acids, glycerol, and MMA are mixed at suitable ratios and temperatures. This study focuses on developing hydrogels from various acids mixed with an MMA-glycerol complex using a two-step polymerization process: (1) PMMA production and (2) crosslinking with glycerol. The effects of acid source, concentration, and reaction time on the resulting polymer were investigated using a 2³ factorial experimental design, with the swelling rate of the material also examined.

Thus, this research presents a novel PMMA material crosslinked with glycerol using either a strong inorganic acid or a carboxylic acid, offering potential applications as a vehicle in slow-release systems.

2 Materials and methods

2.1 Reagents. - Glycerol (> 99%), citric acid (50%)-CA, sulfuric acid (50%)-SA, hydrochloric acid (1N), methanol (> 99.9%), Sodium hydroxide (> 97%) and methyl methacrylate (MMA, > 99%) were purchased from Merck. MMA was purified before use by washing with 10% NaOH solution. Deionized water was obtained from a Synergy® purification system (Merck).

2.2 Synthesis of PMMAG hydrogel. - The polymerization conditions were established based on previous investigations [16], [23], [24]. Evaluation of polymerization time, type and acid concentration were made by duplicate using a 2³ factorial design, where the response variable was the amount of material produced, as shown in Table I and II.

MMA:glycerol ratio was 3:1 for all experiments. Synthesis with SA was carried out in a single stage; while polymerization using CA was made in two stages: First, CA is mixed with glycerol and 0.5% HCl for 1-hour; then, MMA is added, and polymerization time is evaluated. For both experiments, magnetic stirring (250 rpm), temperature control (85 °C) and water reflux system were used. The polymers obtained were washed with methanol and immersed in deionized water for 24-hour to remove excess monomer. Then, the material was dried in an oven at a temperature below 40 °C until stable weight.

Effect	Level	
	Low	High
Acid type	Citric -CA	Sulfuric-SA
Time (h)	2.0	4.0
Acid concentration (%)	0.5	1.0

Table I. Experimental conditions

Run	Acid type	Time (h)	Acid concentration (%)	Material (g)
1	SA	2	0.5	0.72
2	CA	2	0.5	0.00
3	SA	4	0.5	1.25
4	CA	4	0.5	3.02
5	SA	2	1.0	0.85
6	CA	2	1.0	0.00
7	SA	4	1.0	1.37
8	CA	4	1.0	3.46

Table 2. Experimental 2³ factorial design, with results

The statistical software Statgraphics Centurion XVII was used to evaluate the designs of experiments proposed in the document, as well as the statistical parameters, using the analysis of variance (ANOVA) based on *p-value* with a confidence level of 95%.

2.3 Characterization of synthesized hydrogels. - Infrared spectroscopy analyses were performed according to [25], using an FTIR spectrometer (Nicolet 6700 Series) equipped with a single-reflection ATR and a type IIA diamond crystal mounted in tungsten carbide. The diamond ATR had a sampling area of approximately 0.5 mm², where a consistent reproducible pressure was applied to every sample. The infrared spectra were collected at a 4 cm⁻¹ resolution over 128 scans. Scanning electron microscope (SEM) images of the surface morphology were collected using a Hitachi TM-3030 operated at 15 kV. The sample was gold coated and carbon tape support was used during imaging. Thermogravimetric analysis (TGA) was recorded on a Netzsch 209 FI IRIS analyzer at 10 °C min⁻¹ heating rate and nitrogen atmosphere, using 10 mg of sample. Differential scanning calorimetry (DSC) was carried on a Netzsch DSC 204F1 Phoenix at 5 °C min⁻¹ heating rate and nitrogen atmosphere.

2.4 Liquid uptake behavior of the hydrogel. - A dry, pre-weighed hydrogel was placed in deionized water at room temperature. The weight of the hydrating sample was measured for 300 minutes at 60-minute intervals after removing the excess water by gentle blotting. The water uptake percentage was calculated as Eq. 2.

$$P_s = \frac{W_s - W_d}{W_s} \quad (2)$$

where W_s and W_d are weights of swelled and dry samples, respectively.

3 Results and discussion

3.1 Effect of reaction parameters. - Preliminary experiments were carried out to determine the minimum acid concentration and time to produce the polymeric material. The analysis of variance (ANOVA) based on the *p-value* with a confidence level of 95% as shown in the Table III. The statistically significant parameter ($P < 0.05$) on the amount of material produced was time, inducing the formation of polymer chains with reduction of the reagents included in the polymerization process.

Effect	SS	df	MS	p-value
A: Acid type	0.66	1	0.66	0.1235
B: Time	7.09	1	7.09	0.0380
C: Acid concentration	0.06	1	0.06	0.3679
AB	3.69	1	3.69	0.0526
AC	0.01	1	0.01	0.7457
BC	0.02	1	0.02	0.5145
Total error	0.03	1	0.03	
Total	11.5	7		

SS = sequential sums of squares; df = degree of freedom; MS = adjusted mean square.

Table III. ANOVA summary of 2^3 factorial design to the production of polymeric material using acid medium

In the case of SA, heightened acid concentration fosters the formation of a monomer-acid complex characterized by hydrogen bonding, typically initiated at sites exhibiting the greatest surplus of negative charges [26]. The crosslinked structure emerges when favorable configurations arise due to these hydrogen bonds: the initiator radical abstracts hydrogen from adjacent carbons near multiple bonds, thereby instigating polymer chain growth. Polymerizations involving MMA and strong inorganic acids have been documented [16], leading to increased solution viscosity and eventual gelation. The proposed reaction mechanism for PMMA synthesis using SA is depicted in Figure I.

During the reaction, two primary products emerge: the synthesis of PMMA and glycerol, which undergoes a competitive dehydration process via a radical mechanism. This process yields allyl alcohol and triggers the cleavage of bonds to produce acetaldehyde and formaldehyde [15].

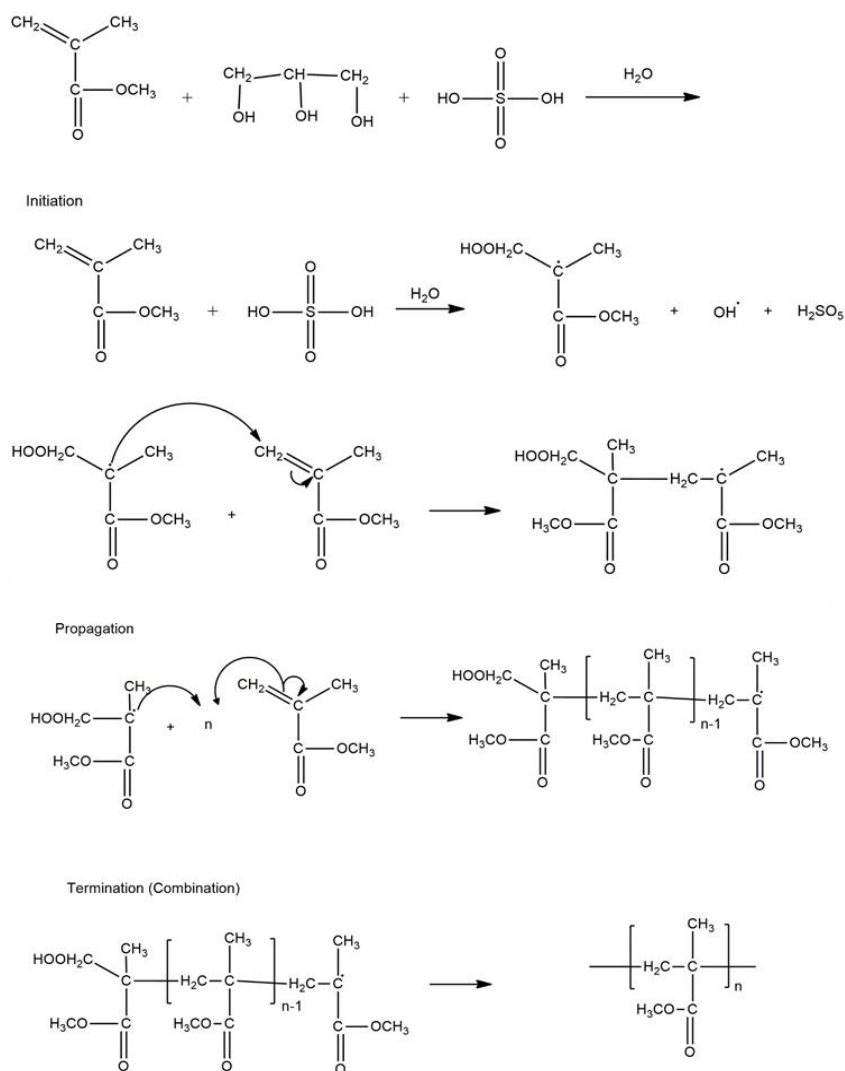


Figure I. Possible reaction mechanism to obtain PMMA using SA.

Citric acid (CA) was chosen as a polyfunctional reagent due to its non-toxic nature and metabolic production by microorganisms. It serves as a crosslinking agent by facilitating hydrogen bond interactions within a polymeric network [27]. Glycerol was selected as a trifunctional monomer to enhance the hydrogel's properties, leveraging its flexibility and absorption characteristics. Hydrochloric acid (HCl) was employed to introduce an excess of protons and activate carbonation, initiating the polymerization reaction. The addition of CA to the MMA-glycerol mixture at temperatures ranging between 22-30 °C for a 4-hour duration did not induce polymerization. However, employing a radical/condensation/transesterification polymerization approach resulted in the formation of a physically crosslinked material when glycerol and CA were added in a suitable ratio to MMA at temperatures exceeding 60 °C. Figure II elucidate the proposed reaction mechanism and, structurally, the material derived from CA comprises primary chains of PMMA, side chains originating from crosslinking with glycerol-citrate, and residual components such as monomer, glycerol, and unreacted CA. The network's structure and chemical composition play pivotal roles in determining the material's properties.

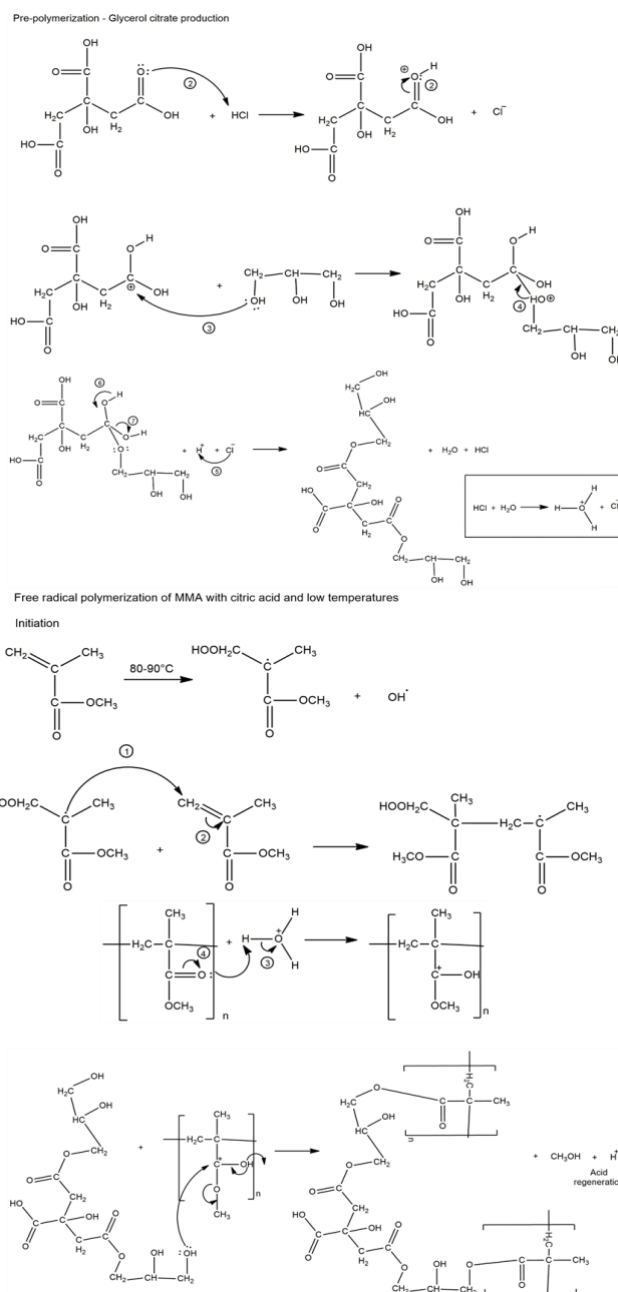


Figure II. Possible reaction mechanism to obtain crosslinking glycerol citrate- PMMA using AC.

When the polymerization process with SA or CA does not have enough reaction time, it is likely to obtain a different configuration because the formation of hydrogen bonds that crosslink intermolecular carboxyl groups does not occur [23]. The effectiveness of crosslinking in the polymerization process indicates that the main route for crosslinking between macromolecules is associated with the chain sequence of the addition reaction between macro radicals [28]. The ideal conditions to produce material suggested by the software are shown in Table IV: 1% CA and 4-hour process, can produce 3.4 g of crosslinked material from MMA and glycerol.

Effect	Low	High	Ideal
Acid type	SA	CA	CA
Time (h)	2.0	4.0	4.0
Acid concentration (%)	0.5	1.0	1.0
Amount of material produced at ideal parameters 3.40 g			

Table IV. Ideal values of polymeric material process variables

3.2 Characterization of synthesized hydrogels. - The FTIR spectra of the samples obtained with SA, CA and different reaction parameters are like those reported in the literature for PMMA [29] with changes due to reaction mechanism and the presence of glycerol in the reaction. When working with CA, the 2-hour process produced nonpolymeric structure; thus, only the 4-hour samples were evaluated (Figure III).

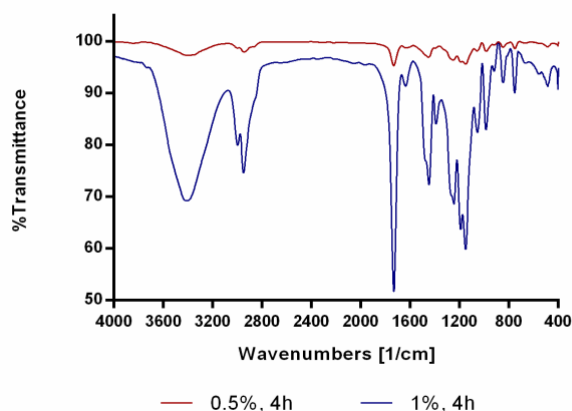


Figure III. FTIR spectra of polymeric material obtained with different concentrations of CA and 4-hour process.

In the materials obtained with 0.5% CA, the difference in the bands confirms the importance of the concentration of acid in the formation of glycerol-citrate. Bands at 2949 and 1446 cm^{-1} show the stretching and flexing vibration of the CH_2 group, respectively. At 3406 cm^{-1} indicates the presence of an OH group of glycerol and its decrease suggests the formation of the ester, confirmed with the band due to stretching $\text{C}=\text{O}$ at 1732 cm^{-1} , as well as signs of $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ stretching at 1054 cm^{-1} . When 0.5% CA was used, higher production of glycerol-citrate was complete without achieving adequate crosslinking with the PMMA chains.

In the samples obtained using SA (Figure IV), the band located at 2992 cm^{-1} belongs to the stretching vibration of $\text{O}-\text{CH}_3$ and CH , 2949 cm^{-1} to the stretching vibration of $\text{C}-\text{CH}_3$ and CH , 1729 cm^{-1} to the stretching vibration of the $\text{C}=\text{O}$ of the polymer and compounds formed in the dehydration of glycerol, 1447 cm^{-1} to the flexion of $\text{O}-\text{CH}_3$, 1260-1040 cm^{-1} to the vibration of the $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ bond, that is characteristic of PMMA samples [30].

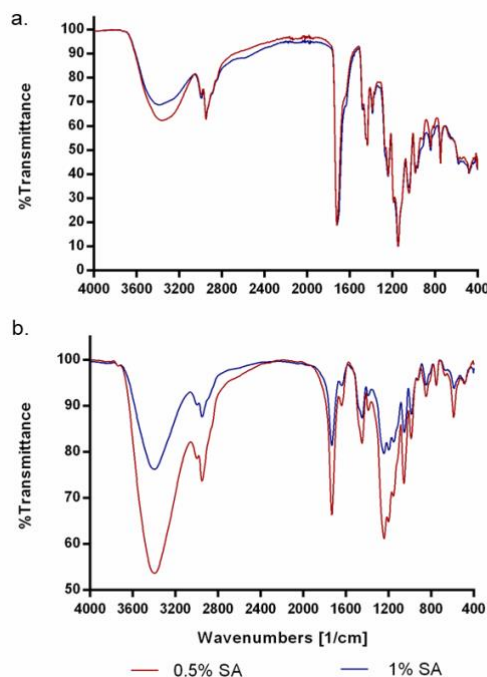


Figure IV. FTIR spectra of polymeric material obtained with different concentrations of SA and a. 2-hour and b. 4-hour.

The band located near to 3395 cm^{-1} is due to the OH stretch of glycerol, showing the presence of different amounts of residual glycerol within the polymer network. Concentration of the acid affects the dehydration process of glycerol since a weak incorporation of glycerol was noticed in the samples obtained with 1% SA compared to the ones with 0.5% SA. In the samples obtained with different acids, the presence of the band between $1719\text{--}1732\text{ cm}^{-1}$ is related to the stretching of the acrylate of the material and it is dependent on the type of acid included in the process. The polymer contains residual reagents, as the band corresponding to $1641\text{--}1637\text{ cm}^{-1}$ C-C of the MMA is characteristic of the monomer, and the band of $1146\text{--}1153\text{ cm}^{-1}$ evidence unreacted glycerol. These results are described in previous studies for materials obtained from glycerol [35] or MMA with different polymerization mechanisms [31], [32].

The surface of the polymer changes according to the process conditions: different profiles are observed when CA is used. Some irregular pores are observed on the rough area of the material with 0.5% CA (Figure Va). Researchers established that the presence of pores on the surface is an ideal characteristic in the application of polymers with a similar structure as those obtained from CA-Glycerol, due to these pores increment the area of the network, developing contact points between the hydrophilic and solvent chains, facilitating the entry and absorption of liquids within the polymer matrix. Also have a smooth laminar appearance (Figure Vb) with granules on the surface, attributable to reaction residues of CA.

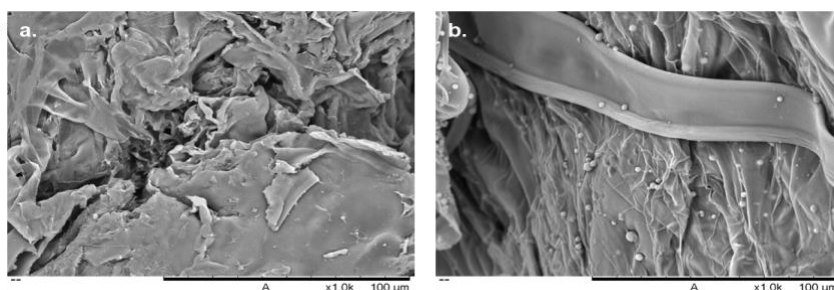


Figure V. SEM images of the samples obtained with 4-hour and CA: a. 0.5%; b. 1%.

In materials obtained from 0.5% SA and 2-hour, there is an association between the spherical shapes and the agglutination which could have formed during the polymerization process (Figure VIa). A fibrous material with irregular structure was obtained from 1% SA and 2-hour reaction (Figure VIc); in contrast, a different polymer was obtained with the same concentration of acid over a 4-hour reaction, which has a network structure attributed to dissolved oxygen in the solution that modifies the assemble of the pores during polymerization (Figure VIb). Results suggest that the acid concentration and synthesis time directly affect the appearance of the material polymeric network.

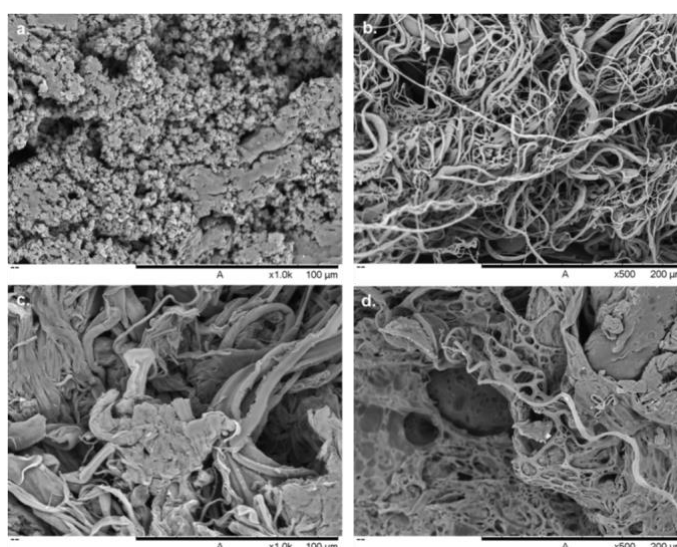


Figure VI. SEM images of the material obtained using SA. a. 0,5%, 2-hour; b. 0,5%, 4-hour; c. 1%, 2-hour; d. 1% 4-hour.

Figure VII shows the TGA and DTG curves for the polymers produced with different polymerization conditions. In Table 5, residual mass, T_d and T_g glass of the polymers obtained are reported. The exact values of the residual mass at the different temperatures were determined from the DTG curve of the polymers produced in 4-hour varying the type and acid concentration.

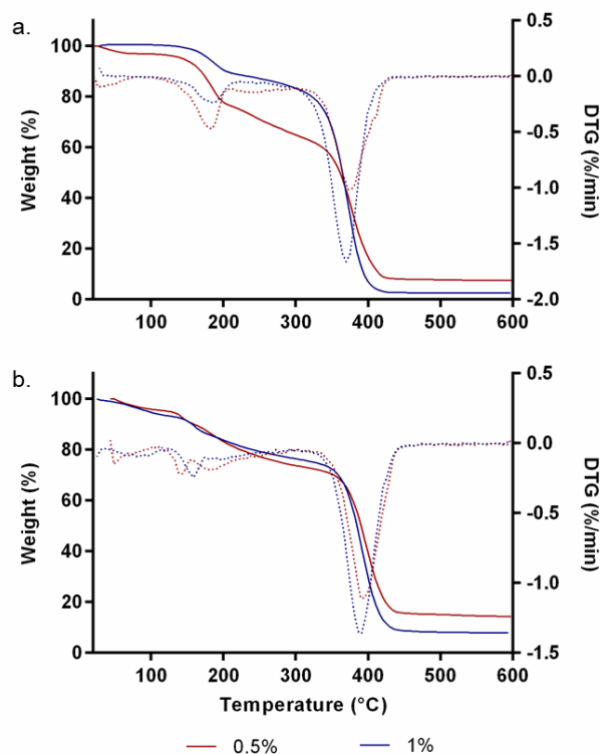


Figure VII. Thermogravimetric analysis for material obtained with different types of acids varying concentration and 4-hour of polymerization: a. CA; b. SA.

Sample	T_d (°C)	Residual mass (%)					T_g (°C)
		150	250	350	450	>500	
CA 0,5%	376.8	94.2	71.2	55.1	8.04	7.59	110.5
CA 1%	369.60	98.9	87.0	67.7	2.73	2.55	118.2
SA 0.5%	389.75	90.8	77.1	70.32	15.73	14.53	163.1
SA 1%	391.12	90.6	79.1	72.0	8.70	7.95	148.3

Table 5. Thermal behavior of the synthesized material with different operational conditions and 4-hour of polymerization.

Thermal decomposition of the samples obtained with SA or CA follow two stages. In the first stage, up to 16% of the sample was decomposed due to the vaporization and degradation of glycerol, and the remaining unreacted monomer. In the second stage, 80% of the samples with SA decomposed between 390–450°C; whereas the polymer obtained with CA breaking down between 369–434°C, this related to the decomposition of the principal polymeric chains and the crosslinked structure (Table 1). Decomposition percentage during the first stage indicates that a higher amount of glycerol-citrate is crosslinked in the polymer network when 0.5% CA mixture is added to the reaction.

Mass loss is the main difference among TGA curves, this indicates the effect of type and acid concentration to initiate the polymerization process. This variation modifies the molecular weight, the end groups of the chain [33], and the degree of crosslinking achieved by glycerol-citrate affecting the rate of thermal decomposition observed in each degradation stage (Figure VII). The polymer obtained with 0.5% SA has higher thermal stability than the other samples due to a relatively larger volume and increased distance between the cross-linked bonds in the polymer chains. The

complete degradation of the linear PMMA is close to 450°C [34], while the obtained material decomposes after 500°C where there are residues of the polymer (Figure VII); this proves enhanced thermal stability of the synthesized crosslinked material.

T_g was 148.3°C in samples with 1% SA with a thermal stability lower than material with 0.5% SA, which reached T_g of 163°C. Polymers produced with 1% CA reported higher T_g, 118.29°C. A possible explanation of the thermal stability observed in the synthesized materials is the formation of a crosslinking network that affects the mobility of the macromolecule, decreasing the probability of a change in the conformation, and increasing the glass transition temperature of the materials.

Swelling capacity can be determined by the amount of space available within the polymer network to accommodate the solvents [35]. Polymer-solvent interaction forces define the water retention capacity [36]. Swelling speed of the sample depends on the chemical nature of the sample and the functions along the polymer chain, achieving different types of crosslinked bonds (covalent, ionic, or physical) [37]. The process of cross-linking is performed by controlling variables such as temperature, type and amount of crosslinking agent, and external factors such as oxygen, presence of water and others [38]. Evidence of crosslinks is related to the swelling of the polymer matrix when it contacts a solvent. Samples required up to 300 min to stabilize water absorption and maintain constant weight. None showed fragmentation or loss of material when it reached the maximum swelling capacity.

Figure VIII shows the swelling behavior of the obtained polymers. Samples produced with SA reached up to 33.13% of water absorption, in contrast, samples with 0.5% CA, reached up to 215.85%. Materials with 1% CA and different times achieved similar results of swelling capacity, confirming the affinity between the polymer and the solvent. In the case of the polymer obtained with 0.5% CA, reaction time affects the amount of material produced and its further physical behavior, indicating that swelling capacity is related to the formation of crosslinked bonds between the polymer chains.

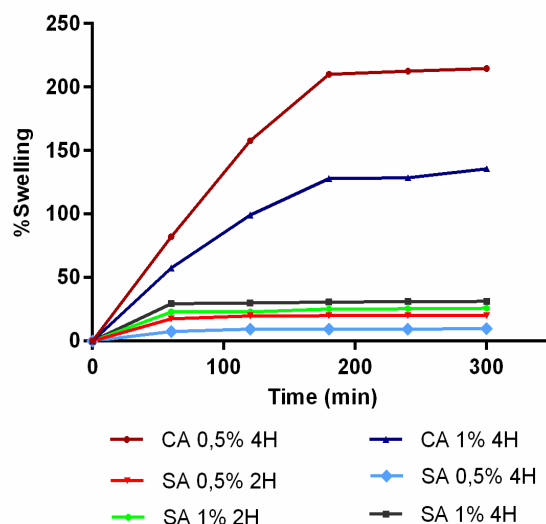


Figure VIII. Swelling behavior of cross-linked polymer, using different acids and polymerization time.

Data indicate that low concentrations of CA and 4-hour of polymerization result in a crosslinking of the monomer with glycerol that produces a better water absorption, compared to the material obtained with 1% of CA and different polymerization time. Presence of SA leads to formation of more free radicals to induce the formation of PMMA, without achieving enough crosslinking with glycerol that stimulates water retention in the material.

4 Conclusions. - The polymerization processes that include MMA, glycerol, and commercial acids such as sulfuric acid or citric acid can produce polymers with different characteristics due to variations of operational conditions. In polymers obtained with CA, a glycerol-citrate pre-polymer was formed and then cross-linked with the developed

PMMA, exhibiting modification of the thermal and mechanical properties when compared with those obtained with SA that have higher thermal stability. Surface of the sample with SA shows branched structures and some pores formed by the oxygen involved in the polymerization process. On the other hand, materials with CA show irregular pores that can facilitate the entry of liquids into the polymer matrix. Glycerol citrate (like the pre-polymer formed in the materials obtained with CA) improves the water absorption properties. Glycerol is a hydrophilic substance that forms three-dimensional structures when it is used to obtain hydrogels, and CA acts as a compatibilizing agent that promotes the union of the formed PMMA chains with the pre-polymer.

References

- [1] N. N. Ferreira, L. M. B. Ferreira, V. M. O. Cardoso, F. I. Boni, A. L. R. Souza, y M. P. D. Gremião, «Recent advances in smart hydrogels for biomedical applications: From self-assembly to functional approaches», *European Polymer Journal*, vol. 99, pp. 117-133, feb. 2018, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2017.12.004.
- [2] T. R. Hoare y D. S. Kohane, «Hydrogels in drug delivery: Progress and challenges», *Polymer*, vol. 49, n.o 8, pp. 1993-2007, abr. 2008, doi: 10.1016/j.polymer.2008.01.027.
- [3] S. Ma, B. Yu, X. Pei, y F. Zhou, «Structural hydrogels», *Polymer*, vol. 98, pp. 516-535, ago. 2016, doi: 10.1016/j.polymer.2016.06.053.
- [4] C. Bilici, D. Karaarslan, S. Ide, y O. Okay, «Toughness improvement and anisotropy in semicrystalline physical hydrogels», *Polymer*, vol. 151, pp. 208-217, ago. 2018, doi: 10.1016/j.polymer.2018.07.077.
- [5] J. L. Gadea, L. C. Cesteros, y I. Katime, «Chemical–physical behavior of hydrogels of poly(vinyl alcohol) and poly(ethylene glycol)», *European Polymer Journal*, vol. 49, n.o 11, pp. 3582-3589, nov. 2013, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2013.07.027.
- [6] H. H. Kim, J. W. Kim, J. Choi, Y. H. Park, y C. S. Ki, «Characterization of silk hydrogel formed with hydrolyzed silk fibroin-methacrylate via photopolymerization», *Polymer*, ago. 2018, doi: 10.1016/j.polymer.2018.08.019.
- [7] L. A. G. Sala, K. M. A. Villanueva, M. T. Chua, y S. Chakraborty, «Novel glycerol crosslinked poly(methyl methacrylate) synthesized by chemo-enzymatic method for controlled release application», *Materials Science and Engineering: C*, vol. 32, n.o 8, pp. 2205-2211, dic. 2012, doi: 10.1016/j.msec.2012.06.001.
- [8] H.-T. Hsieh, H.-M. Chang, W.-J. Lin, Y.-T. Hsu, y F.-D. Mai, «Poly-Methyl Methacrylate/Polyvinyl Alcohol Copolymer Agents Applied on Diabetic Wound Dressing», *Scientific Reports*, vol. 7, n.o 1, dic. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-10193-5.
- [9] L. Yu, L. Yao, J. You, Y. Guo, y L. Yang, «Poly(methyl methacrylate)/poly(ethylene glycol)/poly(ethylene glycol dimethacrylate) micelles: Preparation, characterization, and application as doxorubicin carriers: Article», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, n.o 1, p. n/a-n/a, ene. 2014, doi: 10.1002/app.39623.
- [10] N. D. Sachinvala, R. F. (Redford) Ju, M. H. Litt, y W. P. Niemczura, «Preparation of poly(methyl methacrylate) and copolymers having enhanced thermal stabilities using sucrose-based comonomers and additives», *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, vol. 33, n.o 1, pp. 15-29, ene. 1995, doi: 10.1002/pola.1995.080330103.
- [11] H. Zhang y M. W. Grinstaff, «Recent Advances in Glycerol Polymers: Chemistry and Biomedical Applications», *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 35, n.o 22, pp. 1906-1924, nov. 2014, doi: 10.1002/marc.201400389.
- [12] F. Camara, S. Caillol, y B. Boutevin, «Free radical polymerization study of glycerin carbonate methacrylate for the synthesis of cyclic carbonate functionalized polymers», *European Polymer Journal*, vol. 61, pp. 133-144, dic. 2014, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2014.10.001.
- [13] B. S. Fernandes, J. Carlos Pinto, E. C. M. Cabral-Albuquerque, y R. L. Fialho, «Free-radical polymerization of urea, acrylic acid, and glycerol in aqueous solutions», *Polymer Engineering & Science*, vol. 55, n.o 6, pp. 1219-1229, jun. 2015, doi: 10.1002/pen.24081.
- [14] S. Shi, X. Peng, T. Liu, Y.-N. Chen, C. He, y H. Wang, «Facile preparation of hydrogen-bonded supramolecular polyvinyl alcohol-glycerol gels with excellent thermoplasticity and mechanical properties», *Polymer*, vol. 111, pp. 168-176, feb. 2017, doi: 10.1016/j.polymer.2017.01.051.
- [15] M. Pagliaro y M. Rossi, *The Future of Glycerol: New Usages for a Versatile Raw Material*. en *Green Chemistry Series*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2008. doi: 10.1039/9781847558305.

- [16] G. Pistoia, A. Ricci, y M. A. Voso, «Electroinitiated polymerization of methyl methacrylate in aqueous sulfuric acid», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 20, n.o 9, pp. 2441-2450, sep. 1976, doi: 10.1002/app.1976.070200913.
- [17] M.-M. Wang, H.-F. Wang, D.-Q. Jiang, S.-W. Wang, y X.-P. Yan, «A strong inorganic acid-initiated methacrylate polymerization strategy for room temperature preparation of monolithic columns for capillary electrochromatography», *ELECTROPHORESIS*, vol. 31, n.o 10, pp. 1666-1673, abr. 2010, doi: 10.1002/elps.200900756.
- [18] C. E. Barnes, «Mechanism of Vinyl Polymerization. I. Role of Oxygen», *Journal of the American Chemical Society*, vol. 67, n.o 2, pp. 217-220, feb. 1945, doi: 10.1021/ja01218a023.
- [19] C. E. Barnes, R. M. Eloffson, y G. D. Jones, «Role of Oxygen in Vinyl Polymerization. II. Isolation and Structure of the Peroxides of Vinyl Compounds», *Journal of the American Chemical Society*, vol. 72, n.o 1, pp. 210-215, ene. 1950, doi: 10.1021/ja01157a059.
- [20] C. C. Price, «Mechanism of vinyl polymerizations. IX. Some factors affecting copolymerization», *Journal of Polymer Science*, vol. 1, n.o 2, pp. 83-89, mar. 1946, doi: 10.1002/pol.1946.120010203.
- [21] A. B. Martins, A. K. Cattelan, y R. M. C. Santana, «How the compatibility between polyethylene and thermoplastic starch can be improved by adding organic acids?», *Polymer Bulletin*, vol. 75, n.o 5, pp. 2197-2212, may 2018, doi: 10.1007/s00289-017-2147-3.
- [22] J. B. Olivato, M. V. E. Grossmann, F. Yamashita, D. Eiras, y L. A. Pessan, «Citric acid and maleic anhydride as compatibilizers in starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends by one-step reactive extrusion», *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, n.o 4, pp. 2614-2618, mar. 2012, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.11.035.
- [23] E. A. Bugni, M. G. Lachtermacher, E. E. C. Monteiro, E. B. Mano, y C. G. Overberger, «An unusual reaction polymerization in nitric acid medium», *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, vol. 24, n.o 7, pp. 1463-1486, jul. 1986, doi: 10.1002/pola.1986.080240705.
- [24] E. B. Mano, E. E. C. Monteiro, y L. C. Mendes, «Preparation of alkyl acrylate-acrylic acid copolymers by simultaneous hydrolysis and polymerization», *Polymer Bulletin*, vol. 23, n.o 5, pp. 497-504, may 1990, doi: 10.1007/BF00419968.
- [25] R. Zuluaga, J. L. Putaux, J. Cruz, J. Vélez, I. Mondragon, y P. Gañán, «Cellulose microfibrils from banana rachis: Effect of alkaline treatments on structural and morphological features», *Carbohydrate Polymers*, vol. 76, n.o 1, pp. 51-59, mar. 2009, doi: 10.1016/j.carbpol.2008.09.024.
- [26] N. V. Kozhevnikov, A. V. Trubnikov, y A. D. Stepukhovich, «Polymerization of acrylic monomers in presence of sulphuric acid.», *Polymer Science U.S.S.R.*, vol. 26, n.o 4, pp. 761-769, 1984.
- [27] J. Jose y M. A. Al-Harhi, «Citric acid crosslinking of poly(vinyl alcohol)/starch/graphene nanocomposites for superior properties», *Iranian Polymer Journal*, vol. 26, n.o 8, pp. 579-587, ago. 2017, doi: 10.1007/s13726-017-0542-0.
- [28] M. Lazár, L. Hřčková, A. Fiedlerová, y E. Borsig, «Crosslinking during radical polymerization of dodecyl methacrylate», *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 283, n.o 1, pp. 88-92, nov. 2000, doi: 10.1002/1439-2054(20001101)283:1<88::AID-MAME88>3.0.CO;2-N.
- [29] K. Sykam y S. Donempudi, «Novel multifunctional hybrid diallyl ether monomer via azide alkyne click reaction as crosslinking agent in protective coatings», *Polymer*, vol. 62, pp. 60-69, abr. 2015, doi: 10.1016/j.polymer.2015.02.017.
- [30] E. M. Abdelrazek, A. M. Hezma, A. El-khodary, y A. M. Elzayat, «Spectroscopic studies and thermal properties of PCL/PMMA biopolymer blend», *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 3, n.o 1, pp. 10-15, mar. 2016, doi: 10.1016/j.ejbas.2015.06.001.

- [31] S. Mori, «Compositional analysis and infrared spectra of styrene–methyl methacrylate random copolymers», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 38, n.o 3, pp. 547-555, ago. 1989, doi: 10.1002/app.1989.070380314.
- [32] S. Sengupta, T. Das, U. K. Ghorai, y A. Bandyopadhyay, «Copolymers from methyl methacrylate and butyl acrylate with hyperbranched architecture», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134, n.o 42, p. 45356, nov. 2017, doi: 10.1002/app.45356.
- [33] Y.-H. Hu y C.-Y. Chen, «Study of the thermal behaviour of poly(methyl methacrylate) initiated by lactams and thiols», *Polymer Degradation and Stability*, vol. 80, n.o 1, pp. 1-10, ene. 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00375-0.
- [34] M. Ferriol, A. Gentilhomme, M. Cochez, N. Oget, y J. L. Mieloszynski, «Thermal degradation of poly(methyl methacrylate) (PMMA): modelling of DTG and TG curves», *Polymer Degradation and Stability*, vol. 79, n.o 2, pp. 271-281, ene. 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00291-4.
- [35] D. R. Paul, «Polymer Blends: Phase Behavior and Property Relationships», en *Multicomponent Polymer Materials*, vol. 211, D. R. Paul y L. H. Sperling, Eds., Washington, DC: American Chemical Society, 1985, pp. 3-19. doi: 10.1021/ba-1986-0211.ch001.
- [36] A. E. Rydholm, N. L. Held, C. N. Bowman, y K. S. Anseth, «Gel Permeation Chromatography Characterization of the Chain Length Distributions in Thiol–Acrylate Photopolymer Networks», *Macromolecules*, vol. 39, n.o 23, pp. 7882-7888, nov. 2006, doi: 10.1021/ma060858u.
- [37] A. Wang, G. Li, y H. Meng, «Strain rate effect on the thermomechanical behavior of a thermoset shape memory polymer», *Smart Materials and Structures*, vol. 22, n.o 8, p. 085033, ago. 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/8/085033.
- [38] K. P. Menard, *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. Boca Raton, Fla: CRC Press c/o Taylor & Francis, 2008.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

LTV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Significance of Total Quality Management and Doing Right First Time in Promoting Environmental Sustainability

Importancia de la Gestión de la Calidad Total y de Hacer las Cosas Bien a la Primera Vez para Promover la Sostenibilidad Medioambiental

Importância da Gestão da Qualidade Total e de Fazer as Coisas Certas na Primeira Vez para Promover a Sustentabilidade Ambiental

Luis Javier Márquez Figueroa¹, Jorge Luis García Alcaraz^{2,*}, José Roberto Díaz Reza³
Jesús Alfonso Gil López⁴

Recibido: 29/04/2024

Aceptado: 09/10/2024

Summary. - This article reports a study that analyzes a structural equation model that relates lean manufacturing tools associated with quality control to the benefits obtained in the maquiladora industry of Ciudad Juárez (Mexico). A questionnaire was designed and administered to the regional industry to obtain information about the implementation levels of Total Quality Management, Doing Right First Time, and environmental sustainability. The variables were related through three hypotheses, validated by empirical information from 176 responses to the questionnaire. The results indicate that the relationship between Total Quality Management and Doing Right First Time is strongest in the model. Sufficient statistical evidence affirms that these tools influence environmental sustainability in the Mexican maquiladora industry. Therefore, it is recommended that top management focus their efforts on quality control to guarantee environmental sustainability, focusing on production systems that make quality products for the first time and reduce waste in the process.

Keywords: Total Quality Management; Environmental Sustainability; Structural Equation Model; Quality, Improvement.

(*) Corresponding Author.

¹ PhD Student, Department of Electric Engineering and Computer Science, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (Mexico). al216623@alumnos.uacj.mx , ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8285-1911>

² Full time professor, Department of Industrial Engineering and Manufacturing, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (Mexico), jorge.garcia@uacj.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7092-6963>

³ Postdoctoral Student, Department of Electric Engineering and Computer Science, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (Mexico), inv.pos07@uacj.mx , ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0099-9171>

⁴ Full time profesor, Departamento de Economía y Empresa, Universidad de La Rioja (España), alfonso.gil@unirioja.es , ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8180-4769>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 76-90

<https://doi.org/10.36561/ING.27.6>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Resumen. - Este artículo reporta un estudio que analiza un modelo de ecuaciones estructurales que relaciona las herramientas de manufactura esbelta asociadas al control de calidad con los beneficios obtenidos en la industria maquiladora de Ciudad Juárez (México). Se diseñó y aplicó un cuestionario a la industria regional para obtener información sobre los niveles de implementación de la Gestión de la Calidad Total, el Hacerlo Bien a la Primera y la sustentabilidad ambiental. Las variables se relacionaron a través de tres hipótesis validadas con información empírica de 176 respuestas al cuestionario. Los resultados indican que la relación entre Gestión de la Calidad Total y Hacerlo Bien a la Primera es la más fuerte del modelo. Se concluyó que existe suficiente evidencia estadística para afirmar que estas herramientas influyen en la sustentabilidad ambiental de las industrias maquiladoras mexicanas. Por lo tanto, se recomienda que la alta dirección enfoque sus esfuerzos en el Control de Calidad para garantizar la sustentabilidad ambiental, enfocándose en sistemas de producción que hagan productos de calidad a la primera, reduciendo el desperdicio en el proceso.

Palabras clave: Gestión de la Calidad Total; Sustentabilidad Ambiental; Modelo de Ecuaciones Estructurales; Calidad; Mejora.

Resumo. - Este artigo relata um estudo que analisa um modelo de equações estruturais que relaciona as ferramentas de manufatura enxuta associadas ao controle de qualidade com os benefícios obtidos na indústria maquiladora de Ciudad Juárez (México). Foi elaborado e aplicado um questionário à indústria regional para obter informações sobre os níveis de implementação da Gestão da Qualidade Total, Fazer Certo da Primeira Vez e sustentabilidade ambiental. As variáveis foram relacionadas por meio de três hipóteses validadas com informações empíricas provenientes de 176 respostas ao questionário. Os resultados indicam que a relação entre Gestão da Qualidade Total e Fazer Certo na Primeira Vez é a mais forte no modelo. Concluiu-se que existem evidências estatísticas suficientes para afirmar que estas ferramentas influenciam a sustentabilidade ambiental das indústrias maquiladoras mexicanas. Portanto, recomenda-se que a alta administração concentre seus esforços no Controle de Qualidade para garantir a sustentabilidade ambiental, focando em sistemas de produção que produzam produtos de qualidade desde a primeira vez, reduzindo desperdícios no processo.

Palavras-chave: Gestão da Qualidade Total; Sustentabilidade Ambiental; Modelo de Equações Estruturais; Qualidade, Melhoria.

1. Introduction. - Lean Manufacturing (LM) eliminates non-value-adding activities and processes to improve efficiency, waste reduction, and product quality while reducing time, resources, and prices [1].

Lean manufacturing uses multiple tools to improve production line consistency, quality, problem-solving, and human use [2]. These techniques decrease waste and increase product quality, making LM environmentally, economically, and socially sustainable.

Some of the essential LM tools are related to quality assurance, including Total Quality Management (TQM), Doing Right First Time (DRFT), Kaizen, 5Whys, and root cause analysis [3]. These tools seek to improve a company's products and services and satisfy customers. TQM also emphasizes participative management, customer focus, teamwork, continual training, and measuring and analyzing results to find new ways to improve.

TQM improves product quality, customer happiness, order rejection, and waste from errors and defects in the manufacturing lines. If certified, TQM improves process management, production efficiency, and international recognition [4]. Employee morale and belonging improve while creating a culture of excellence, productivity, and transformation [5].

The Doing Right First Time (DRFT) program, based on Crosby's zero defects and no-cost quality concept, helps managers achieve TQM benefits by preventing errors and executing procedures and jobs right the first time [6].

DRFT must identify essential processes, improve staff training and coaching, identify and remove quality problems, set standards, and encourage measurement and analysis [7]. Companies with ISO 9001 and ISO/TS 16949 certifications benefit from the TQM and DRFT. However, these norms cannot ensure quality [8]. The waste-related benefits of DRFT include the fact that there are no faulty items to reprocess, which increases labor, scrap, and energy costs significantly. For example, ReVelle [9] reported a high cost of non-DRFT production. Wang Wang, et al. [6] found that hospitality clients did not return after an error. Parker, et al. [10] employed DRFT in healthcare to obtain an accurate diagnosis.

LM has improved quality and sustainability. For example, García-Alcaraz, et al. [2] found that LM deployment minimizes environmental consequences by removing barriers. Kalyar, et al. [11] linked LM to Pakistani enterprises' economic and environmental sustainability.

Several studies have linked TQM with sustainability. For example, Zairi [12] suggested analyzing the TQM sustainability paradigm, whereas Ho [13] suggested integrating them. Many managers need to be convinced of TQM's sustainability link. However, Tan, et al. [14] provided several engineering-based responses that management could grasp. When applied to DRFT, TQM has been shown to reduce waste, rework, and improve environmental sustainability. For example, Green, et al. [15] stated that this relationship is direct and reinforced by a good supply chain and JIT, where suppliers are key.

UK, Malaysia, India, and Portugal have investigated TQM, DRFT, and environmental sustainability. However, only one Mexican study has examined sustainability as a variable encompassing social, environmental, and economic factors [16]. However, the Mexican Manufacturing Industry (MMI) has 5158 national maquiladoras, 485 in Chihuahua State and 323 in Ciudad Juárez; therefore, it is important to apply quality-focused tools to obtain positive environmental results, since Ciudad Juárez is among the cities with the highest number of maquiladora companies and represents a large percentage of the number of jobs registered in the city [17]. A maquiladora is a Mexican subsidiary of a foreign corporation that imports raw materials and exports all goods.

This study used a structural equation model (SEM) to analyze the implementation of these three latent variables in a questionnaire for the maquiladora industry in Ciudad Juárez, Mexico. It aims to advance this field and to better understand the relationship between TQM, DRFT, and environmental sustainability. This study shows decision-makers how these variables interact directly and indirectly.

The literature review must fully explain the application of DRFT and TQM as tools related to ENS. Therefore, this study sought to expand the relationship between these quality tools and their environmental impacts.

The remainder of this paper is organized as follows: Section two reviews the literature and explains the hypotheses.

Section 3 presents the approach for attaining the goal, Section 4 discusses the outcomes, and Section 5 presents the conclusions and future work.

2. Literature Review and Hypothesis. -

2.1. Total Quality Management (TQM). - The need for quality and competitive performance has spawned TQM. Texas Instruments, Xerox, IBM, and Motorola used TQM. The Malcolm Baldrige Award, European Foundation for Quality Management, and Deming Award recognize firms implementing TQM, encompassing quality excellence [18]. However, TQM uses numerous methods to ensure product quality.

2.2. Doing Right First Time (DRFT). - DRFT stresses the correctness of the production process and identifies human error concerns to suggest improvements. Crosby created a DRFT and zero-fault motto. DRFT is used in medical, healthcare, and Industry 4.0 manufacturing to reduce waste and accidents [8].

Participating in quality programs and achieving zero faults can help TQM-DRFT attain sustainability. Combining TQM-DRFT helps firms reduce sustainability risks, allowing us to propose the following hypotheses:

H₁. TQM directly and positively affects the implementation of DRFT in MMI.

2.3. Environmental sustainability (ENS). - Previous research has shown that sustainability involves environmental, social, and economic concerns. For example, Caldera, et al. [18] provided a paradigm for SMEs to use LM and achieve business sustainability. Also, de Sousa Jabbour, et al. [19] found that internal and external TQM elements affect environmental and social performance. Green manufacturing systems, information technology, and greenhouse gas reduction are valuable enterprise investments.

With the push toward sustainability, firms are going green. This requires external change and government incentives for SMEs. Henao, et al. [20] says LMs promote internal green efforts. Other research has shown that LM and green practices differ fundamentally, affecting performance. These contradictions can be avoided by analyzing LM as a philosophy rather than a practical performance impact.

TQM-ENS reduces environmental effects by improving energy efficiency by minimizing defects and reworking. TQM-ENS focuses on ENS during TQM implementation to find improvements in environmental impact, allowing us to suggest the following hypothesis:

H₂. TQM directly and positively affects ENS implementation in MMI.

As a basis for sustainability, DRFT-ENS helps the industry produce quality products for the first time, which improves machinery use, makes production more efficient, and avoids sending products to landfills or reprocessing them. If management implements DRFT in LM programs, sustainability goals can be met. Thus, we propose the following hypotheses:

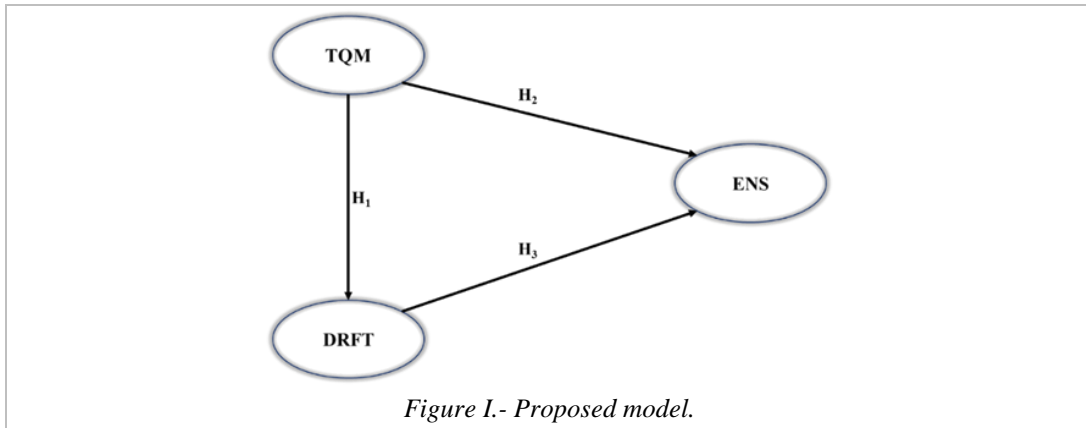
H₃. DRFT directly and positively affects the implementation of ENS in MMI.

To distinguish between the different hypotheses, Figure 1 shows the relationships between variables.

3. Methods. -

3.1. Application of the questionnaire. - This study examined MMI in Ciudad Juarez, Mexico, and the Manufacturing, Maquiladora, and Export Services Industry suggested possible responders. Due to COVID-19 constraints, the questionnaire was uploaded to Google Forms. Workers in the maquiladora and production and manufacturing departments were eligible.

Respondents had to have led two LM-based improvement projects for at least one year in their jobs. If no answer was received, a reminder followed the invitation email. The questionnaire ran from June 12 to September 12, 2022, and cases were rejected after two attempts at not obtaining information.



3.2. Information gathering and debugging. - On September 12, 2022, Google Forms® data were downloaded in Excel format for analysis using SPSS v.25®, with debugging activities as follows:

1. Duplicate cases were excluded from future analyses.
2. The standard deviation of each case was calculated, and values below 0.5 were excluded to identify non-committed respondents.
3. Standardizing each category and substituting absolute values more significant than four with the median identified extreme values.

3.3. Validation of variables. - The following indices validate the three latent variables in Fig. 1's model [21]:

- R-squared and adjusted R-squared assess para-metric predictive validity (≥ 0.2 accepted), whereas Q-squared measures parametric validity (similar positive values accepted).
- Use Cronbach's alpha and composite reliability index to assess internal validity (≥ 0.7 approved).
- The variance inflation index (VIF) was calculated to assess collinearity (values ≤ 5 were allowed).
- The average variance extracted (AVE) measures convergence validity, accepting values above 0.5.

It is essential to mention that estimating some indices is performed iteratively because eliminating some items helps improve the analysis.

3.4. Descriptive Analysis of the Sample and Items. - The cleaned database was analyzed descriptively because SPSS® statistical software is widely used in research reports [22, 23]. Demographic data were evaluated using cross-tables to describe the sample. The medians and IQR measured the central tendency and dispersion, respectively.

3.5. Structural Equation Model (SEM). - Model validation WarpPLS 7.0® software used SEM and PLS to validate the hypotheses presented in Figure 1. SEM-PLS is used for small samples with ordinal data or non-normal variables [24]. Before PLS-SEM interpretation, the model efficiency metrics were assessed at 95% confidence using the following indices [25] :

1. The average path coefficient (APC) was used to measure the statistical significance of the parameter regression, and the associated p-value was less than 0.05.
2. The average R-squared (ARS) and Average Adjusted R-squared (AARS) measure the model's predictive validity, and the associated p-value should be less than 0.05.
3. The average block VIF (AVIF) and average full collinearity VIF (AFVIF) were used to measure collinearity, and values less than five were accepted.
4. Tenenhaus GoF (GoF), which should be greater than 0.36, was used to measure the data fit.

Direct effects - hypotheses validation: The validating hypotheses in Fig 1 involve measuring the direct effects between latent variables using parametric regression and evaluating the null hypothesis $H_0: \beta=0$ with the alternative hypothesis

H₁: $\beta \neq 0$ with 95% confidence [25]. If hypothesis testing reveals $\beta \neq 0$, statistical evidence supports a link between the variables, regardless of the sign.

In addition, the Effect Size (ES) for each direct effect measures the variance explained by the independent variable in the dependent variable. The total ES of the dependent variable is R².

The sum of Indirect and Total Effects: A mediating variable must exist to transmit indirect effects between the variables. This study summarizes the indirect effects of ES and the p-values. Finally, each relationship's overall effect is the sum of its direct and indirect effects, along with ES and p-values.

Sensitivity Analysis: WarpPLS v7.0® software presents standardized indices, allowing probabilistic sensitivity analysis to determine hidden variable situations in the examined variables [25]. This analysis examined scenarios with a high probability of occurrence, indicated by a standardized variable larger than or equal to one P ($Z \geq 1$). A low situation occurs when the standardized variable is equivalent to or less than minus one P ($Z \leq -1$).

The following three probabilities were calculated:

1. Probability of variables occurring alone at high and low levels.
2. Cooccurrence probability of two variables in the high-low scenario combination.
3. The conditional probability of occurring the dependent variable is in any scenario given that an independent variable had occurred.

4. Results. -

4.1. Descriptive Analysis of the Sample. - Ciudad Juárez companies provided 176 valid responses out of 704 emails sent. Table I illustrates the sample's descriptive analysis by the industrial sector and respondent position. With 60 respondents, the automotive industry dominated this sample. In contrast, twenty-eight respondents were from an unlisted industry, and twenty-four were from the electronics industry. These three industries dominate the sample. Engineers and supervisors constituted 50% of the survey respondents.

Industrial Sector	Job title					Total
	Mngr	Eng	Sup	Tech	Other	
Automotive	12	22	12	14	10	39,11%
Aeronautics		2	1			1,68%
Electric	1	3	3			3,91%
Electronics	2	11	7	3	1	13,41%
Logistics		5	2	1	1	5,03%
Machining	1	3	2	2	2	5,59%
Medical	3	4	5	3	5	11,17%
Rubber and plastics		4	1	1		3,35%
Textiles and clothing		2				1,12%
Another	2	7	4	4	11	15,64%
Total	11,73%	35,20%	20,67%	15,64%	16,76%	100%

Table I. Industry sector and job position.

Mngr: Manager, Eng: Engineer, Sup: Supervisor, Tech: Technician.

Table II shows respondents' gender and years of experience. Male and female responders were evenly split, with two to five years of experience being the most common, followed by more than ten, five to ten, and one to two.

Sex	Years of Experience					Total
	0 a 1	1 a 2	2 a 5	5 a 10	> 10	
Female	8	9	33	13	15	43,58%
Male	2	18	40	21	20	56,42%
Total	5,59%	15,08%	40,78%	18,99%	19,55%	100%

Table II. Years of experience.

4.2. Descriptive Analysis of the Items. - Table III presents the medians and IQR of the latent variable items. All medians for items were more significant than 4.0, indicating respondents believed the investigated technologies provided the intended benefits. However, the IQR of 1.30 to 1.52 implies a significant consensus among respondents with no severe differences in replies.

Items	Median	Interquartile Range
TQM		
Participatory management aimed at continuous improvement is promoted in all operations.	4,31	1,33
The concept of total quality is promoted from the procurement of raw materials to after-sales customer service.	4,34	1,36
Decision-making for improvement is justified with facts and data.	4,29	1,38
DRFT		
Using quick-release fixtures, star knobs, and locking levers often.	4,25	1,47
Verification gages are mounted on the machines or workstations and are easily replaceable.	4,25	1,45
Replacement of a malfunctioning machine or equipment is easy.	4,22	1,52
ENS		
Solid waste reduction	4,36	1,30
Reduction of liquid waste	4,30	1,34
Reduction of gas emissions	4,32	1,32
Reduction of environmental mishaps	4,37	1,32

Table III. Descriptive analysis of the items.

4.3. Validation variables. - The variables were validated, and Table IV summarizes the final values to show that they all met the objective values in the last column.

Indexes	TQM	DRFT	ENS	Best if
R ²		0,367	0,468	>= 0,2
R ² adjusted		0,363	0,462	>=0,2
Composite Reliability	0,934	0,950	0,954	>=0,7
Cronbach's Alpha	0,894	0,921	0,936	>=0,7
Average variance extracted	0,825	0,863	0,839	>=0,5
Collinearity (VIF)	1,724	1,867	1,810	<=3,3
Q ²		0,367	0,465	>=0,2

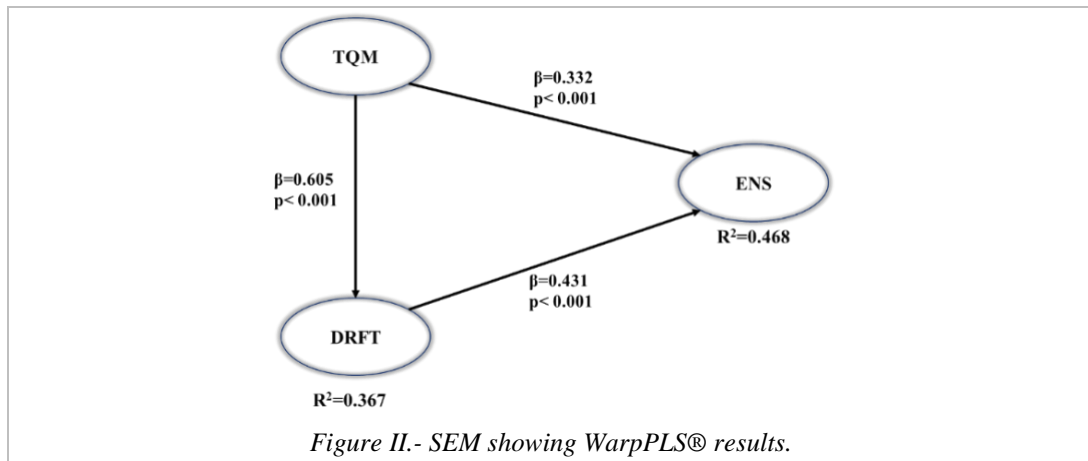
Table IV. Validation of the LM latent variables used in the questionnaire.

4.4. Structural Equation Model (SEM). - Model validation: Latent variables were integrated into the model and run because they met the validation indices, as shown in Table V. The model had predictive validity, no collinearity, and robust data fit because each indicator reached its target value.

Index	Results	Best if
Average path coefficient (APC)	0,456; P<0,001	P<0,001
Average R ² (ARS)	0,417; P<0,001	P<0,001
Average adjusted R ²	0,412; P<0,001	P<0,001
Average Block VIF (AVIF)	1,575	Ideally <=3,3
Average full collinearity VIF (AFVIF)	1,800	Ideally <=3,3
Tenenhaus GoF (GoF)	0,593	Better if >=0,36

Table V. Model efficiency indices.

Figure II shows the SEM data. At the 99% confidence level, β values below 0.001 indicated statistical significance for each variable connection. This model explains 37 and 47% of the dependent variables, such as DRFT and ENS, respectively, with R² values of 0.37 and 0.47.



Validation of Hypotheses–Direct Effects: Table VI lists the hypotheses, variables, p-values, and decisions. The SEM analysis showed that all relationships were accepted. H₁ offers sufficient statistical data to show that TQM directly and positively affects DRFT implementation because an increased standard deviation increases DRFT by 0.605 units.

H _i	Relation	β (p-value)	Decision
H ₁	TQM→DRFT	0,605 (<0,001)	Accept
H ₂	TQM→ENS	0,332 (<0,001)	Accept
H ₃	DRFT→ENS	0,431 (<0,001)	Accept

Table VI. Summary of tested hypotheses.

Sum of indirect and total effects: The proposed model has only one indirect effect between TPM and ENS through DRFT as a moderating variable. This effect is statistically significant at the 99% confidence level with an ES of 0.154, indicating that TQM explains 15.4% of the variance in ENS.

The three cumulative impacts of the variables in Table 7 are statistically significant with 99% confidence. The results of β and ES indicate that TQM affects DRFT and ENS.

	TQM	DRFT
DRFT	β=0,605 (p<0,001) EN=0,367	
ENS	β=0,592 (p<0,001) EN=0,351	β=0,431 (p<0,001) EN=0,272

Table VII. Total Effects.

4.5. Sensitivity Analysis. - Table VIII shows the sensitivity analysis with columns for the independent variables and rows for the dependent variables. High-level situations are marked "+," while low-level scenarios are marked "-." Given a TQM+, the likelihood of a DRFT+ is 0.596, showing that exemplary TQM implementation guarantees 59.6% of DRFT outputs. However, low TQM implementation led to adverse DRFT outcomes, with a conditional probability of 0.571, putting senior management at 57.1% risk.

Level		TQM+	TQM-	DRFT+	DRFT-
	Probability	0,295	0,159	0,267	0,159
DRFT+	0,267	& = 0,176	& = 0,006		
		If = 0,596	If = 0,036		
DRFT-	0,159	& = 0,023	& = 0,091		
		If = 0,077	If = 0,571		
ENS+	0,284	& = 0,165	& = 0,011	& = 0,153	& = 0,006
		If = 0,558	If = 0,071	If = 0,574	If = 0,036
ENS-	0,148	& = 0,028	& = 0,068	& = 0,017	& = 0,085
		If = 0,096	If = 0,429	If = 0,064	If = 0,536

Table VIII. Sensitivity analysis.

5. Discussion of results. -

5.1. From the SEM. -

H₁. TQM improves DRFT by 0.605 units when its standard deviation increases by one unit in MMI, providing statistical proof that it directly and positively affects the DRFT. This finding aligns with García Alcaraz, et al. [8], who found that TQM and DRFT positively impact firm revenue. These findings suggest that top management should prioritize TQM deployment in companies' production models for commercial and economic gains.

To achieve this relationship between TQM and DRFT, management must promote a quality culture and train and develop employees who turn raw materials into finished products. Managers win economically from client happiness and on-time deliveries as well as socially and environmentally.

H₂. ENS increases by 0.332 units when TQM increases its standard deviation by one unit, indicating that implementation directly benefits ENS. These findings support Green, et al. [15] who found that TQM and green supply chain techniques work together in the US industry and improve environmental performance.

For MMI, a high-quality program can reduce processing waste because continuous improvement reduces energy use and emissions, which helps meet environmental regulations. TQM also requires sustainability planning and design, which leads to product innovation and process improvements, with reduced environmental effects and increased corporate social responsibility.

H₃. When DRFT increased its standard deviation by one unit, ENS increased it by 0.431 units, suggesting a direct and beneficial influence. Barratt, et al. [26] found that DRFT improves orthopedic treatment quality and lowers costs in England.

MMI finds that utilizing the DRFT methodology reduces production waste, trial and error waste, person hours, and machine energy. This decreases pollutant emissions, conserves water, and lowers MMI's carbon footprint, boosting its business image.

The combined use of TQM and DRFT positively affected ENS results. Therefore, the industry's use of these LM tools will create a company with positive environmental results.

5.2. Sensitivity analysis. - This study assumes that TQM is a philosophy that adopts other quality methods. The three ideas show how DRFT helps TQM improve ENS. Table VIII presents the results of the sensitivity analysis.

TQM+ directly preferred DRFT+ and ENS+, with probabilities of 0.596 and 0.558, respectively. TQM+ is unrelated to DRFT- and ENS- results, which helps management understand that MMI efforts to implement TQM+ produce quality parts and reduce environmental impacts by reducing waste and reprocesses in energy efficiency and resource consumption. TQM helps companies comply with environmental requirements that may result in administrative consequences, improve their image, and produce environmentally friendly products [27].

The study shows that TQM- is dangerous because the odds of DRFT- and ENS- are 0.571 and 0.429, respectively. Implementing TQM at an elevated level is crucial for a company's management to reap the benefits of DRFT+ and ENS+ because TQM is not linked to them. This suggests that TQM- generates more production waste and employs wasteful resources. Consumers will accept only high-quality products. TQM can also result in environmental violations, missed client delivery dates, and loss of competitiveness and corporate image [28].

DRFT+ created an ENS in 57.4% of the cases with a conditional probability of 0.574. Therefore, the management should prioritize DRFT to improve the environment. Additionally, no correlation was found between DRFT + and ENS -. Top management should prioritize obtaining quality parts first to avoid waste, use unnecessary resources, limit polluting emissions, meet production orders on schedule, and boost their workers' corporate image and sense of belonging by providing excellent products [29].

DRFT- has no link with ENS+, but its conditional probability with ENS- is 0.536, indicating a significant likelihood of low DRFT implementation and ENS. Management needs to avoid DRFT- very much. Managers should immediately address these DRFTs- because they indicate a lack of employee training, defective designs, quality control and supervision in the production process, communication issues, feedback, poor equipment and machinery, unclear work methods and standards, and absence of improvement programs.

TQM and DRFT positively impact the environment; thus, to obtain an ENS+, they must be implemented to reduce negative impacts and contribute to the ENS [30].

The results of obtaining TQM+ and DRFT+ together are high (above 50 %), so obtaining ENS+ remains at a similar probability in combination with the other tools. Managers who focus on applying TQM and DRFT at higher levels will improve their ENS results.

6. Conclusion. - This study used structural equation modeling to examine TQM, DRFT, and ENS. The results demonstrate that TQM programs increase the implementation of DRFT, and LM activities significantly increase company's environmental benefits. With a quality control management program, LM helps develop products and processes that are done right the first time, wasting raw materials and energy and hurting the company's environmental goals.

So, companies must adopt a defect-free approach to promote ENS deployment in MMI, as DRFT improves ENS development and also, TQM has a modest impact on the ENS but significantly improves the DRFT. Management should prioritize TQM to boost ENS indirectly through DRFT.

In conclusion, by using these combinations of LM tools, MMI companies in Ciudad Juárez can achieve positive results on the company's bottom line. However, it is important to focus their resources and efforts on generating quality, low-cost products, seeking to reduce waste as much as possible to increase environmental benefits, and becoming leaders in this area.

7. Limitations and Future Research. - Due to the COVID-19 pandemic's limits on industry access, this study received few responses. Thus, we pursued the following themes:

- We plan to increase the sample size and tools to examine and link them to social and economic sustainability by conducting more surveys and evaluations.
- The survey will be conducted in various Mexican cities to assess the tools' effects and compare manufacturing cities.
- It is essential to clarify that this information is limited to a general study of the manufacturing industry in Ciudad Juárez Chihuahua, Mexico. There is a risk that the same will not occur in other states of the country or in foreign companies, since each case must be analyzed and necessary comparisons must be made.

Data availability: Data supporting the results of the present study are available upon request from the corresponding author.

Referencias

- [1] A. J. Naemah and K. Y. Wong, "Positive impacts of lean manufacturing tools on sustainability aspects: a systematic review," (in English), *J. Ind. Prod. Eng.*, Article vol. 39, no. 7, pp. 552-571, 2022, doi: 10.1080/21681015.2022.2041742.
- [2] J. L. García-Alcaraz, A. S. Morales García, J. R. Díaz-Reza, E. Jiménez Macías, C. Javierre Lardies, and J. Blanco Fernández, "Effect of lean manufacturing tools on sustainability: the case of Mexican maquiladoras," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 26, pp. 39622-39637, 2022/06/01 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18978-6.
- [3] A. Mittal and P. Gupta, "An Empirical Study on Enhancing Product Quality and Customer Satisfaction Using Quality Assurance Approach in an Indian Manufacturing Industry," (in English), *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, Article vol. 6, no. 3, pp. 878-893, 2021, doi: 10.33889/ijmms.2021.6.3.052.
- [4] M. Jaeger and D. Adair, "Perception of TQM benefits, practices and obstacles: The case of project managers and quality management representatives in Kuwait," (in English), *TQM J.*, Article vol. 28, no. 2, pp. 317-336, 2016, doi: 10.1108/TQM-10-2014-0091.
- [5] İ. Gözükarar, N. Çolakoğlu, and Ö. F. Şimşek, "Development culture and TQM in Turkish healthcare: importance of employee empowerment and top management leadership," (in English), *Total Quality Management and Business Excellence*, Article vol. 30, no. 11-12, pp. 1302-1318, 2019, doi: 10.1080/14783363.2017.1366266.
- [6] X. Wang, P. Guchait, J. M. Madera, and A. Pasamehmetoğlu, "Is "Do it right the first time" necessarily right?: The importance of error management culture in the hospitality industry," (in English), *Int. J. Contemp. Hosp. Manage.*, Article vol. 30, no. 3, pp. 1398-1418, 2018, doi: 10.1108/IJCHM-01-2017-0038.
- [7] G. C. Lee, G. H. Smith, E. A. Wakelin, J. P. Garino, and C. Plaskos, "What is the Value of a Balanced Total Knee Arthroplasty? Getting It Right the First Time," (in English), *J. Arthroplasty*, Article 2023, doi: 10.1016/j.arth.2023.03.022.
- [8] J. L. García Alcaraz, F. A. Martínez Hernández, J. E. Olguín Tiznado, A. Realyvásquez Vargas, E. Jiménez Macías, and C. Javierre Lardies, "Effect of Quality Lean Manufacturing Tools on Commercial Benefits Gained by Mexican Maquiladoras," *Mathematics*, vol. 9, no. 9, p. 971, 2021, doi: 10.3390/math9090971.
- [9] J. B. ReVelle, "Out of hiding: Uncover the true costs of not getting it right the first time," (in English), *Qual Prog*, Article vol. 46, no. 3, pp. 50-51, 2013. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84877611261&partnerID=40&md5=c78b0737932ea4a6b13ace1e8703f9b6>.
- [10] S. Parker *et al.*, "Inadequate pelvic radiographs: Implications of not getting it right the first time," (in English), *Ann. R. Coll. Surg. Engl.*, Article vol. 99, no. 7, pp. 534-539, 2017, doi: 10.1308/rcsann.2017.0095.
- [11] M. N. Kalyar, I. Shafique, and A. Abid, "Role of lean manufacturing and environmental management practices in eliciting environmental and financial performance: the contingent effect of institutional pressures," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, pp. 24967-24978, 2019.
- [12] M. Zairi, "Beyond TQM implementation: The new paradigm of TQM sustainability," (in English), *Total Quality Management*, Article vol. 13, no. 8, pp. 1161-1172, 2002, doi: 10.1080/09544120200000011.
- [13] S. K. M. Ho, "Integrated lean TQM model for global sustainability and competitiveness," (in English), *TQM J.*, Article vol. 22, no. 2, pp. 143-158, 2010, doi: 10.1108/17542731011024264.
- [14] B. I. Tan, K. L. Wong, and C. K. Choong, "Can TQM improve the sustainability of family owned business?," (in English), *Int. J. Innov. Learn.*, Article vol. 17, no. 2, pp. 174-186, 2015, doi: 10.1504/IJIL.2015.067406.
- [15] K. W. Green, V. E. Sower, P. J. Zelbst, and R. A. Inman, "Impact of JIT, TQM and green supply chain practices on environmental sustainability," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 30, no. 1, pp. 26-47, 2019, doi: 10.1108/JMTM-01-2018-0015.
- [16] J. L. García-Alcaraz, F. J. Flor-Montalvo, L. Avelar-Sosa, C. Sánchez-Ramírez, and E. Jiménez-Macías, "Human resource abilities and skills in TQM for sustainable enterprises," (in English), *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 22, 2019, Art no. 6488, doi: <https://doi.org/10.3390/su11226488>.
- [17] IMMEX, "Statistical Information Monthly - IMMEX companies," Asociación de Maquiladoras A.C., Ciudad Juárez, April 14, 2022 2023.
- [18] H. Caldera, C. Desha, and L. Dawes, "Evaluating the enablers and barriers for successful implementation of sustainable business practice in 'lean'SMEs," *J. Clean. Prod.*, vol. 218, pp. 575-590, 2019.

- [19] A. B. L. de Sousa Jabbour, N. O. Ndubisi, and B. M. R. P. Seles, "Sustainable development in Asian manufacturing SMEs: Progress and directions," *International Journal of Production Economics*, vol. 225, p. 107567, 2020.
- [20] R. Henao, W. Sarache, and I. Gómez, "Lean manufacturing and sustainable performance: Trends and future challenges," *J. Clean. Prod.*, vol. 208, pp. 99-116, 2019/01/20/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.116>.
- [21] N. Kock, "Using WarpPLS in e-collaboration studies: What if I have only one group and one condition?," *International Journal of e-Collaboration (IJeC)*, vol. 9, no. 3, pp. 1-12, 2013.
- [22] J. L. García-Alcaraz, D. J. Prieto-Luevano, A. A. Maldonado-Macías, J. Blanco-Fernández, E. Jiménez-Macías, and J. M. Moreno-Jiménez, "Structural equation modeling to identify the human resource value in the JIT implementation: case maquiladora sector," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, no. 5, pp. 1483-1497, 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6561-5.
- [23] L. Avelar, "Application of structural equation modelling to analyse the impacts of logistics services on risk perception, agility and customer service level," *Instituto de Ingeniería y Tecnología*, 2018.
- [24] N. Kock, *WarpPLS 6.0 User Manual*. Laredo, TX, USA: ScriptWarp Systems, 2018.
- [25] N. Kock, *WarpPLS User Manual: Version 7.0*, Laredo, TX, USA: ScriptWarp Systems, 2021, p. 142. [Online]. Available: https://www.scriptwarp.com/warppls/UserManual_v_7_0.pdf.
- [26] H. Barratt *et al.*, "Mixed methods evaluation of the Getting it Right First Time programme-improvements to NHS orthopaedic care in England: study protocol," *BMC health services research*, vol. 17, pp. 1-8, 2017.
- [27] J. Abbas, "Impact of total quality management on corporate green performance through the mediating role of corporate social responsibility," *J. Clean. Prod.*, vol. 242, p. 118458, 2020.
- [28] O. Adediran and O. ADEDIRAN, "TOTAL QUALITY MANAGEMENT: A Test of the Effect of TQM on Performance and Stakeholder Satisfaction," ed, 2009.
- [29] B. T. Oakley, "Total quality product design—how to integrate environmental criteria into the product realization process," *Environmental Quality Management*, vol. 2, no. 3, pp. 309-321, 1993.
- [30] J.-H. Ma, S.-B. Choi, and Y.-H. Ahn, "The impact of eco-friendly management on product quality, financial performance and environmental performance," *Journal of Distribution Science*, vol. 15, no. 5, pp. 17-28, 2017.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

LJMF has contributed to: 1, 2, 3, and 5.

JLGA has contributed to: 1, 4, 5 and 6.

JRDR has contributed to: 2 and 3.

JAGL has contributed to: 4 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Gobertti.

Thermo-Mechanical Process-Induced Residual Stresses and Deformation Analysis During Manufacturing of Hull Structure

Tensiones residuales termo mecánicas inducidas por el proceso y análisis de deformación durante la fabricación de la estructura del casco

Tensões residuais induzidas pelo processo termo-mecânico e análise de deformação durante a fabricação da estrutura do casco

Saad Ahmed¹, Muhammad Asif^{2,*}, Asad Ali Zaidi³

Recibido: 13/05/2024

Aceptado: 09/10/2024

Summary. - Hull structures such as stiffened plates and thin panels are the building blocks of ship structures, and therefore understanding their manufacturing process is of utmost importance. The welding process has been widely used to join stiffeners, stringers, and girders onto the plate. The thermo-mechanical loading and constraints during the welding process generally induced deformations and residual stresses. A deep understanding of the process parameters during thermo-mechanical processing is required to control the process-induced deformation. Therefore, this study aims to investigate the deformation and thermal stress generation in hull structures (panels/stiffened plates) during thermo-mechanical processes such as welding. A finite element modeling approach was proposed while incorporating the thermal and nonlinear thermo-elastic-plastic material behavior. The thin panels with different geometrical configurations and boundary conditions were simulated using steady state and transient heat-transfer-stress deformations analysis to simulate real-life scenarios. Both modeling approaches give a useful insight into understanding the complex nature of deformation and built-up residual stresses. However, the transient heat transfer-stress deformation analysis results were found in a reasonably good agreement with experimental data.

Keywords: Hull structure, welding deformations, finite element analysis, residual stresses, transient heat transfer.

(*) Corresponding Author

¹ MSc Student, Department of Naval Architecture, Pakistan Navy Engineering College, National University of Sciences and Technology Pakistan, sahed.mech@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-4851-788X>

² Associate Professor, Department of Engineering Sciences, Pakistan Navy Engineering College, National University of Sciences and Technology Pakistan, muhammadasif@pnec.nust.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4318-8253>

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic University of Madinah, P.O. Box 170, Madinah, Saudi Arabia, sali@iu.edu.sa, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5457-5684>

Resumen. - Las estructuras de casco, como las placas rígidas y los paneles delgados, son los componentes básicos de las estructuras de barco y, por lo tanto, comprender su proceso de fabricación es de suma importancia. El proceso de soldadura se ha utilizado ampliamente para unirse a los rígidos, largueros y vigas en la placa. La carga y restricciones termo mecánicas durante el proceso de soldadura generalmente indujeron deformaciones y tensiones residuales. Se requiere una comprensión profunda de los parámetros del proceso durante el procesamiento termo-mecánico para controlar la deformación inducida por el proceso. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo investigar la generación de deformación y estrés térmico en estructuras de casco (paneles/placas rígidas) durante los procesos termo-mecánicos como la soldadura. Se propuso un enfoque de modelado de elementos finitos al incorporar el comportamiento de material térmico y no lineal de plástico termoelástico. Los paneles delgados con diferentes configuraciones geométricas y condiciones de contorno se simularon utilizando un análisis de deformaciones de estrés por calor de calor transitorio y transitorio para simular escenarios de la vida real. Ambos enfoques de modelado brindan una visión útil de comprender la naturaleza compleja de la deformación y las tensiones residuales acumuladas. Sin embargo, los resultados del análisis de deformación de transferencia de calor transitorio de calor se encontraron en un acuerdo razonablemente bueno con los datos experimentales.

Palabras clave: Estructura del casco, deformaciones de soldadura, análisis de elementos finitos, tensiones residuales, transferencia de calor transitorio.

Resumo. - Estruturas de casco, como placas rígidas e painéis finos, são os blocos de construção das estruturas de navios e, portanto, entender seu processo de fabricação é de extrema importância. O processo de soldagem tem sido amplamente utilizado para unir reforços, longarinas e vigas no prato. A carga termo-mecânica e as restrições durante o processo de soldagem geralmente induziam deformações e tensões residuais. É necessário um profundo entendimento dos parâmetros do processo durante o processamento termo-mecânico para controlar a deformação induzida pelo processo. Portanto, este estudo tem como objetivo investigar a deformação e a geração de tensão térmica em estruturas de casco (painéis/placas rígidas) durante processos termo-mecânicos, como soldagem. Uma abordagem de modelagem de elementos finitos foi proposta ao incorporar o comportamento do material termoelástico-elástico térmico e não linear. Os painéis finos com diferentes configurações geométricas e condições de contorno foram simuladas usando análise de deformações de estresse de transferência de transferência transitória para simular cenários da vida real. Ambas as abordagens de modelagem fornecem uma visão útil sobre a compreensão da natureza complexa da deformação e das tensões residuais construídas. No entanto, os resultados da análise de deformação transitória por transferência de calor de transferência de calor foram encontrados em uma concordância razoavelmente boa com dados experimentais.

Palavras-chave: Estrutura do casco, deformações de soldagem, análise de elementos finitos, tensões residuais, transferência transitória de calor.

1. Introduction . - The Stiffened panel is the building block in the marine, aerospace, and offshore industry [1]. The most common joining process used to manufacture stiffened panels is welding. Unfortunately, welding comes with unavoidable deformation and residual stresses due to shrinkage of material near the area adjacent to welding seams during the process. The ship industry faces many challenges in controlling the distortion and deformation in hull during the fabrication process. Therefore, a deep understanding of the manufacturing process and parameters that govern the deformation is of utmost importance. Exploring the causes of deformation due to thermal stresses on stiffened panels will help to design processes that yield panels with controlled state of the deformation. The evaluation of strength analysis, longitudinal bending moments, and controlling deformation plays a vital role in a vessel's quality and longevity.

Welding is an integral part of the assembly and fabrication process. The welding process usually induced the unwanted deformations in structure and effects the component's structural integrity [2, 3]. Therefore, accurate evaluation of the deformation in stiffened panels is an essential part of ship structure manufacturing. To counter the adverse effects of welding induced deformation, the welding engineer consider many factors such as the sequence of weld [4], welding parameters, and mechanical constraints to reduce deformation and production cost. In addition, the welding induced deformations are affected by design factors such as types of joints, panel thickness, stiffener arrangement, temperature-dependent material properties, and manufacturing factors that include the welding method, speed, intensity, clamping and joint strategy [5, 7].

Several authors employed finite element analysis (FEA) with thermo-elasto-plastic models to investigate the welding induced distortions with different design and manufacturing factors. Kumar et al. [8] investigated distortion in a thin plate due to the bead-on joint. Chen et al. studied the buckling and distortion defects in fillet welds [9]. They considered section-integration shell elements and the effects of the welding sequence on the stiffened panels was investigated. Zhang et al. [10] studied the influence of welding mechanical boundary condition on the residual stress and distortion of a stiffened panel. These fixtures were to affect the location of deformation and magnitude of thermal stresses. To simplify the stiffened plates' design and analysis, the two-dimensional constant stress distribution along the length were considered. However, this reduces the accuracy of the results but understanding the factors affecting the out-of-plane displacement, shrinkage, and angular displacement, an FEA numerical model was developed to investigate the behavior. This approach was found to help predict the deformation in an earlier phase, which would save time and cost of production.

The FEA is the most popular analysis method but not the only way to model the welding process. In literature [11], several other methods such as the inherent strain method (ISM) and equivalent load method (ELM) was also proposed. The ISM was found to be capable of predicting the size of the heat-affected zone and applied inherent strain values by substituting equivalent elastic force to evaluate deformation. The ISM has some advantage but FEA was considered an easier and more powerful approach but sometime computationally expensive [12]. The processing time of numerical simulations was reduced by an efficient method proposed using composite shell elements based on inherent strain method [13]. Similarly, the approaches like Swarm Optimization (PSO) and grid search (GS) showed good potential to predict welding deformation and thermal stresses [14] but computationally very challenging for large scale problems.

A ship panel experiences tensile, compression, and axial loads, and moreover the thermo-mechanical material behavior play an important role in designing the stiffened panels. Steel is a primary material for shipbuilding in the world for its low cost and high flexibility in fabrication. In a detailed review, Zhang et al [15] ultimate strength of steel plates and stiffened panels under axial compression. Wang et al. [16] showed that the strength of the material depends on temperature. At higher temperature, the Q460 steel shows lower strength loss than mild steel Ali et al. [17] showed that the ship panels made of grade A36 and A131 have the best suitable properties for stiffened panels. There is extensive research ongoing to develop stronger, lighter, and economical materials for ship structures. Semi-steel and composite material have enhanced resistance collision capabilities and can be potentially beneficial [18]. There is a correlation between material properties and welding joints. Higher yield strength materials generate larger transverse shrinkage angular deformation, and longitudinal deflection[19]. Russell [20] reveals that almost 25% of total labor cost in fabrication is usually served in the rectification of deformation in ship hull structure during the fabrication

process. This is a serious problem and affects the overall cost of the ship due to extra rectification work. They also discussed how laser welding can prove more beneficial than regular arc welding. McPherson [21] showed that 80% of the total distortion can be reduced by efficient management in the fabrication process, while 20% is due to the presence of residual stress, which requires more complex solutions.

Another study addresses the challenge of thermal deformation in aluminum hulls during welding. By simulating various welding sequences using finite element methods, it demonstrates that optimizing these conditions can reduce maximum displacement by up to 52.1% and effective plastic strain by up to 19.6%, thereby enhancing structural integrity and sustainability in the marine industry [31].

Welding induced deformations are an inevitable part of the manufacturing process and is a big concern for the shipbuilding industry. Researchers are continuously devising new numerical methods and modeling techniques that can help significantly to understand the cause and thus remedy of welding induced deformations.

Similarly, [32] introduces a distortion simulator that employs finite element methods (FEM) to predict welding and buckling distortion in shipbuilding. The tool allows for quick predictions without requiring extensive expertise and achieves 80-98% accuracy when validated against commercial software and measured data, underscoring the effectiveness of FEM in predicting welding deformation.

This study proposes a transient thermal-elastic-plastic FEA numerical model to predict the deformation and residual stresses generated during the welding process of yacht panels. Different boundary conditions and design parameters were considered, such as welding speed, natural convection, and cooling time and their influence on welding distortions and thermal residual stress were investigated. In the end, some interesting conclusions and future directions were discussed.

2. Methodology. - Figure 1 shows the structural components hierarchy of the hull structure. At the lowest scale, the thin plate is usually reinforced with different stiffeners to form a stiffened plate. Then, the combinations of different stiffened plates will yield a panel and several panels will lead to the deck of the hull structure. In this study we mainly developed a numerical model for the stiffened yacht panel. The numerical model of the panel structure includes a thin plate, a girder, and a multiple stiffener arrangement are analyzed using three different methodologies.

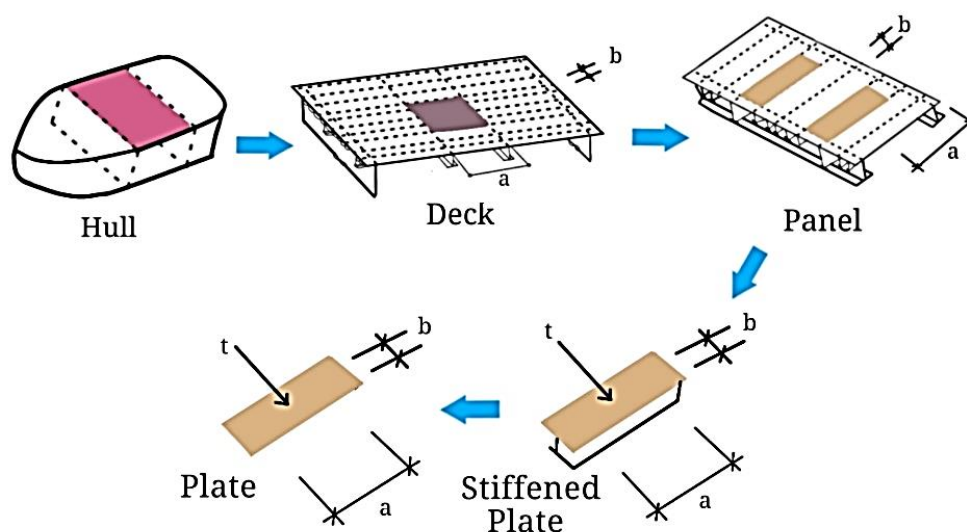


Figure 1. Structural components hierarchy of the hull structure

2.1. Thermo-Mechanical Modeling Procedure. - All numerical simulations were performed using ANSYS software. The numerical solution was obtained by performing numerical simulations using three different methodologies. Each with its unique set of boundary conditions and loads to capture the physics behind the process. These are presented in more detail in the next section. In addition to thermo-mechanical loading case, the sequential coupling of the thermal model with the structural model were also used. The typical numerical simulation process adopted in this study is shown in Figure 2. First, the steady state or transient heat transfer thermal analysis was performed, which simulated the idealized and more realistic welding process. The temperature fields acquired were then used as the external load on the mechanical model [11]. Thermal expansion and non-uniform shrinkage will generate internal stresses, strains, and distortions.

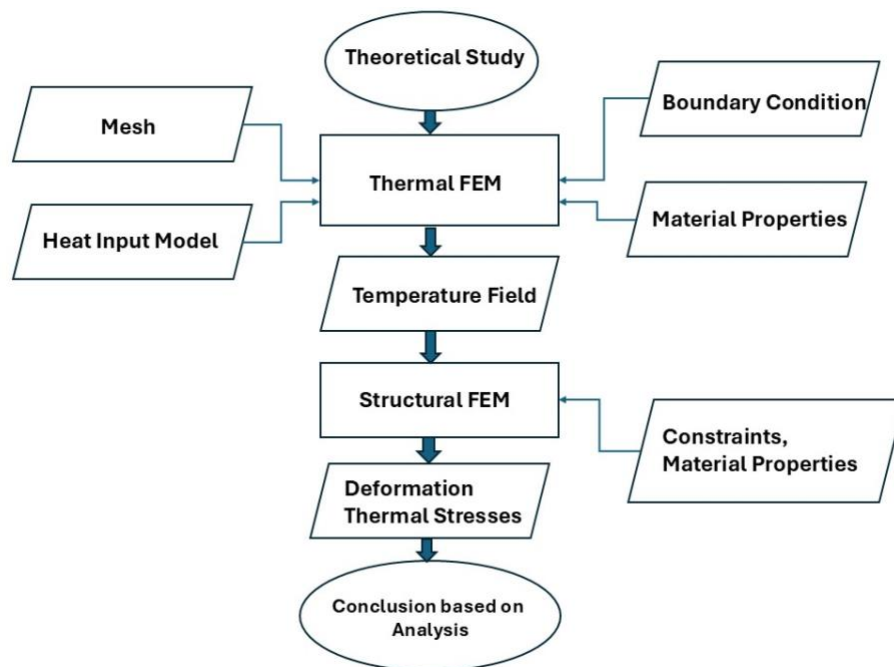


Figure II. Numerical Simulation Process

2.2. Thermal Analysis. - The temperature field at each node during the welding process on the welding seam is acquired by solving the non-linear mathematical model depicted in equation 1. The thermal loads achieved are transient in nature.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

Here, C_p is the specific heat that signifies the total energy needed to establish the specimen's required temperature gradient [10]. It represents the conservation of energy and is written in a differential form which includes distributed volume, heat flux, and specific heat. The governing equation uses a cartesian coordinate system. K_x , K_y , and K_z represent thermal conductivities. " τ " is time, " \dot{q} " is total heat input present in a moving Gaussian heat source. Equation (1) is solved by using equation (2) with boundary conditions [22] and the heat source. To simplify the analysis, we ignored the radiation boundary condition.

$$-\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} - \alpha q_\tau \quad (2)$$

2.3. Heat Source. - The heat source is one of the key input parameters for any welding process. Various mathematical models are used in the literature to represent different types of welding processes. A 3D Gaussian heat source model is typically used to model laser or electron beams. Similarly, Goldak's double ellipsoid heat source model was used for

arc welding. To capture the penetration effect, the front and rear ellipsoid can be calibrated. In this study heat input was given by equation (3) with η denote the welding efficiency, I and U represent current and voltage, respectively [23].

$$Q = \eta UI \quad (3)$$

The double ellipsoid heat model's power intensities that include the front and rear quadrant are given in Equations (4) & (5) [22].

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{bc a_f \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3\frac{x^2}{a_f^2}} \cdot e^{-3\frac{y^2}{b^2}} \cdot e^{-3\frac{z^2}{c^2}} \quad (4)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{bc a_r \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3\frac{x^2}{a_r^2}} \cdot e^{-3\frac{y^2}{b^2}} \cdot e^{-3\frac{z^2}{c^2}} \quad (5)$$

Here, Q is the rate of energy input, f_f and f_r are the fractional factors representing the total heat deposited, a_f , a_r , b and c are constant heat source parameters. The values are $a_f = 5\text{mm}$, $a_r = 20\text{ mm}$, $b = 5\text{ mm}$, $c = 8\text{ mm}$.

A 3D Gaussian heat energy source uses the following heat model, which is the governing equation used in this study numerical simulations [24].

$$E = C_2 e^{-\frac{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2]}{C_1^2}} \cdot e^{-AC(z-z_0)} \quad (6)$$

Where E = heat energy, C_1 = radius of the beam, C_2 = source power intensity, AC is an absorption coefficient, the (x_0, y_0, z_0) represents the instantaneous coordinates of the center point of moving heat flux on its designated 'path'. The total distance is simply " $v \times t$ " from the initial point. Here, " v " represents the velocity of the moving heat source, and " t " is time. Beer-Lambert Law governs the energy transferred to the specified material at a certain " z " depth. This heat source model is applied in ANSYS in a time-stepped transient thermal analysis. The coordinates are changed with the corresponding time step. These time steps are calculated via welding speed and length of welding seams.

2.4. Boundary Conditions. - Boundary conditions plays a pivotal role in modeling. Ideally, we aimed to apply the conditions as close as real-life scenarios. Three different sets of boundary conditions were used. The first boundary condition was the temperature field at any given point on the surface. T_s was the temperature on the boundary [10].

$$Ts = Ts(x, y, z, t) \quad (7)$$

The moving heat flux qualified as a second boundary condition at any point on the surface.

$$-\lambda \frac{\delta T}{\delta n} = qs(x, y, z, t) \quad (8)$$

To increase the authenticity of the simulation, the natural convection by the surrounding media was introduced, which was the third boundary condition. The convection law of heat stated that the "Heat flux density from the surface object to the surrounding in unit time is directly proportional to the temperature difference between them".

$$-\lambda \frac{\delta T}{\delta n} = \alpha(Ts - Ta) \quad (9)$$

Where T_a is the ambient temperature, α is the convection heat transfer coefficient. Three boundary conditions used for three methodologies are shown in Figure 3:

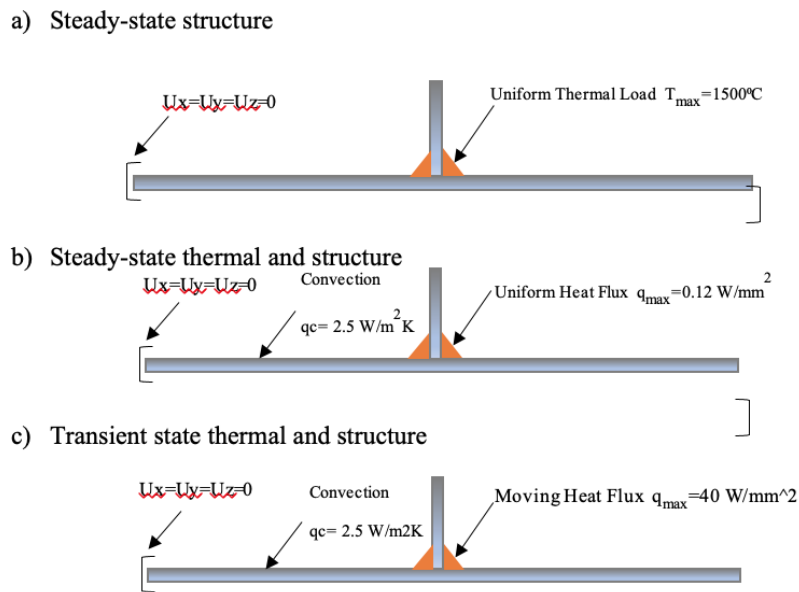


Figure III. Boundary Conditions used in three different simulation methodologies

2.5. Geometry. - In this study, we considered three stiffened yacht panels for simulation. The structure includes a thin plate, a girder, and a multiple stiffener arrangement. The dimensions of the plate are 1500mm x 1000mm, the girder is 1500mm x 65mm, and the stiffener is 475mm X 65mm, all with a thickness of 5 mm [25]. The dimensions of the steel plate are given in Figure 4. The CAD model of the stiffened panel was developed using SolidWorks.

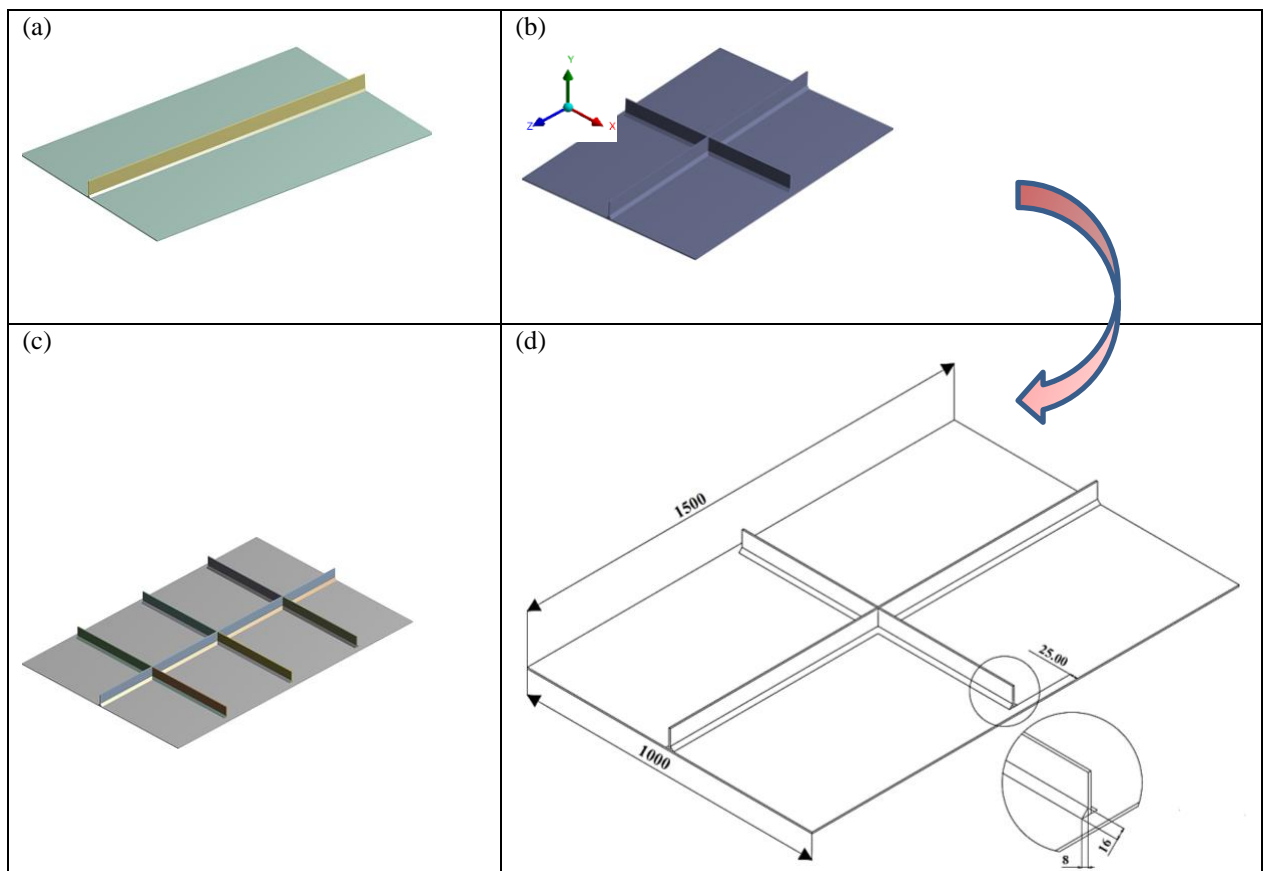


Figure IV. (a) Plate with girder, (b) plate with girder and two stiffeners, (c) plate with one girder and 6 stiffener (d) a sample 3D Cad model with detailed dimension of plate, girder and stiffener.

2.6. Mesh. - Overall, the mesh is comprised of non-uniform sizes and multiple thermal elements throughout the plate. Finer mesh is used close to moving heat sources, and it gradually becomes coarser closer to the end of the plates. Most refined mesh is on the welding seam region for better accuracy. To save the computational cost, appropriate mesh size was used after performing a mesh independent study. In this study, the same mesh size was used for both steady state heat transfer and transient heat transfer, i.e., the element size of weld seams and girder and thin plate was 12mm and 15 mm, respectively. A typical mesh is shown in Figure V.

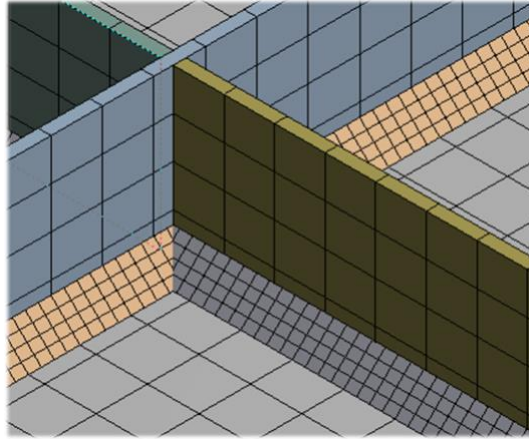


Figure V. A typical finite element mesh of of weld seams and girder and thin Plate

2.7. Material Properties. - The material of the panel was assumed to be Grade A36 steel. It is a common material used in shipyards and is known for its excellent mechanical properties and suitability for stiffened panels. Grade A36 offers a favorable balance of strength, ductility, and weldability, making it an ideal choice for various structural applications.

By utilizing A36 steel, we ensure the structural integrity and durability necessary for the effective performance of the ship panels in the study. Its properties are particularly beneficial in maintaining performance under the thermal and mechanical stresses associated with welding processes.

The properties of the material Grade A36 [25-27] are shown in the Table I. Gravity load is neglected in this study.

<i>Thermal Properties</i>		<i>Structural Properties</i>	
Thermal Conductivity	84 W/m.°C	Youngs Modulus	2E+11 Pa
Specific Heat	480 J/kg.°C	Bulk Modulus	1.67E+11 Pa
Coefficient of Thermal Expansion	1.2 e-05 C ⁻¹	Poisson's Ratio	0.3
		Shear Modulus	7.69 E+10 Pa
<i>Non-Linear Properties-Bilinear Isotropic Properties</i>			
Yield Strength	235 MPa		
Tangent Modulus	1400 MPa		

Table I. Thermo-mechanical Properties of Grade A steel

3. Results and Discussion. –

3.1. Numerical Simulation. - The numerical simulation of the welding process was carried out in this section based on the computational model developed in section 3. Thermal stresses were generated due to the heat transfer in the panel and as a result of plastic deformation. The bi-linear thermal-elastic-plastic simulation model was used in this study [28, 29]. Further extension and APDL codes were used in the latter part of the analysis to simulate transient cases [30].

The findings from this study align with other published research. For instance, a distortion simulator developed in [31] predicted welding and buckling distortion in shipbuilding with an accuracy of 80–98%. Another study [32] on aluminum hulls demonstrated that optimizing the welding sequence can reduce deformation by up to 52.1%, supporting the conclusions drawn in this research about the impact of welding sequences on minimizing distortion.

The aim of these simulations is to determine whether the proposed model can capture the welding phenomenon and how closely it can predict the welding induced deformations. Therefore, three numerical simulations methodologies were developed in this study to simulate the welding process on the yacht panels.

1. **Steady State Structure**
2. **Steady Thermal and Structure**
3. **Transient Thermal and Structure.**

Each methodology gave a different insight into the process of fabricating a thin yacht panel. Furthermore, during simulations it was explored that the following parameters affect the welding process.

- 1) Welding sequence-based deformation control
- 2) Effect of different types of Thermal Loads
 - a. Temperature
 - b. Heat Flux
 - c. Moving Heat Flux
- 3) Convection BC
- 4) Cooling phase.

In addition to the above welding process parameters, boundary conditions such as clamping location and differential heat can also affect the deformations. Following assumptions are made in simulations.

1. No phase change from solid to liquid.
2. Temperatures are maintained below the melting point of the material.

In this simulation, we assumed no phase change from solid to liquid, even though phase changes are common in welding. This assumption was made to simplify the model and reduce the complexity of the calculations.

Our main goal was to study the thermal effects and the structural behavior of the material at temperatures below its melting point, which is most relevant to this study.

By keeping the simulation within this temperature range, we could accurately model the process without adding complications related to phase changes. These assumptions are in line with the reference materials used for this research [28, 29, 30].

We also assumed that the welding process did not reach temperatures high enough to cause the material to melt. This scenario represents cases where controlled heat input is applied to avoid melting during welding. By maintaining temperatures below the material's melting point, we focused on understanding the thermal and mechanical effects without needing to model the complexities of melting and solidification. This approach is consistent with the methods used in previous research [25, 28, 29, 30].

Two boundary conditions are necessary to define the model.

1. Convection
2. Ambient Temperature of the body.

3.2. Steady State Methodology. - In the steady-state methodology, the temperature load was ramped from ambient 22 °C to the max. 1500 °C. This is an approximated temperature achieved by arc welding. There was uniform heating, and panels were allowed to cool and restore to initial conditions. The ends were kept fixed. The residual thermal stresses and total deformations fields were obtained during the process.

Later, I implemented a new approach that involves a **coupled analysis (steady-state Thermal + Structural Modules)** method in ANSYS. The second steady-state analysis involving both the thermal and structural modules was introduced to add additional layers of realism to the simulation.

While the initial steady-state structure methodology provided valuable insights into the structural response to temperature changes, the combined thermal-structural analysis enabled a more comprehensive understanding of how both temperature and mechanical effects interact simultaneously.

This adds "nuance" because the model now reflects how temperature changes within the material over time, influencing both thermal stresses and deformations in a more realistic way than just applying a static temperature load.

This method begins by calculating the temperature distribution through heat transfer, which is then utilized for the subsequent structural analysis.

By doing so, it enables a more realistic assessment of thermal stresses and deformations, accurately reflecting the localized heating and cooling associated with welding.

In comparison, the initial method presents a simplified perspective, assuming a uniform heat distribution, whereas the new approach integrates dynamic heat transfer, yielding more detailed insights into the thermal and mechanical behavior during the welding process.

3.3. Transient Methodology. - The purpose of this study was to develop a numerical model that captured the physics of welding process on a ship panel, i.e., the distortions and stresses must be simulated closer to the real process. Here the transient load was considered. A thermal load was not only a function of time but also a function of position as well.

A moving heat arc in welding travels through to the joint with speed defined by a welding machine or in a more conventional sense, by a welder. This moving heat source can only be simulated in Transient Modules of ANSYS. Figure 6 shows the moving heat flux in ANSYS. The velocity was defined by the speed at which the moving heat flux travels the weld bead. In practical life, it was adjusted by the welding machine, or estimation can be made considering the speed at which welders weld.

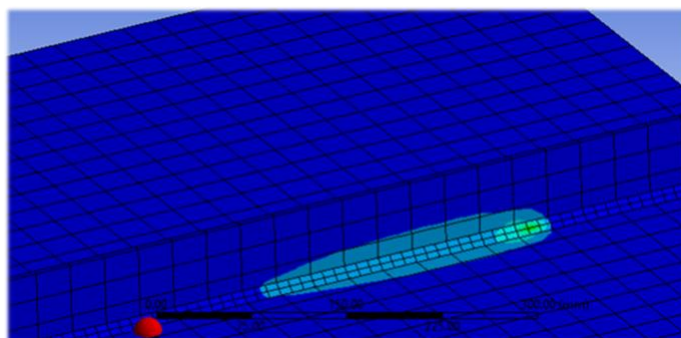


Figure VI. A typical shape of moving heat flux

Source power intensity was defined by the type of weld. It can also be adjusted to achieve the relevant temperatures of particular welding. Start time and end time were crucial, so it was defined by the classical equation of motion, i.e., distance=velocity x time.

The sequence of welds plays an important role. This can reduce the deformation in the structure [25]. Unlike the steady-state process, the transient analysis runs for the entire duration of the process. The welding sequence used in the current study is shown in Figure 7.

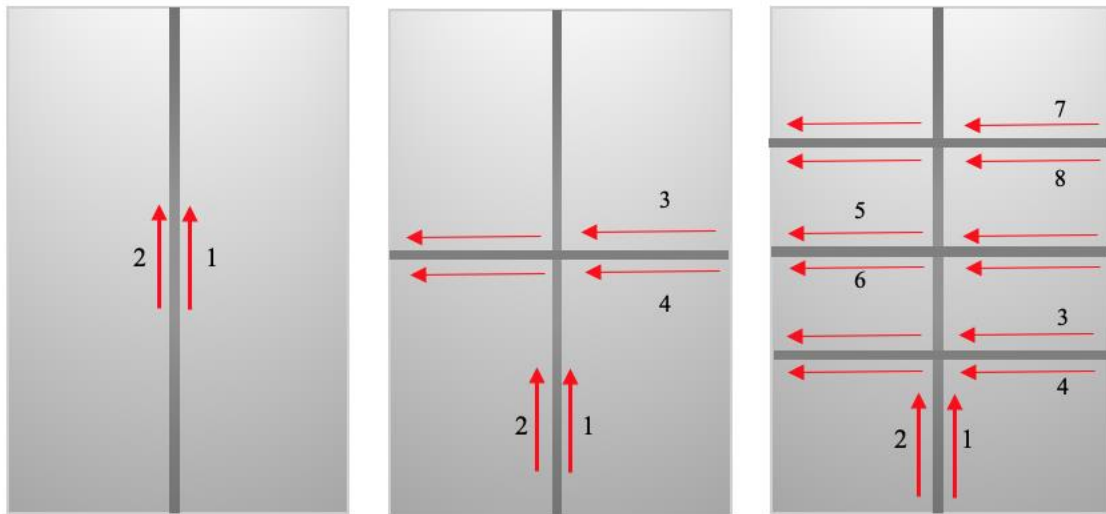


Figure VII. Welding Sequence followed in the numerical simulations.

Table II shows the comparison between the capability of different methodologies in capturing the total deformation in the panel. Result legends are different for steady-state and transient methods. Two trends can be seen, from left, to right the deformation is controlled. From Top to Bottom Effectiveness of methodologies in capturing the results and better deformation distribution can be seen.

Table II (a) case 01 (steady-state structure) presents the deformation caused by the heat load. This means rectification will be needed in real life for the panel to be used in ship construction. As expected, most deformation occurs at the loaded area. The maximum deformation occurred at peak load. In this methodology, the plastic deformation is reduced after the unloading of thermal loads as seen in Figure VIII. Table II (b) case 02 (steady-state structure) has additional stiffeners in the mid-section of the panel. This generated more stress and resulted in larger deformation. The girder and stiffener areas were largely affected regions. Areas that were fixed have little to no deformation. This shows the clamping has a positive effect on the control of deformation. Figure VIII shows a similar trend of deformation for case 02 as in the previous case. In Table II (c) case 03 (steady-state structure), the deformation was concentrated at the center of the panel, but the overall effect was lower than both case 01 (a) and case 02 (b). Figure VIII showed a trend that the deformation was reducing as more stiffeners were added, this happened due to the extra rigidity added by the stiffeners.

Table II (d), (e), and (f) case 01, case 02, and case 03 respectively also represents a steady-state methodology but with coupled thermal and structure modules in ANSYS. This helps in the introduction of heat flux as load and more detailed boundary conditions. The deformation becomes larger which means adding details to the methodologies reveals more information.

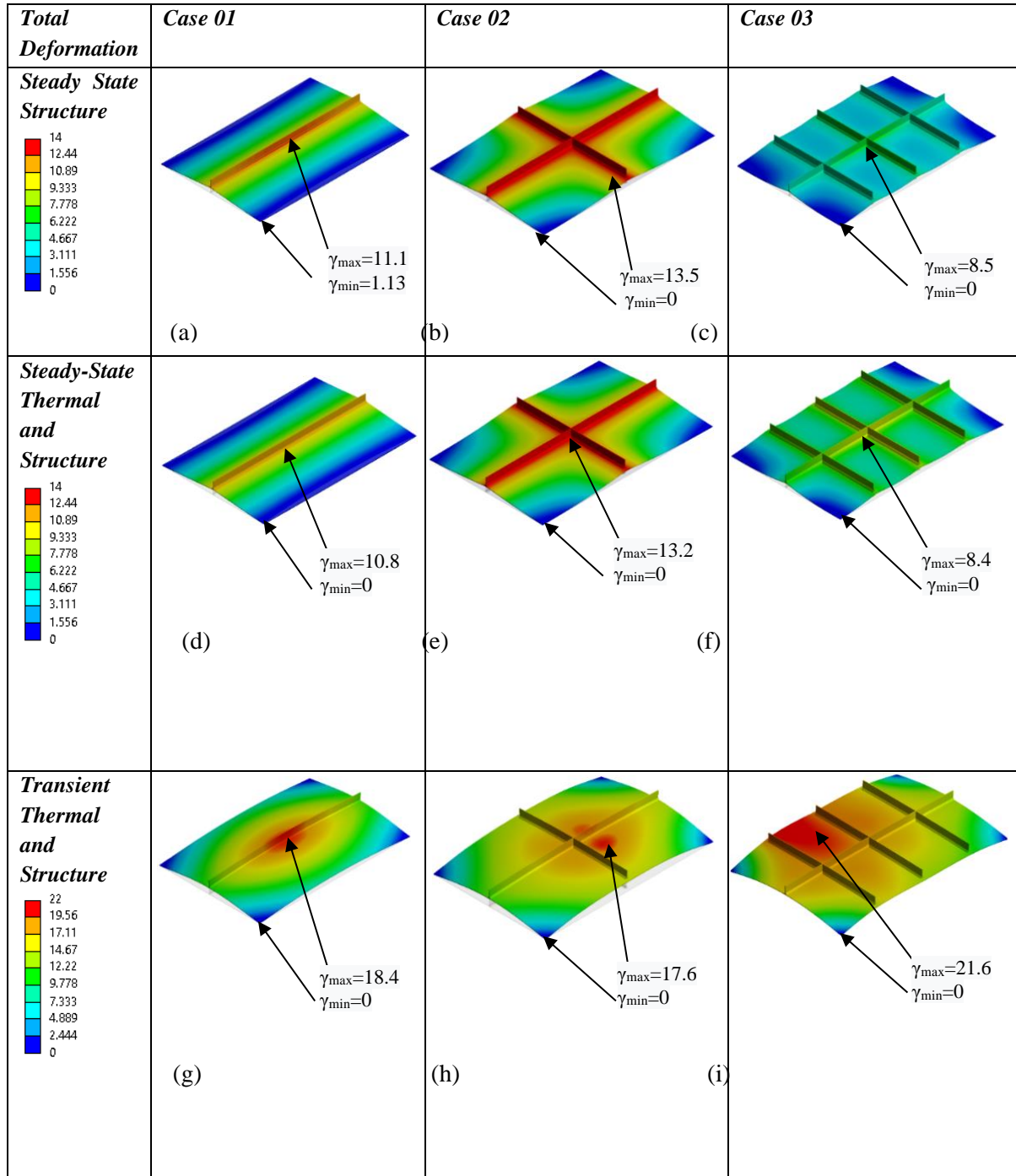


Table II. Total Deformation in panels.

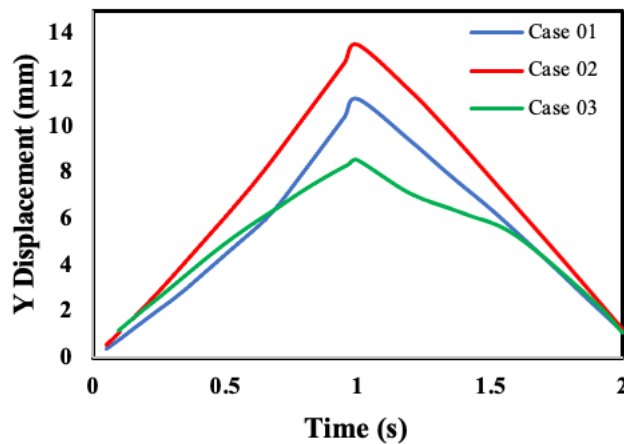


Figure VIII. Deformation Steady State at the maximum displacement location.

Transient Analysis gives the most accurate and detailed analysis of the physical phenomenon occurring in the results. The contours are more detailed and closer to reality. The flexibility to introduce other factors like convection, clamping, cooling, differential heat, and moving heat sources, made it a suitable choice.

In Table III (g) case 01 the transient analysis captures the deformation of the panel more accurately. In previous cases, the deformation occurred on girder and stiffeners but here a collective deformation of the panel can be seen. Mainly the deformation concentration was at the center of the plate. The panel was permanently de-shaped which is an actual occurrence in the fabrication of ship panels. The cooling effect did not reduce the deformation radically as in the steady-state case. It reached a peak of ~19 mm and cooling reduced it to ~17mm as seen in Figure IX. It can also be seen in Figure IX that the initial and endpoints are different. The unloading of loads in the transient case did not reduce the deformation and plastic deformation was captured.

Table III (h) case 02 followed the same trend and showed an increase in deformation. The deformation concentration in this analysis was seen to be distributed more realistically and did not reduce at all in the cooling phase. The previous cases showed a trend of increased deformation with the addition of extra stiffeners. In Table III (i) case 03 controlling the parameters like sequence, clamping, the convection effect can reduce the overall deformation as seen in the results. **The results were in agreement with the experimental results and show only a 5% of deviation [25].**

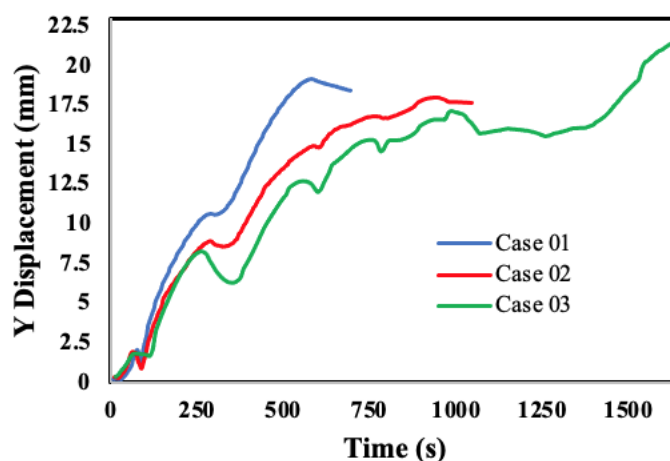


Figure IX. Deformation Transient State.

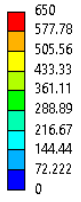
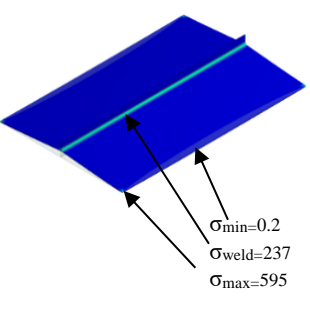
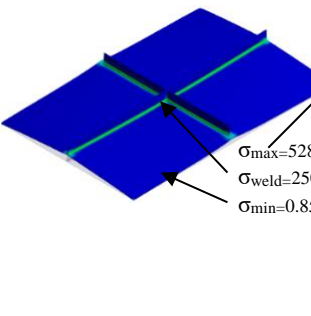
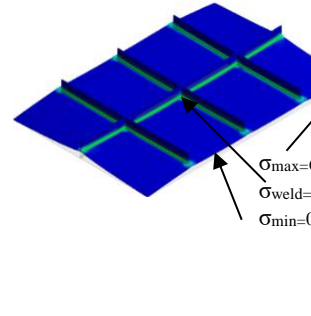

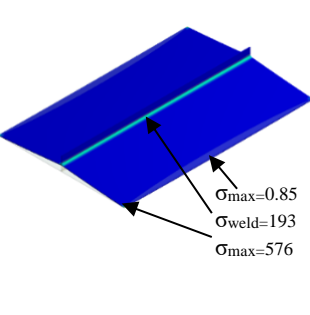
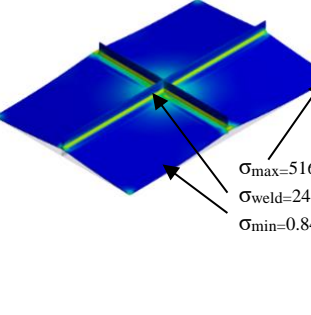
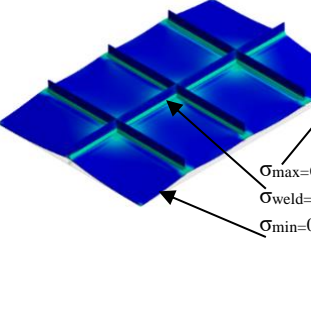
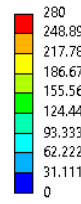
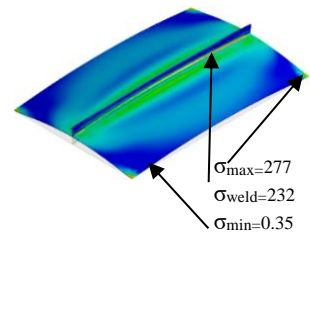
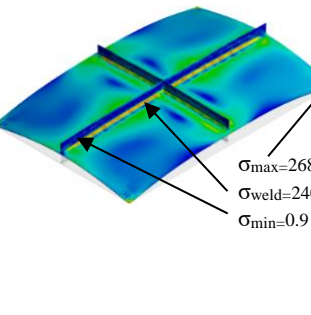
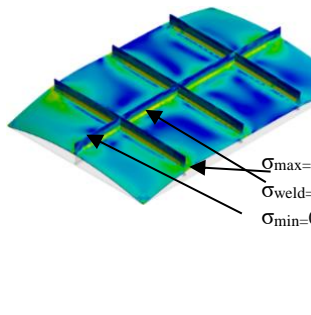
Thermal Stresses	Case 01	Case 02	Case 03
Steady State Structure 	 <p>$\sigma_{min}=0.2$ $\sigma_{weld}=237$ $\sigma_{max}=595$</p> <p>(a)</p>	 <p>$\sigma_{max}=528$ $\sigma_{weld}=250$ $\sigma_{min}=0.85$</p> <p>(b)</p>	 <p>$\sigma_{max}=630$ $\sigma_{weld}=241$ $\sigma_{min}=0.17$</p> <p>(c)</p>
Steady-State Thermal and Structure 	 <p>$\sigma_{max}=0.85$ $\sigma_{weld}=193$ $\sigma_{max}=576$</p> <p>(d)</p>	 <p>$\sigma_{max}=516$ $\sigma_{weld}=248$ $\sigma_{min}=0.84$</p> <p>(e)</p>	 <p>$\sigma_{max}=635$ $\sigma_{weld}=245$ $\sigma_{min}=0.85$</p> <p>(f)</p>
Transient Thermal and Structure 	 <p>$\sigma_{max}=277$ $\sigma_{weld}=232$ $\sigma_{min}=0.35$</p> <p>(g)</p>	 <p>$\sigma_{max}=268$ $\sigma_{weld}=240$ $\sigma_{min}=0.9$</p> <p>(h)</p>	 <p>$\sigma_{max}=236$ $\sigma_{weld}=200$ $\sigma_{min}=0.69$</p> <p>(i)</p>

Table III. Thermal Stresses

In Table III (a) case 01, it can be seen that the majority of the stresses were along with the weld bead, there was a minute effect of welding at the fixed corners. Figure X gives a qualitative view of the thermal stresses which reach out to 500 MPa and was well above the plastic limit. It is to be noted that the stresses reduce as the cooling phase starts, the reduction of stresses does not go to the level of the initial state, and there remain the residual stresses in the panel. In Table III (b) case 02 a larger stress concentration was observed at the corners and the middle of the panel while the weld seams remain dominant in stress as expected also residual stresses are larger in this case. In Table III (c) case 03

The thermal stresses were mainly concentrated at the weld part; the distribution was larger as compared to previous cases. The stresses reach the peak value of >600 MPa as seen in Figure X but the cooling phase reduces the majority of the stresses. There was a considerable amount of residual stress.

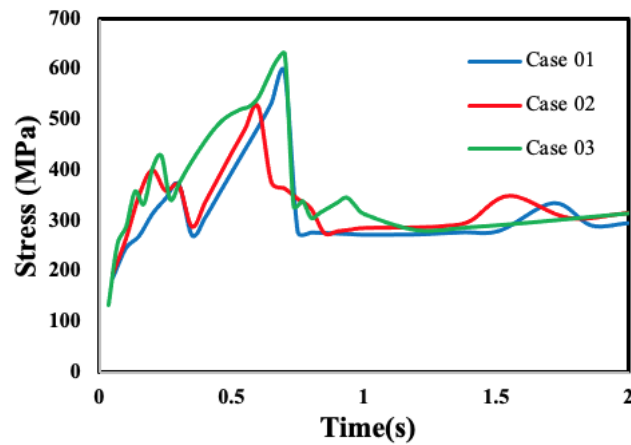


Figure X. Thermal Stresses Steady State.

Table 3 (d) case 01, 3 (e) case 02, and 3 (f) case 03 reveals a higher value of stresses. This was due to the introduction of heat flux, and convection which better captures the physical phenomenon.

In Table III (g) case 01 the stresses captured represented the right trends. The previous methodologies captured the stress concentration at the corners (fixed ends). But the values were extremely large and hence suggested an error. The transient case also showed a similar trend, but the values were just above the yield strength of the material which was reasonable. This suggested that excessive plastic deformation is present at the corners. The values in Table III (a to f) are high enough to cause a fracture. As seen in Figure XI there is a fluctuation in stresses throughout the simulation. It was because of the following reasons: The nonlinearity of the system and transient nature of simulation. This causes instability to the system which affects the results. This can be reduced by adopting the following measure, i.e., refined Mesh and decreased the step size. Although these measures will significantly increase the computational time of the process. The graph in Figure XI also represents the cooling time taken by the different methodologies. The diamond shape legend shows the start of cooling of a panel due to natural convection.

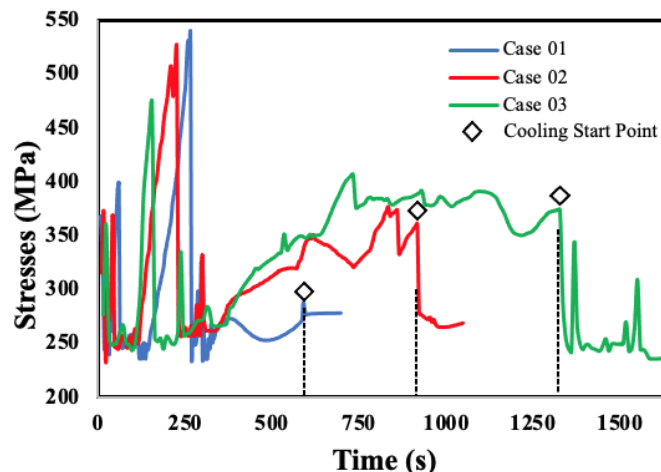


Figure XI. Thermal Stresses Transient State.

Table III (h) shows thermal stresses that agree with the ongoing trend. The max value of stress is less. The overall stress values were lower than those captured in previous methodologies.

This also showed that the right sequence of welds can reduce the residual stress considerably. Table 3 (i) was the most complex case of all and required much more computational time.

The stress concentration at the corners was very high. The sequential weldment of stiffeners can reduce overall residual stresses and deformation. The residual stresses were present and at some points were above the yield strength of the material. But the majority of the area was less affected.

4. Conclusion. - In this study we concluded that the thermo-mechanical modeling approach with transient heat transfer analysis with moving source and elastic-plastic material model are an optimal solution to carry out prediction study of deformation and residual stresses. The deformation acquired with the proposed models were compared with results of deformation from the literature. Good agreement in the deformation results were observed with error of less than 5% [17]. This validates the numerical model of the analysis.

The study highlights several key findings. First, temperature loads in the steady-state heat transfer analysis may not fully represent real manufacturing conditions due to uniformity not being observed in practice. However, using a moving heat flux overcomes this limitation by better simulating real welding scenarios. Second, the sequentially coupled transient thermal and structure module in ANSYS offers a more accurate depiction of the welding process, with numerical results closely matching experimental data (within 5% accuracy) [17]. Lastly, the control of parameters like weld sequence, cooling, and clamping significantly influences deformation. Panels with more stiffeners, despite their complexity, performed better in this study. These findings underscore the importance of optimizing these factors to enhance welding outcomes. Future research could explore refining these simulations for other materials or welding techniques, further improving accuracy and industrial applicability.

References

- [1] K. Fattaneh Morshedsolouk, Mohammad, "Parametric study on average stress-average strain curve of composite stiffened plates using progressive failure method," *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2014.
- [2] B. C. Cerik, S.-R. J. J. o. m. S. Cho, and Technology, "Numerical investigation on the ultimate strength of stiffened cylindrical shells considering residual stresses and shakedown," vol. 18, no. 4, pp. 524-534, 2013.
- [3] S. Li and S. J. O. E. Benson, "The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels," vol. 231, p. 108839, 2021.
- [4] D. Podder, O. P. Gupta, S. Das, and N. R. J. W. i. t. W. Mandal, "Experimental and numerical investigation of effect of welding sequence on distortion of stiffened panels," vol. 63, no. 5, pp. 1275-1289, 2019.
- [5] M. M. Khalilabad, Y. Zedan, D. Texier, M. Jahazi, and P. J. J. o. M. P. Bocher, "Effect of tool geometry and welding speed on mechanical properties of dissimilar AA2198-AA2024 FSWed joint," vol. 34, pp. 86-95, 2018.
- [6] T. Tchoumi, F. Peyraut, and R. J. J. o. M. P. T. Bolot, "Influence of the welding speed on the distortion of thin stainless steel plates—Numerical and experimental investigations in the framework of the food industry machines," vol. 229, pp. 216-229, 2016.
- [7] V. Farajkhah and Y. J. T. I. J. o. A. M. T. Liu, "Effect of clamping area and welding speed on the friction stir welding-induced residual stresses," vol. 90, no. 1, pp. 339-348, 2017.
- [8] U. Kumar, D. Gope, J. Srivastava, S. Chattopadhyaya, A. Das, and G. J. M. Krolczyk, "Experimental and numerical assessment of temperature field and analysis of microstructure and mechanical properties of low power laser annealed welded joints," vol. 11, no. 9, p. 1514, 2018.
- [9] Z. Chen, Z. Chen, and R. A. J. O. E. Sheno, "Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure," vol. 106, pp. 271-280, 2015.
- [10] Y. Zhang and Y. J. M. S. Wang, "The influence of welding mechanical boundary condition on the residual stress and distortion of a stiffened-panel," vol. 65, pp. 259-270, 2019.
- [11] Y. Kim, J. Kim, and S. J. A. S. Kang, "A study on welding deformation prediction for ship blocks using the equivalent strain method based on inherent strain," vol. 9, no. 22, p. 4906, 2019.
- [12] K. Masubuchi and N. J. W. J.-.-N. Y.-.-. Ich, "Computer analysis of degree of constraint of practical butt joints," vol. 49, no. 4, p. 166, 1970.
- [13] C. Wu and J.-W. J. T.-W. S. Kim, "Numerical prediction of deformation in thin-plate welded joints using equivalent thermal strain method," vol. 157, p. 107033, 2020.
- [14] L. Li, D. Liu, S. Ren, H.-g. Zhou, and J. J. S. Zhou, "Prediction of Welding Deformation and Residual Stress of a Thin Plate by Improved Support Vector Regression," vol. 2021, 2021.
- [15] S. J. S. Zhang and O. Structures, "A review and study on ultimate strength of steel plates and stiffened panels in axial compression," vol. 11, no. 1, pp. 81-91, 2016.
- [16] W.-y. Wang, B. Liu, and V. J. J. o. m. i. c. e. Kodur, "Effect of temperature on strength and elastic modulus of high-strength steel," vol. 25, no. 2, pp. 174-182, 2013.
- [17] M. T. Ali and R.-F. J. A. o. D. d. J. U. o. G. F. X. S. Teodor, "Control of welding deformation in thin plate," vol. 41, pp. 113-120, 2018.
- [18] K. Niklas and J. J. O. e. Kozak, "Experimental investigation of Steel–Concrete–Polymer composite barrier for the ship internal tank construction," vol. 111, pp. 449-460, 2016.
- [19] Y. Liu, N. Ma, F. Lu, and H. J. J. o. M. P. Fang, "Measurement and analysis of welding deformation in arc welded lap joints of thin steel sheets with different material properties," vol. 61, pp. 507-517, 2021.
- [20] J. D. Russell, "Application of laser welding in shipyards," in *Lasers in Material Processing*, 1997, vol. 3097, pp. 174-183; International Society for Optics and Photonics.
- [21] N. J. J. o. s. p. McPherson, "Thin plate distortion—the ongoing problem in shipbuilding," vol. 23, no. 02, pp. 94-117, 2007.
- [22] Z. Samad, N. Nor, and E. Fauzi, "Thermo-Mechanical Simulation of Temperature Distribution and Prediction of Heat-Affected Zone Size in MIG Welding Process on Aluminium Alloy EN AW 6082-T6," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 530, no. 1, p. 012016; IOP Publishing.
- [23] D. Kollár, B. G. Kövesdi, and J. J. P. P.-C. E. Nézö, "Numerical simulation of welding process—application in buckling analysis," vol. 61, no. 1, pp. 98-109, 2017.

- [24] A. Support. (2021). *Moving Heat Source*. Available: <https://catalog.ansys.com/product/5b3bc6857a2f9a5c90d32e7e/moving-heat-source?creator=ANSYS%20Inc>
- [25] A. M. Taha, "Experimental Analysis To Control Welding Deformation In Thin Plate," in *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 2019, vol. 2019, pp. 24-26.
- [26] T. Sirisatien, S. Mahabunphachai, and K. J. M. T. P. Sojiphan, "Effect of submerged arc welding process with one-side one-pass welding technique on distortion behavior of shipbuilding steel plate ASTM A131 grade A," vol. 5, no. 3, pp. 9543-9551, 2018.
- [27] A. Mostafanejad, M. Iranmanesh, and A. J. O. E. Zarebidaki, "An experimental study on stress corrosion behavior of A131/A and A131/AH32 low carbon steels in simulated seawater," vol. 188, p. 106204, 2019.
- [28] H. Nishikawa, I. Oda, M. Shibahara, H. Serizawa, and H. Murakawa, "Three-dimensional thermal-elastic-plastic FEM analysis for predicting residual stress and deformation under multi-pass welding," in *The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2004: OnePetro.
- [29] S. S. Antman, "Nonlinear plasticity," in *Nonlinear Problems of Elasticity*: Springer, 1995, pp. 603-628.
- [30] A. Savas. (2021). *Ansys apdl code for moving heat source*. Available: https://www.researchgate.net/post/Ansys_apdl_code_for_moving_heat_source_in_welding_simulation_having_problem_for_local_coordinate_system
- [31] Lee, C., S. Woo, and J. Kim, Impact Analysis of Welding Sequence to Reduce Weld Deformation in Aluminum Hulls. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024. 12(9): p. 1604.
- [32] Cheon, Y.-J., B.-G. Kang, and D.-J. Lee. An Automatic Welding and Buckling Distortion Analysis Using 3D-CAD Models of Hull Structure. in *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*. 2023. ISOPE.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

SA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

MA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

AAZ has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Diseño Sismorresistente de un Sistema de Muros Estructurales Aplicando la Norma E.030 del 2003 y 2018 en la Ciudad de La Libertad

Earthquake Resistant Design of a Structural Wall System applying Standard E.030 of 2003 and 2018 in the City of La Libertad

Projeto Resistente a Terremotos de um Sistema Estrutural de Parede aplicando a Norma E.030 de 2003 e 2018 na Cidade de La Libertad

Marcos Josué Rupay Vargas ^{1,(*)}, Regner Raúl Parra Lavado ², Jorge Santiago López Yarango ³

Recibido: 15/05/2024

Aceptado: 12/10/2024

Resumen. - El análisis comparativo se centra en investigar las discrepancias entre las normativas E.030 de 2003 y 2018 en relación con el diseño antisísmico. Este estudio se realiza en el contexto de estructuras de muros estructurales destinadas para un Centro Educativo ubicado en la ciudad de La Libertad. Se contrastan varios aspectos importantes, como los períodos de vibración, el porcentaje de masa participativa, el espectro de diseño, la deformación y diversas fuerzas, tales como la fuerza cortante basal estática y dinámica, además de las fuerzas máximas de diseño, como el momento flector, el cortante y la fuerza axial.

Utilizando el software Etabs v.20 para modelar las estructuras, se observaron variaciones significativas en los resultados al aplicar las normas según el año del 2003 y 2018. Es relevante señalar que la normativa de 2018 produce resultados intermedios en cuanto a los períodos modales para ambas estructuras, tanto en el análisis estático como en el dinámico. En síntesis, se demuestra que las modificaciones en la normativa tienen una influencia notable en el diseño y la respuesta sísmica de las estructuras, especialmente en aquellas con irregularidades, y es fundamental tener en cuenta estos aspectos al llevar a cabo análisis y diseño estructural.

Palabras clave: Diseño sismorresistente; Análisis dinámico; Periodos de vibración; Espectro de diseño

(*) Autor de correspondencia.

¹ Maestro en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central “Juan Santos Atahualpa” (Perú), mrupay@uniscjsa.edu.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7891-1838>

² Maestro en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central “Juan Santos Atahualpa” (Perú), rparra@uniscjsa.edu.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3564-4637>

³ Maestro en Ingeniería Civil. Universidad Nacional del Centro del Perú (Perú), jlopez@uniscjsa.edu.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-8216-4928>

Summary. - *The comparative analysis focuses on investigating the discrepancies between the E.030 regulations of 2003 and 2018 in relation to anti-seismic design. This study is carried out in the context of structural wall structures intended for an Educational Center located in the city of La Libertad. Several important aspects are contrasted, such as vibration periods, percentage of participating mass, design spectrum, deformation and various forces, such as static and dynamic basal shear force, in addition to maximum design forces, such as moment bending, shear and axial force.*

Using the Etabs v.20 software to model the structures, significant variations in the results were observed when applying the standards according to the year 2003 and 2018. It is relevant to note that the 2018 regulations produce intermediate results in terms of modal periods for both. structures, both in static and dynamic analysis. In summary, it is shown that changes in regulations have a notable influence on the design and seismic response of structures, especially those with irregularities, and it is essential to take these aspects into account when carrying out structural analysis and design.

Keywords: *Seismic-resistant design; Dynamic analysis; Vibration periods; Design spectrum*

Resumo. - *A análise comparativa centra-se na investigação das discrepâncias entre os regulamentos E.030 de 2003 e 2018 em relação ao design anti-sísmico. Este estudo é realizado no contexto de estruturas estruturais de parede destinadas a um Centro Educacional localizado na cidade de La Libertad. Vários aspectos importantes são contrastados, como períodos de vibração, porcentagem de massa participante, espectro de projeto, deformação e forças diversas, como força cortante basal estática e dinâmica, além de forças máximas de projeto, como momento fletor, cisalhante e força axial.*

Utilizando o software Etabs v.20 para modelar as estruturas, foram observadas variações significativas nos resultados ao aplicar as normas de acordo com o ano de 2003 e 2018. É relevante notar que a regulamentação de 2018 produz resultados intermediários em termos de períodos modais para ambos. estruturas, tanto em análise estática como dinâmica. Em resumo, mostra-se que as alterações na regulamentação têm uma influência notável no dimensionamento e na resposta sísmica das estruturas, especialmente aquelas com irregularidades, sendo essencial ter estes aspectos em consideração na realização da análise e dimensionamento estrutural.

Palavras-chave: *Design resistente a sismos; análise dinâmica; Períodos de vibração; Espectro de design*

1. Introducción. - El análisis sísmico equivale a una inspección minuciosa que se efectúa en una estructura para garantizar que esté erigida de forma que pueda resistir terremotos, conforme a las directrices establecidas en la normativa de Diseño Sismorresistente E.030 (2003 y 2018).

La norma peruana E.030 de diseño sismorresistente ha sido actualizada a lo largo del tiempo por diversos motivos, comenzando con su primera versión en 1970, que incorporaba experiencias de terremotos significativos desde 1940 hasta 2001, y luego la actualización del comité Visión 2000 que llevó a la norma de 2003 [1]. Estas actualizaciones se extendieron hasta las ediciones de 2016 y 2018, donde, mediante análisis numéricos, se estableció un nuevo mapa de riesgo sísmico en contraste con el vigente hasta la fecha de 2003. Según [2], Lima, la capital del Perú, presenta una mayor probabilidad de experimentar un sismo de gran magnitud, lo que justifica que las actualizaciones de la norma E.030 sigan en constante investigación, abarcando aspectos de zonificación, estructuración, seguridad y economía. En esta investigación se realiza la comparación de dos normativas relevantes, considerando las normas [3] y [4]. También se examinará cómo varía el análisis de estructuras regulares conforme a los tres periodos autorizados por la normativa, mientras que para las estructuras irregulares se evaluará la diferencia en el análisis estático, dado que la normativa no lo admite.

Primero, se verifica que el edificio sea lo suficientemente rígido para soportar las sacudidas de un terremoto. Esto implica comprobar que no se doblará o colapsará fácilmente durante un evento sísmico. Luego, se calculan las fuerzas que se generarían dentro de las partes del edificio durante un terremoto. Estas fuerzas son como los empujones y tirones que experimentarían las diferentes partes del edificio debido a la sacudida sísmica. Con esta información [5], los ingenieros pueden diseñar cada parte del edificio para resistir estas fuerzas, asegurando así que el edificio permanezca en pie y seguro.

Por último, se determina cómo separar el edificio de otros edificios cercanos en caso de un terremoto. Esto es importante para evitar que los edificios se dañen mutuamente si se mueven durante el terremoto.

El estudio se realiza mediante un software específico denominado ETABS V.20, que organiza la estructura del edificio en tres ejes (X, Y, Z), pero da prioridad a los ejes X e Y como los más significativos para el análisis sísmico. Este enfoque se denomina análisis pseudotridimensional.

2. Parámetros de edificación. -

2.1. Factor de Zona “Z”. - Es esencial reconocer los principales factores sísmicos que influyen en las fuerzas de diseño, considerando las modificaciones presentes en las regulaciones de diseño sísmico E.030 de 2003 y 2018. Estos parámetros son elementos clave que influyen en la forma en que se calculan las fuerzas que un terremoto ejerce sobre un edificio o estructura. Algunos de estos factores podrían abarcar la localización geográfica del emplazamiento de construcción, el historial de actividad sísmica en la zona, la categorización de los tipos de suelo locales, así como la intensidad y la frecuencia anticipada de los terremotos, entre otros aspectos.

NORMA 2003		NORMA 2018		VARIACIÓN
Zona	Z (g)	Zona	Z (g)	V(%)
3	0.40	4	0.45	11.12
2	0.30	3	0.35	11.12
1	0.15	2	0.25	11.12
		1	0.10	11.12

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla I. Factor de Zonificación.

2.2 Condiciones Geotécnicas: Factor “S”, Factor “TP” y Factor TL. - En las ediciones de la normativa de 2016 y 2018, se añadió una nueva variable denominada TL, que indica [6] el inicio de la zona espectral con un desplazamiento constante.

En el área de La Libertad, se registró una reducción en los coeficientes de suelo S, específicamente para los terrenos catalogados como blandos o de baja calidad. Sin embargo, para los suelos característicos de La Libertad, que son suelos

blandos (designados como S3), no hubo modificaciones en el factor S según las normativas del 2018. Para estos suelos S3, la norma (2018) asigna un factor S de 1.10. Además, los períodos cortos y largos para estos suelos son constantes en todas las normativas, siendo TP = 1.0 segundos y TL = 1.6 segundos.

NORMA 2003		NORMA 2018		VARIACIÓN
Zona	Suelo	Zona	Suelo	V (%)
3	S ₃	4	S ₃	-
	1.40		1.10	21.43
T_p	T_L	T_p	T_L	-
0.90	-	1.00	1.60	10.00

Tabla II. Factores de Condiciones Geotécnicas
Fuente: Elaboración Propia.

2.3 Coeficiente de Amplificación Sísmica “C”. - Las normativas sísmicas suelen actualizarse para considerar estos elementos. En la Tabla 3 se presentan las modificaciones y las nuevas consideraciones que deben tenerse en cuenta conforme a las regulaciones revisadas. Uno de los cambios notables está vinculado al período de vibración natural de la estructura, que representa el tiempo necesario para que la vibración complete un ciclo completo. Este período tiene un impacto directo en el factor C.

NORMA 2003		NORMA 2018		VARIACIÓN
Condiciones	C	Condiciones	C	V (%)
C ≤ 2.5	2.5 $\left(\frac{T_p}{T}\right)$	$T < T_p$	2.5	10.00
		$T_p < T < T_L$	2.5 $\left(\frac{T_p}{T}\right)$	100.00
		$T > T_L$	2.5 $\left(\frac{T_p \times T_L}{T^2}\right)$	100.00

Fuente: Elaboración Propia.
Tabla III. Factor de Amplificación Sísmica.

2.4 Factor de Uso “U”. - El valor del factor de importancia U permanece invariable en U=1.5, ya que se asigna a estructuras consideradas esenciales, clasificadas dentro de la categoría A2. Sin embargo, el coeficiente de reducción R, que influye en la consideración de la resistencia sísmica de una estructura en su diseño, puede variar dependiendo de la normativa y el tipo de estructura. En las normativas más recientes, como las de 2018, se han introducido nuevas consideraciones sobre las características estructurales que pueden influir en la capacidad de resistir terremotos. Esto incluye la forma en que se diseñan y construyen diferentes tipos de estructuras, como los pórticos, así como las irregularidades que pueden presentar en altura (Ia) y en planta (Ip).

NORMA 2003 Y 2018		VARIACIÓN
Categoría	Factor U	V (%)
A	1.5	-
B	1.3	-
C	1.0	-
D	(*)	-

Fuente: Elaboración Propia.
Tabla IV. Factor de Importancia

2.5 Sistema Estructura y Coeficiente Básico de Reducción de la Fuerza Sísmica “Ro”. - El coeficiente básico de reducción R_o se mantiene constante para los muros estructurales en $R_o = 6$, lo que significa que no ha habido cambios significativos en cómo se considera la resistencia de este tipo de estructuras en las últimas actualizaciones de la normativa.

Sin embargo, las irregularidades en altura y en planta han sido objeto de cambios en las normativas más recientes, como se detalla en la Tabla 5. Estas modificaciones indican un conocimiento más profundo sobre cómo ciertos aspectos del diseño pueden influir en la capacidad de una estructura para soportar terremotos.

NORMA 2003 y 2018	VARIACIÓN	
	R_o	V (%)
Sistema Estr.		
Pórticos	8.00	-
Dual	7.00	-
Muros Estructurales	6.00	-
Muros Ductilidad Limitada	4.00	-

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla V. Irregularidades en Planta y en Altura

2.6 Coeficiente de Reducción de la Fuerza Sísmica “R”. - Este coeficiente "R" experimenta variaciones según el tipo de sistema estructural principal presente en la dirección donde se lleva a cabo el análisis. Esta cantidad se calcula considerando cuánta resistencia sería ideal para que la estructura se comporte elásticamente, es decir, sin sufrir daños permanentes. Sin embargo, esta cantidad ideal se ajusta mediante el factor "R", que tiene en cuenta el tipo de sistema estructural utilizado en la construcción. Dicho de otra manera, el factor "R" modifica la cantidad de resistencia necesaria dependiendo de la eficacia del sistema estructural para resistir fuerzas laterales.

El coeficiente ajustado refleja cómo las características específicas de la edificación pueden influir en su capacidad para resistir las fuerzas sísmicas.

$$E. 030 (2003) \rightarrow R = 1$$

$$E. 030 (2018) \rightarrow R = R_o \times I_a \times I_p$$

2.7. Regularidad Estructural. - Previo a llevar a cabo un análisis sísmico de una estructura, es esencial evaluar si la misma puede ser clasificada como regular o irregular, siguiendo las directrices establecidas en la normativa. Esta clasificación tiene un efecto directo en el coeficiente "R", el cual es fundamental para evaluar la capacidad de la estructura para resistir las fuerzas sísmicas. La tabla proporciona pautas concretas para esta clasificación, lo que simplifica la selección del enfoque apropiado para el análisis y diseño sísmico de la estructura.

Para cumplir con las regulaciones establecidas la [7], menciona que en el artículo N°22 de la normativa actual NTE E.030 y determinar los procedimientos de análisis, es necesario clasificar las estructuras en categorías de regulares o irregulares.

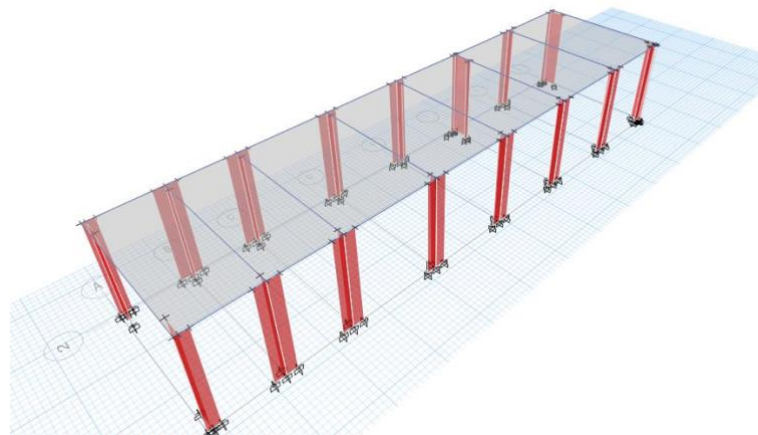


Figura I. Dimensiones de las esquinas entrantes. Fuente: Elaboración Propia.

Según [7], nos comenta que las estructuras identificadas como irregulares son aquellas que exhiben una o más de las condiciones enumeradas en la Tabla N°8 y Tabla N°9 de la normativa NTE E.030. Si una estructura presenta cualquiera de las irregularidades enumeradas en las tablas de la normativa, se considera irregular y se deben realizar evaluaciones específicas para determinar cómo estas irregularidades afectan su capacidad para resistir fuerzas sísmicas. Esto implica verificar y clasificar cada irregularidad para calcular los coeficientes correspondientes que ayudarán a ajustar los factores de diseño y asegurar que la estructura sea segura ante eventos sísmicos.

Inicialmente, en esta investigación se considerará que la edificación analizada es regular. Después de modelar la estructura, [7] se examinarán las posibles irregularidades, como la irregularidad de piso blando, la irregularidad extrema de rigidez, la irregularidad torsional y la irregularidad torsional extrema.

2.8. Modelo Estructural de Análisis. - Se empleó el software ETABS Versión 20 para llevar a cabo el análisis sísmico del edificio. Este programa permite realizar un análisis pseudotridimensional, lo que implica simular el comportamiento tridimensional del edificio mediante un enfoque simplificado. En este análisis, el software modela los muros y los pórticos planos como elementos estructurales interconectados, en los cuales las losas funcionan como diafragmas rígidos que vinculan estos elementos.

Esta característica posibilita la distribución de los desplazamientos entre los diversos elementos estructurales en cada dirección de análisis, lo cual optimiza la concordancia de los desplazamientos y ofrece una representación más exacta del comportamiento sísmico del edificio.

Se optó por usar elementos [8] de tipo "Frame" para modelar las vigas y columnas del edificio, mientras que se emplearon elementos de tipo "Wall" para los muros estructurales. Estos elementos están diseñados para soportar diferentes tipos de cargas, como corte, flexión y fuerzas axiales, características típicas de las estructuras de concreto armado.

Es esencial emplear conexiones rígidas al modelar los nodos del edificio para garantizar su adecuada representación. Estas conexiones rígidas, conocidas como brazos rígidos, funcionan como vínculos entre los elementos estructurales, asegurando la estabilidad del sistema. Siguiendo las recomendaciones del programa, [7] se ha establecido un factor de 0.5 para la opción "Factor de zona rígida".

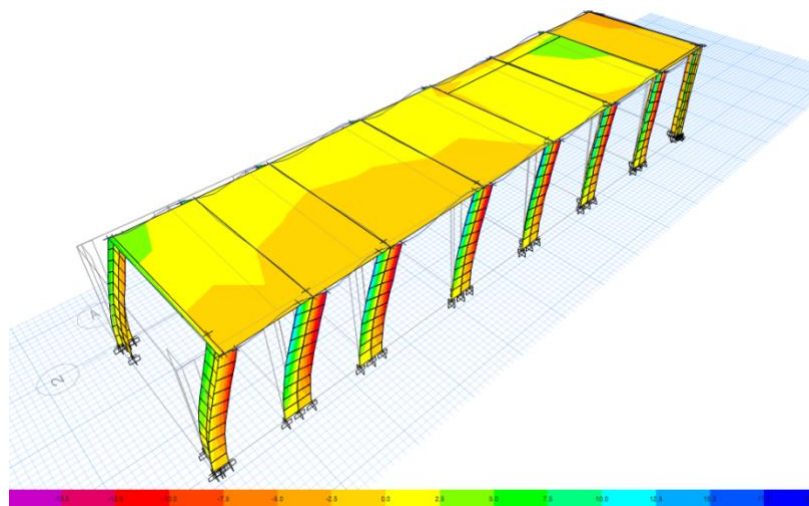
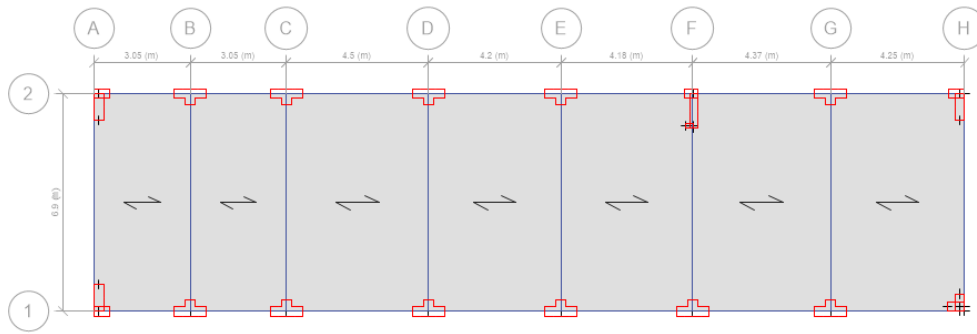


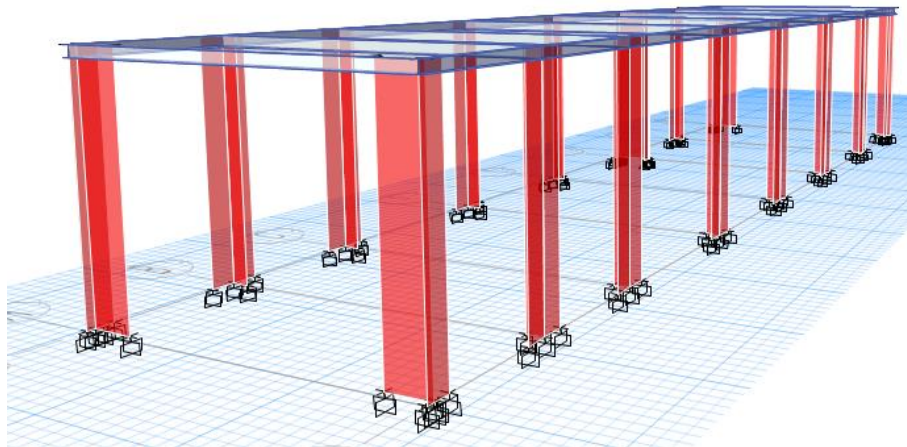
Figura II. Modelamiento en el ETABS V.20 empleando la Norma E.030 (2003)

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura III. Modelo Estructural en Planta del Proyecto (ETABS V.20)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura IV. Modelo Estructural en 3D con la Norma E.030 (20018)

2.8.1 Incertidumbres en modelos estructural de análisis. - En la aplicación de normativas de diseño sísmico es necesario el empleo de modelos de análisis sísmico de estructuras. En lo que sigue se comentan incertidumbres existentes en estos modelos, relacionadas con valores que se emplean para el módulo de elasticidad del concreto, y valores de momentos de inercia en elementos estructurales, propiedades que influyen de manera relevante en los periodos de vibrar de la estructura, y por tanto en la respuesta de ésta ante sismos. Adicionalmente se comentan incertidumbres que existen en el cómputo de la respuesta sísmica de estructuras irregulares, así como se muestran limitaciones del análisis modal convencional.

Variabilidad del módulo de Elasticidad del concreto. - El módulo de elasticidad del concreto es un parámetro relevante en el cómputo de demandas sísmicas en estructuras, ya que interviene de manera importante en la rigidez lateral de una estructura, y por tanto en los periodos de vibrar de ésta, relacionados directamente con los valores de demandas sísmicas especificadas en los espectros de diseño. Esto sugiere la necesidad de evaluar resultados de procedimientos existentes en normativas para el cómputo del módulo de elasticidad del concreto y comparar estos resultados con resultados experimentales.

Análisis sísmico en edificaciones irregulares. - Las estructuras irregulares se caracterizan por amplifican las demandas sísmicas en ellas, las que no se pueden conocer de manera confiable con procedimientos de análisis sísmicos elásticos comunes que se emplean en la práctica. Esto implica que es deseable limitar el empleo de estructuras irregulares, e incluso prohibirlas en zonas de alta sismicidad y en estructuras importantes, como se muestra en la tabla N°10 de la norma vigente E.030 de 2018.

2.9. Análisis dinámico por combinación espectral. - De acuerdo con [7], menciona que las regulaciones establecidas en la Norma E.030 actual, el método utilizado para evaluar un edificio puede ser aplicado de manera general a cualquier tipo de estructura. Por ejemplo, en este caso, el análisis dinámico puede ser llevado a cabo utilizando diversas técnicas, como la combinación espectral o el análisis de registro de tiempo. En esencia, se simula cómo respondería la estructura ante diferentes niveles de fuerzas sísmicas en un intervalo específico de frecuencias.

Utilizar un espectro inelástico significa que se tiene en cuenta la posibilidad de que la estructura experimente deformaciones plásticas durante un evento sísmico. Esto ofrece una descripción más precisa de cómo la estructura responde ante los terremotos.

PARÁMETROS SÍSMICOS		
Z	0.45	<i>Pacanga- Chepén- La Libertad</i>
U	1.5	<i>Educación-A2</i>
C	2.5	
S	1.10	<i>EMS</i>
Tp	1.0	<i>EMS</i>
TL	1.6	<i>EMS</i>
Rx	6.0	<i>Muros Estructurales (Regular)</i>
Ry	6.0	<i>Muros Estructurales (Regular)</i>

Tabla VI. Parámetros sísmicos. Fuente: Elaboración Propia.

Norma E.030 (2003)			Norma E.030 (2018)		
T (seg)	C	Sai	T (seg)	C	Sai
0.00	2.500	0.3500	0.00	2.500	0.3094
0.10	2.500	0.3500	0.20	2.500	0.3094
0.20	2.500	0.3500	0.40	2.500	0.3094
0.30	2.500	0.3500	0.60	2.500	0.3094
0.40	2.500	0.3500	0.80	2.500	0.3094
0.50	2.500	0.3500	1.00	2.500	0.3094
0.60	2.500	0.3500	1.40	1.786	0.2210
0.70	2.500	0.3500	1.80	1.235	0.1528
0.80	2.500	0.3500	2.20	0.826	0.1023
0.90	2.500	0.3500	2.60	0.592	0.0732
1.00	0.541	0.3150	3.00	0.444	0.0550
1.20	0.457	0.2625	3.50	0.327	0.0404
1.50	0.364	0.2100	4.00	0.250	0.0309
1.70	0.254	0.1853	4.50	0.198	0.0244
2.00	0.189	0.1575	5.00	0.160	0.0198
2.50	0.154	0.1260	6.00	0.111	0.0138
3.00	0.105	0.1050	7.00	0.082	0.0101
3.50	0.086	0.0900	8.00	0.063	0.0077
4.00	0.063	0.0788	9.00	0.049	0.0061

Tabla VII. Valores de C y Sai de la Norma E.030 del 2003 y 2018. Fuente: Elaboración Propia.

Este espectro se ha elaborado utilizando los parámetros sísmicos recomendados en el Estudio de Microzonificación Sísmica (EMS), así como las disposiciones establecidas en las normativas E-030 (2003 y 2018).

El espectro de diseño es una representación gráfica que muestra cómo varía la respuesta de la estructura ante diferentes frecuencias de excitación sísmica. Está basado en factores como la aceleración máxima esperada, la duración del movimiento sísmico y otros parámetros relevantes que se obtienen del EMS y de la normativa E-030.

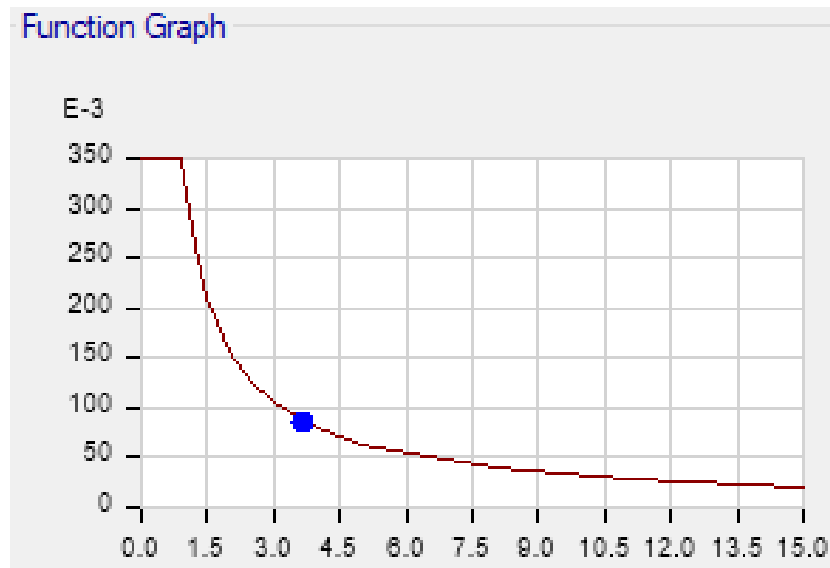


Figura V. Análisis Dinámico por Combinación Espectral según la Norma E.030 (2003)
Fuente: Elaboración Propia.

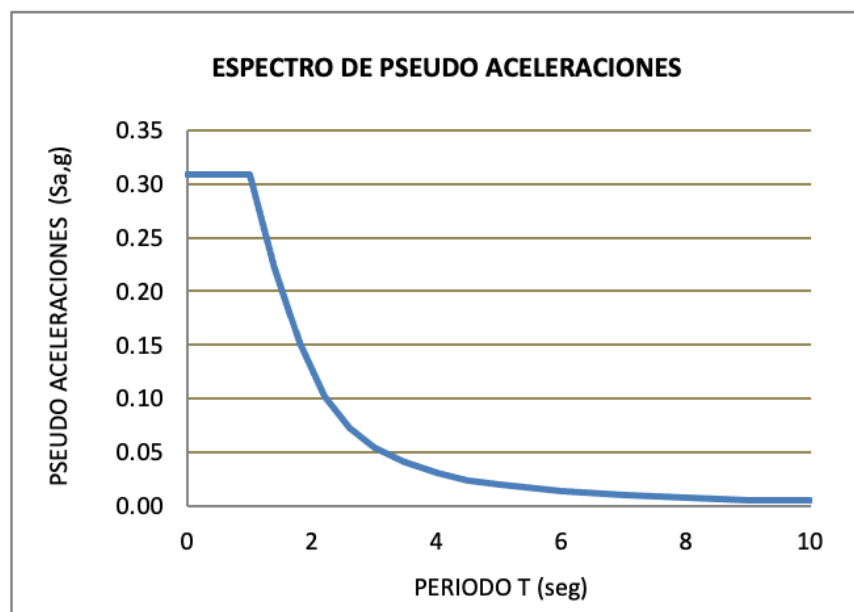


Figura VI. Análisis Dinámico por Combinación Espectral según la Norma E.030 (2018)
Fuente: Elaboración Propia.

2.10. Modos y periodos. - Se determino los mods de vibración de la estructura. Debido a que cada nivel posee 3 grados de libertad y hay 1 piso, en total se generan 3 modos de vibración (ver Tabla VIII).

Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad ² /sec ²
1	0.152	6.57	41.282	1704.1994
2	0.121	8.235	51.7398	2677.012
3	0.119	8.432	52.9799	2806.8671
4	0.054	18.382	115.4999	13340.2158
5	0.029	34.929	219.4632	48164.1117
6	0.027	37.337	234.594	55034.3462
7	0.019	53.288	334.8183	112103.3253
8	0.015	65.5	411.5458	169369.9449
9	0.015	66.996	420.9482	177197.3641
10	0.014	70.713	444.3032	197405.3017
11	0.013	76.02	477.6448	228144.5225
12	0.013	76.984	483.7073	233972.7929

SpecCase	ModalCase	Mode	Period sec
SISMO X	Modal	1	0.152
SISMO X	Modal	2	0.121
SISMO X	Modal	3	0.119
SISMO X	Modal	4	0.054
SISMO X	Modal	5	0.029
SISMO X	Modal	6	0.027
SISMO X	Modal	7	0.019
SISMO X	Modal	8	0.015
SISMO X	Modal	9	0.015
SISMO X	Modal	10	0.014
SISMO X	Modal	11	0.013
SISMO X	Modal	12	0.013

SpecCase	ModalCase	Mode	Period sec
SISMO Y	Modal	1	0.152
SISMO Y	Modal	2	0.121
SISMO Y	Modal	3	0.119
SISMO Y	Modal	4	0.054
SISMO Y	Modal	5	0.029
SISMO Y	Modal	6	0.027
SISMO Y	Modal	7	0.019
SISMO Y	Modal	8	0.015
SISMO Y	Modal	9	0.015
SISMO Y	Modal	10	0.014
SISMO Y	Modal	11	0.013
SISMO Y	Modal	12	0.013

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla VIII. Resultado de los Periodos y Modos según la Norma E.030 (2003)

En la dirección Y-Y, el primer modo de vibración posee un período de 0.152 segundos y representa el 99.52% de la masa participativa. En la dirección X-X, el tercer modo de vibración exhibe una masa participativa del 93.68%, con un período de 0.119 segundos.

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX
Modal	1	0.152	0.001	0.9952	0	0.001	0.9952	0	0.9952
Modal	2	0.121	0.0621	3.841E-05	0	0.0631	0.9952	0	3.841E-05
Modal	3	0.119	0.9368	0.001	0	0.9999	0.9962	0	0.001
Modal	4	0.054	0.0001	0.0036	0	0.9999	0.9998	0	0.0036
Modal	5	0.029	1.027E-05	0.0002	0	0.9999	1	0	0.0002
Modal	6	0.027	0.0001	1.217E-05	0	1	1	0	1.217E-05
Modal	7	0.019	1.509E-06	4.88E-06	0	1	1	0	4.88E-06
Modal	8	0.015	1.161E-06	5.354E-07	0	1	1	0	5.354E-07
Modal	9	0.015	0	4.687E-06	0	1	1	0	4.687E-06
Modal	10	0.014	1.614E-06	0	0	1	1	0	0
Modal	11	0.013	0	3.59E-06	0	1	1	0	3.59E-06
Modal	12	0.013	1.441E-06	0	0	1	1	0	0

Figura VII. Factores de Dirección Modal según la Norma E.030 (2018)

Fuente: Elaboración Propia.

Durante los análisis llevados a cabo, se determinó que los tres primeros modos de vibración de la estructura abarcan prácticamente toda la masa involucrada en el movimiento. Esto implica que estos modos reflejan de manera efectiva el movimiento de la mayor parte de la masa de la estructura durante un evento sísmico.

En la dirección X, el modo de vibración principal es el modo 2, el cual explica el 96.23% de la masa que participa en el movimiento. Esto sugiere que la mayor parte del movimiento sísmico en la dirección horizontal X está dominado por las características de vibración asociadas con el segundo modo.

Modo	Periodo	Ux	Uy	Rz
1	0.154	0.0044	0.9946	0.0006
2	0.126	0.9623	0.005	0.0348
3	0.118	0.0334	0.0004	0.9646
Sumatoria (%)		100.00	100.00	100.00

Tabla IX. Resultado de los Periodos y Modos según la Norma E.030 (2018)

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, en la dirección Y, el modo de vibración principal es el modo 1, el cual explica el 99.46% de la masa que participa en el movimiento.

Case	Periodo (T)	UX	%X	UY	%Y
Modo 1	0.411	0.0004	0.04%	0.6508	65.1%
Modo 2	0.429	0.7265	72.65%	0.0004	0.04%

Tabla X. Resultado de los Periodos y Modos según la Tesis de Análisis y diseño estructural sismo resistente de un centro comercial de 5 niveles ubicado en Trujillo – La Libertad

Como se puede tener en cuenta que según, [9] la tesis titulada “Análisis y diseño estructural sismo resistente de un centro comercial de 5 niveles ubicado en Trujillo – La Libertad” se toma mucha importancia los dos primeros modos ya que presentan la mayor masa participativo.

La suma de masa participativa en el contexto de la vibración de un edificio se refiere a cómo las diferentes masas del edificio (como paredes, pisos y techos) contribuyen a su comportamiento vibracional bajo ciertas condiciones. A través de estos modos, proporciona una comprensión integral de su comportamiento dinámico, lo que es fundamental para su diseño y seguridad.

- ✓ **Análisis de Seguridad:** Comprender todos los modos de vibración es esencial para el diseño y la evaluación de la seguridad estructural, especialmente en zonas sísmicas o con vientos fuertes.
- ✓ **Optimización del Diseño:** La representación de estos modos permite a los ingenieros optimizar la masa y la rigidez del edificio, mejorando su rendimiento y reduciendo costos.
- ✓ **Adaptación a Cargas Reales:** Al tener en cuenta múltiples modos de vibración, se puede anticipar cómo el edificio reaccionará a diferentes tipos de cargas, asegurando que se mantenga funcional y seguro en diversas condiciones.

2.11. Control de desplazamiento laterales. - Según [7] las directrices actuales de la normativa NTE 2018 E.030, para estructuras regulares, los desplazamientos laterales se calcularán multiplicando por 0.75R, y en el caso de estructuras irregulares, se empleará el valor de R sin ningún ajuste.

En esta situación, al suponer en primera instancia que la estructura es regular, se emplea el coeficiente de 0.75R, el cual se incorpora en el programa ETABS. Esto se realiza con el propósito de obtener directamente los desplazamientos inelásticos de la estructura.

La Norma Peruana fija un límite para el mayor desplazamiento relativo entre pisos en edificaciones de Concreto Armado. Los valores máximos de deriva en las direcciones X-X e Y-Y se detallan en la tabla 10.

X-X	NORMA 2003			NORMA 2018			VARIACIÓN
	X	Y	Z	X	Y	Z	V (%)
DIRECCIÓN							
Traducción (m)	0.000087	0.000030	0.000011	0.001251	0.000095	0.000007	65.94
Rotación (rad)	0.000009	0.000018	0.000002	0.000024	0.000292	0.000008	77.11
Derivas	0.000019	0.000006	-	0.000269	0.000020		76.47

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XI. Resultados de Desplazamientos Laterales según la Norma E.030 en el Eje X-X

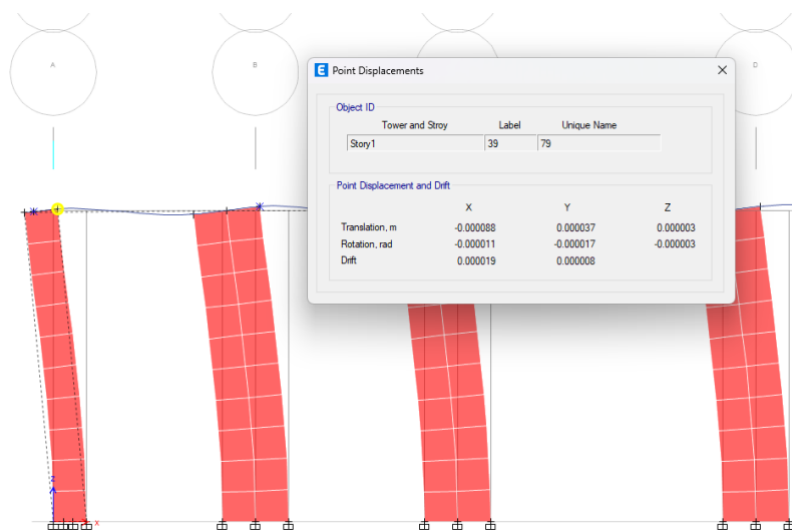
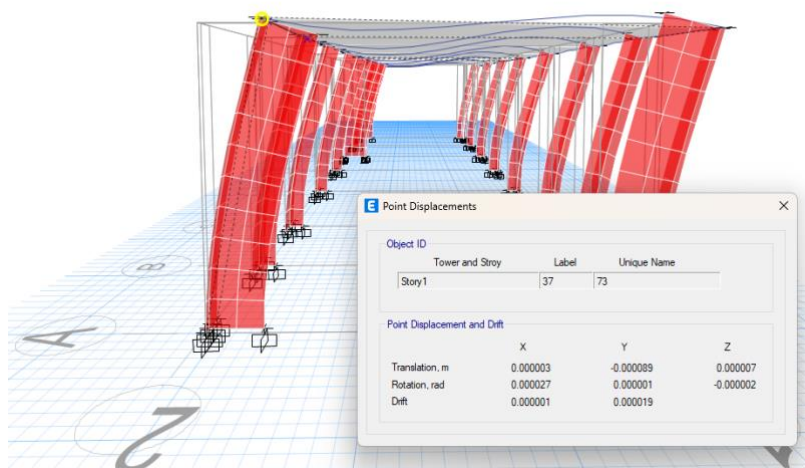


Figura VIII. Puntos de Desplazamiento en el Etabs v.20 en el Eje X-X. Fuente: Elaboración Propia.

Y-Y DIRECCIÓN	NORMA 2003			NORMA 2018			VARIACIÓN
	X	Y	Z	X	Y	Z	V (%)
Translación (m)	0.000003	0.000089	0.000007	0.000204	0.002125	0.008308	98.09
Rotación (rad)	0.000027	0.000001	0.000002	0.000584	0.000040	0.000025	94.96
Derivas	0.000001	0.000019	-	0.000044	0.000457		96.79

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XII. Resultados de Desplazamientos Laterales según la Norma E.030 en el Eje Y-Y



Fuente: Elaboración Propia.

Figura IX. Puntos de Desplazamiento en el Etabs v.20 en el Eje Y-Y.

Desplazamiento Máximo y Desplazamientos Relativos de Entrepiso según La Norma E.030 (2018)

Eje X-X

El desplazamiento relativo es de 0.0012, lo que indica que el primer nivel se ha desplazado respecto al nivel superior una cantidad equivalente a 0.0012 veces la altura del entrepiso. Para entender mejor este desplazamiento, es importante tener en cuenta que se trata de una deriva inelástica. Esto significa que se ha considerado la deformación plástica en la estructura, lo que indica que la estructura ha experimentado cierto grado de deformación permanente durante el evento sísmico.

NIVEL	CASO SISMICO	DERIVA ELASTICA	DERIVA INELASTICA (0.75R)
PISO 1	Dxx Max	0.000270	0.0012

NIVEL	CASO SISMICO	Desplaz. Abs. Máx. (cm)	Desplaz. Relativ. Máx. (cm)
PISO 1	Dxx Max	0.13	0.03

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XIII. Desplazamiento Máximo y Desplazamientos Relativos en el Eje X-X

En esta situación, el cálculo arroja una deriva inelástica de 0.0012, la cual es inferior al límite máximo aceptado para estructuras de concreto armado, fijado en 0.0070.

El desplazamiento máximo relativo de entrepiso, que es una medida precisa del movimiento entre dos niveles consecutivos, se fija en 0.03 cm. Este valor representa la cantidad de movimiento experimentado por el nivel inferior en relación con el nivel superior. En el nivel inferior, el desplazamiento máximo relativo de entrepiso es de 0.0012, lo

que indica una deriva inelástica dentro de los límites permitidos por la normativa para estructuras de concreto armado. Por lo tanto, el desplazamiento real entre niveles adyacentes es de 0.03 cm.

Eje Y-Y

En este caso, la deriva inelástica asociada a este desplazamiento es de 0.0021, indicando la cantidad de deformación permanente sufrida por la estructura durante un evento sísmico.

Es relevante destacar que este valor de 0.0021 para la deriva inelástica es inferior al límite máximo permitido para estructuras de concreto armado, establecido en 0.0070. Esto implica que la estructura cumple con los criterios de la normativa respecto a los desplazamientos máximos relativos entre pisos, ya que la deformación plástica se mantiene dentro de los límites establecidos.

NIVEL	CASO SISMICO	DERIVA ELASTICA	DERIVA INELASTICA (0.75R)
PISO 1	Dyy Max	0.000457	0.0021

NIVEL	CASO SISMICO	Desplaz. Abs. Máx. (cm)	Desplaz. Relativ. Máx. (cm)
PISO 1	Dyy Max	0.21	0.05

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XIV. Desplazamiento Máximo y Desplazamientos Relativos en el Eje Y-Y

El desplazamiento máximo relativo de entrepiso, que corresponde al movimiento real entre dos niveles adyacentes, se establece en 0.05 cm. Este valor representa la magnitud del movimiento experimentado por el primer nivel en comparación con el nivel superior. En el primer nivel, el desplazamiento máximo relativo de entrepiso es de 0.0021. El desplazamiento real entre niveles adyacentes es de 0.05 cm.

3. Discusión de Resultados. -

3.1. Cortante de diseño. - Según lo estipulado en la normativa actualizada NTE E.030 (2018), en cada dirección de análisis, la fuerza cortante en el edificio debe ser al menos el 80% del valor calculado por el método estático para estructuras regulares y no menos del 90% para estructuras irregulares. Si la fuerza cortante derivada del análisis dinámico es inferior a estos porcentajes, se requiere aumentarla para cumplir con los mínimos especificados.

3.2. Cortante Estática (Ve). - En la dirección X-X:

E.030	Dirección	Periodo	C	C/R	V estática (Tn)	80% V estática (Tn)	Variación (%)
2003	x-x	0.152	2.5	0.42	2.7806	2.22448	94.27
2018		0.154	2.5	0.42	48.5312	38.8250	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XV. Cuadro comparativo de las Cortantes Estático en el Eje X-X

En la dirección Y-Y:

E.030	Dirección	Periodo	C	C/R	V estática (Tn)	80% V estática (Tn)	Variación (%)
2003	y-y	0.119	2.5	0.42	1.7401	1.39208	96.43
2018		0.118	2.5	0.42	48.7141	38.9713	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XVI. Cuadro comparativo de las Cortantes Estático en el Eje Y-Y

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Step Label	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf
Story1	Dead	LinStatic				Top	64.4407	0	0
Story1	Dead	LinStatic				Bottom	137.0548	0	0
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	1		Top	0	0.055	1.7401
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	1		Bottom	0	0.055	1.7401
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	2		Top	0	-0.6826	0.017
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	2		Bottom	0	-0.6826	0.017
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	3		Top	0	2.7806	-0.09
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	3		Bottom	0	2.7806	-0.09
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	4		Top	0	0.0977	0.8212
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	4		Bottom	0	0.0977	0.8212
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	5		Top	0	-0.158	0.616
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	5		Bottom	0	-0.158	0.616
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	6		Top	0	-0.4942	-0.1965
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	6		Bottom	0	-0.4942	-0.1965
Story1	Modal	LinModEigen	Mode	7		Top	0	-0.1409	0.2535

Figura X. Historia de Fuerzas para determinar el cortante Estático en Etabs V.20

Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Cortante Dinámica (Vdin). - La fuerza de corte dinámica en la base del edificio se calculó mediante un análisis dinámico combinado con la superposición modal.

E.030	Dirección	V dinámica (Tn)	80% V estática (Tn)	Variación (%)
2003	X-X	35.1194	2.22448	26.69
2018		47.9054	38.8250	

E.030	Dirección	V dinámica (Tn)	80% V estática (Tn)	Variación (%)
2003	Y-Y	35.0996	1.39208	27.40
2018		48.3481	38.9713	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XVII. Cuadro comparativo de las Cortantes Dinámico en el Eje X-X, Y-Y.

En la dirección X-X, se requiere aumentar las fuerzas en un 26.69%, mientras que en la dirección Y-Y el incremento será del 27.40%, según se detalla en la Tabla XVI.

Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Step Label	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf	T tonf-m
Modal	LinModEigen	Mode	8		Top	0	-0.1868	0.1268	7.1763
Modal	LinModEigen	Mode	8		Bottom	0	-0.1868	0.1268	7.1763
Modal	LinModEigen	Mode	9		Top	0	0.0347	0.3927	7.8671
Modal	LinModEigen	Mode	9		Bottom	0	0.0347	0.3927	7.8671
Modal	LinModEigen	Mode	10		Top	0	0.2567	0.1006	-6.039
Modal	LinModEigen	Mode	10		Bottom	0	0.2567	0.1006	-6.039
Modal	LinModEigen	Mode	11		Top	0	0.1024	-0.4425	-13.4157
Modal	LinModEigen	Mode	11		Bottom	0	0.1024	-0.4425	-13.4157
Modal	LinModEigen	Mode	12		Top	0	0.2874	-0.0082	-10.3231
Modal	LinModEigen	Mode	12		Bottom	0	0.2874	-0.0082	-10.3231
SISMO X	LinRespSpec	Max			Top	0	35.1194	9.8654	981.9013
SISMO X	LinRespSpec	Max			Bottom	0	35.1194	9.8654	981.9013
SISMO Y	LinRespSpec	Max			Top	0	9.8708	35.0996	524.286
SISMO Y	LinRespSpec	Max			Bottom	0	9.8708	35.0996	524.286

Figura XI. Historia de Fuerzas para determinar el cortante Dinámico en Etabs V.20

Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Verificación del Coeficiente de Reducción de la Fuerza Sísmica “R”. - La configuración de la estructura consiste en muros estructurales en ambas orientaciones. Sin embargo, es necesario confirmar esta suposición inicial mediante el análisis del porcentaje de cortante basal que incide en los muros y los pórticos.

Dirección X-X	Norma E.030 (2003)		Norma E.030 (2018)	
	V (ton)	%	V (ton)	%
Placas	33.3749	95.03	42.5308	88.78
Columnas	1.7445	4.97	5.3746	11.22
Total	35.1194	100.00	47.9054	100.00

Dirección Y-Y	Norma E.030 (2003)		Norma E.030 (2018)	
	V (ton)	%	V (ton)	%
Placas	34.2032	97.45	43.6968	90.38
Columnas	0.8964	2.55	4.6513	9.62
Total	35.0996	100.00	48.3481	100.00

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla XVIII. Coeficiente de Reducción de la Fuerza Sísmica “R” según la Norma E.030

4. Conclusiones. - Este estudio emplea métodos aproximados para el cómputo de demandas de distorsiones de entrepiso en edificios regulares con diferentes estructuraciones sometidos a acciones sísmicas. Se consideró edificio con sistema estructural regular.

Se concluye que en el análisis sísmico aplicando la norma E.030-2018 en una edificación ubicada en la ciudad de La Libertad, influye significativamente en la resistencia de la edificación en comparación con la norma E.030-2008, esto debido a la diferencia de los parámetros sísmicos para un análisis dinámico espectral y estático, el cual se determina en función del cortante basal e irregularidad estructural. Una estructura tiene un mejor comportamiento sísmico cuando su configuración es regular ya que, las distorsiones relativas inelásticas están en función del factor de reducción, como ha sido el caso de la muestra estudiada.

La inclusión del término TL en el factor de amplificación sísmica (C) en la normativa E.030-2018 marca un avance significativo en el diseño sísmico de edificaciones, al considerar de manera más precisa las características estructurales y sísmicas de los edificios, especialmente aquellos con periodos largos. Este cambio refleja un esfuerzo por mejorar la seguridad y la resiliencia de las construcciones ante eventos sísmicos, lo que resulta en una normativa más completa y actualizada en comparación con la versión anterior.

Control de Desplazamiento Laterales

Para la Dirección X:

- **Traslación (X):** Se observa un aumento considerable en la traslación en la dirección X bajo la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003, con una variación porcentual del 65.94%. Esto sugiere que la estructura está experimentando una mayor demanda de desplazamiento horizontal en la dirección X bajo la norma actualizada.
- **Rotación (X):** También se registra un aumento significativo en la rotación en la dirección X bajo la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003. Este aumento en la rotación indica una mayor demanda en la capacidad de la estructura para resistir fuerzas de torsión inducidas por el sismo.
- **Derivas (X):** No se proporciona un valor específico para las derivas en la dirección X bajo la norma de 2018. Sin embargo, bajo la norma de 2003, se observa un valor de deriva que indica una demanda en la capacidad de deformación de la estructura en esa dirección.

Para la Dirección Y:

- Traslación (Y): Se observa un aumento aún más significativo en la traslación en la dirección Y bajo la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003, con una variación porcentual del 98.09%. Esto indica una mayor demanda de desplazamiento vertical en la dirección Y bajo la norma actualizada.
- Rotación (Y): Al igual que en la dirección X, también se registra un aumento considerable en la rotación en la dirección Y bajo la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003. Esto sugiere una mayor demanda en la capacidad de la estructura para resistir fuerzas de torsión en esa dirección.

La Cortante Basal en Ambos ejes

Para la Dirección X-X:

- Se observa un aumento significativo en la fuerza cortante estática (V estática) para la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003. Este aumento se refleja en el valor calculado de V estática para 2018, que es 48.5312, en comparación con 35.1194 para 2003.
- La variación porcentual indica un aumento del 27.63% en la fuerza cortante estática entre las dos normas.
- Este aumento puede sugerir una mayor demanda en la resistencia de la estructura en la dirección X-X bajo la norma de 2018, lo que podría traducirse en una necesidad de diseño y construcción más robustos para cumplir con los nuevos estándares de seguridad sísmica.

Para la Dirección Y-Y:

- En esta dirección, se observa una disminución en la fuerza cortante estática (V estática) para la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003. El valor calculado de V estática para 2018 es 28.0797, en comparación con 35.0996 para 2003.
- La variación porcentual indica una disminución del 27.95% en la fuerza cortante estática entre las dos normas.
- Esta disminución puede sugerir que la estructura experimentaría una menor demanda de resistencia en la dirección Y-Y bajo la norma de 2018 en comparación con la norma de 2003.

5. Recomendaciones. - Se recomienda que, para el diseño de edificios, debe estar orientado hacia el uso de configuraciones arquitectónicas y estructurales regulares, de tal forma, que se eviten efectos como la torsión, o como los mecanismos de fallo típicos de “esquina entrante”. Estos efectos distorsionan por completo la respuesta de los edificios y reducen drásticamente su capacidad para disipar energía, aumentando su fragilidad y probabilidad de colapso.

Para el análisis sismorresistente se debe recomendar que las derivas dadas por el RNE E0.30 (2018) sean menores a las que demande, puesto que el territorio del Perú está expuesto a presentarse movimientos sísmicos en cualquier momento y la edificación tiene que tener la rigidez necesaria para poder contrarrestar este problema.

Referencias

- [1] J. Yopez, «“Desempeño sísmico de edificaciones esenciales”,» Propues.Vis. 2000, vol. 65, pp. 65-86, 1996.
- [2] C. & C. a. H. Tavera, «“ÁREAS PROBABLES DE RUPTURA SÍSMICA EN EL BORDE OCCIDENTAL DEL PERÚ, A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO ‘b’,”,» Soc. Geol. del Perú SGP., vol. 36, n° 1997, pp. 23-36, 2006.
- [3] N.T.E, «“Norma técnica de edificación”,» SENCICO, pp. 1-45, 2003.
- [4] R.N.E, «“RM-355-2018-VIVIENDA”,» SENCICO, 2018.
- [5] L. Z. C. B. a. S. D. S. L. S. Hampshire De C. Santos, «“Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures”,» Math. Model. Civ., vol. 9, n° 1, pp. 1-12, 2013.
- [6] D. L. C. A. R. R. Y. R. Jorge Eduardo, «ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN REGULAR E IRREGULAR DE», de ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN REGULAR E IRREGULAR DE, Lima, Revista Gaceta Técnica., 2021, p. 24.
- [7] M. H. G. M. S. D. León Ingaruca, «PUCP», de Comparación estructural y económica de edificio de 7 pisos ante cambio de la norma E.030 diseño sismorresistente, Lima, PUCP, 2018, p. 91.
- [8] E. R. Mejía Ruiz y H. O. Tintaya Landeo, «EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO MEDIANTE UN ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL DE UNA EDIFICACIÓN ESENCIAL DESTINADA A SERVICIOS DE SALUD EN LA CIUDAD DE LIMA», de EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO MEDIANTE UN ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL DE UNA EDIFICACIÓN ESENCIAL DESTINADA A SERVICIOS DE SALUD EN LA CIUDAD DE LIMA, Lima, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2024, pp. 65-89.
- [9] Gonzales Hualpa, Teobaldo Santiago y Reyes Lazo, Erick Ferrer, «Análisis y diseño estructural sísmo resistente de un centro comercial de 5 niveles ubicado en Trujillo – La Libertad», de Análisis y diseño estructural sísmo resistente de un centro comercial de 5 niveles ubicado en Trujillo – La Libertad, Trujillo, Reposorio de la UCV, 2022.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

MJRV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

RRPL ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JSLY ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Experimental Study of a Brackish Water Desalination Plant

Estudio experimental de una planta de desalinización de agua salobre

Estudo experimental de uma planta de dessalinização de água salobra

Ifrac Asif¹, Mirza Hammad Baig^{2,*}, Sohail Hasnain³, Sadia Ahmed⁴

Recibido: 15/05/2024

Aceptado: 12/10/2024

Summary. - Water desalination is crucial for addressing global water scarcity affecting over 2 billion people. By 2050, water demand could rise by 20-30% due to population growth and urbanization. Currently, over 40% of the global population lacks access to clean water due to overexploitation of conventional sources like rivers and groundwater. This report focuses on experimental analysis of brackish water desalination, primarily using reverse osmosis (RO). Desalination plays a vital role in converting seawater or brackish water into drinkable water, especially in coastal areas. The study explores various desalination methods such as ion exchange, membrane distillation, and vapor compression distillation. Technological advancements, particularly in RO distillation process has enhanced efficiency and sustainability. In this report, pre-treatment processes, including filtration, chemical dosing, antiscalant injection, water softening, are also employed to remove contaminants before desalination. The performance of RO is evaluated based on factors like pressure drop, feed flow rate, and recovery ratio, analyzing water flux, salt rejection rate, energy consumption, and system efficiency. The results provide insights into optimizing brackish water desalination and the discussions are carried out for improvement of the ways such as post treatment, membrane cleaning and advancement in membrane materials for sustainable freshwater production.

Keywords: Water desalination, brackish water, reverse osmosis, multistage, ion exchange, recovery ratio, flux, salt rejection rate.

(*) Corresponding Author

¹ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Karachi, Pakistan, ifrahasif@neduet.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7551-2199>

² Lecturer, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Karachi, Pakistan hammadbaig@neduet.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7544-8297>

³ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Karachi, Pakistan sohail@cloud.neduet.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-2970-2908>

⁴ Undergraduate Student, Department of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, Karachi, Pakistan ahmed4406016@cloud.neduet.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-6072-3437>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 129-144

<https://doi.org/10.36561/ING.27.9>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Resumen. - La desalinización del agua es crucial para abordar la escasez global del agua que afecta a más de 2 mil millones de personas. Para 2050, la demanda de agua podría aumentar en un 20-30% debido al crecimiento de la población y la urbanización. Actualmente, más del 40% de la población mundial carece de acceso al agua limpia debido a la sobreexplotación de fuentes convencionales como ríos y agua subterránea. Este informe se centra en el análisis experimental de la desalinización de agua salobre, utilizando principalmente la ósmosis inversa (RO). La desalinización juega un papel vital en la conversión de agua de mar o agua salobre en agua potable, especialmente en las zonas costeras. El estudio explora varios métodos de desalinización, como el intercambio de iones, la destilación de membrana y la destilación de compresión de vapor. Los avances tecnológicos, particularmente en el proceso de destilación de RO, han mejorado la eficiencia y la sostenibilidad. En este informe, también se emplean procesos de pretratamiento, incluida la filtración, la dosificación química, la inyección antiscal de inyección, el ablandamiento del agua, para eliminar los contaminantes antes de la desalinización. El rendimiento de RO se evalúa en función de factores como la caída de presión, la velocidad de flujo de alimentación y la relación de recuperación, el análisis del flujo de agua, la tasa de rechazo de la sal, el consumo de energía y la eficiencia del sistema. Los resultados proporcionan información sobre la optimización de la desalinización de agua salobre y las discusiones se llevan a cabo para mejorar las formas en que el tratamiento posterior, la limpieza de membranas y el avance en los materiales de membrana para la producción sostenible de agua dulce.

Palabras clave: Desalinización del agua, agua salobre, ósmosis inversa, etapas múltiples, intercambio de iones, relación de recuperación, flujo, tasa de rechazo de la sal.

Resumo. - A dessalinização da água é crucial para abordar a escassez global de água que afeta mais de 2 bilhões de pessoas. Até 2050, a demanda da água poderá aumentar de 20 a 30% devido ao crescimento e urbanização da população. Atualmente, mais de 40% da população global carece de acesso à água limpa devido à superexploração de fontes convencionais como rios e águas subterrâneas. Este relatório se concentra na análise experimental da dessalinização da água salobra, usando principalmente osmose reversa (RO). A dessalinização desempenha um papel vital na conversão de água do mar ou água salobra em água potável, especialmente em áreas costeiras. O estudo explora vários métodos de dessalinização, como troca de íons, destilação da membrana e destilação de compressão de vapor. Os avanços tecnológicos, particularmente no processo de destilação de RO, aumentaram a eficiência e a sustentabilidade. Neste relatório, os processos de pré-tratamento, incluindo filtração, dosagem química, injeção antiscalante, amolecimento da água, também são empregados para remover contaminantes antes da dessalinização. O desempenho do RO é avaliado com base em fatores como queda de pressão, taxa de fluxo de alimentação e taxa de recuperação, análise de fluxo de água, taxa de rejeição de sal, consumo de energia e eficiência do sistema. Os resultados fornecem informações sobre a otimização da dessalinização da água salobra e as discussões são realizadas para melhorar as maneiras como pós -tratamento, limpeza de membranas e avanço em materiais de membrana para produção sustentável de água doce.

Palavras-chave: Desalinização da água, água salobra, osmose reversa, vários estágios, troca de íons, taxa de recuperação, fluxo, taxa de rejeição de sal.

1. Introduction. - In water-stressed nations where desalinated water greatly outweighs freshwater source supplies, desalination has come up as a critical component in helping to fulfill rising water demands.(Darre & Toor, 2018). In the commercial distillation process, fresh water that is almost completely devoid of salt is separated from salt water, with the salts concentrated in the rejected brine stream.(El-Dessouky & Ettouney, 2002). About 71% of the surface of the Earth is made up of primarily saline water. According to estimates from the World Health Organization (WHO), 159 million people who depend on the oceans are among the 844 million individuals who lack access to safe potable water globally.(Hoslett et al., 2018). Almost 99 % is seawater, which can be purified through desalination processes for various potable and drinking usage purposes.(Kabir et al., 2024).

Salinity levels in brackish water are lower than in seawater due to a decrease in total dissolved solids (TDS). The low salinity of brackish water (between 1000 and 10,000 mg/L TDS) makes it a good substitute. (Honarparvar et al., 2019). Various techniques have been used to make saline/brackish water potable. Filtration, precipitation, sterilization, chemical treatment, etc. are some processes that remove macro impurities from impure water.(Thimmaraju et al., 2018).

There are two variety of desalination systems: thermal systems, which are powered by heat, and membrane-based systems, which are powered by electricity. There are two primary varieties of the former: pressure-driven reverse osmosis facilities and direct current electrical dialysis units that function under an electrical potential difference.(Elbassoussi et al., 2024)

Membrane processes like RO have been widely adopted for water treatment and reuse. The global market for RO continues to grow and is predicted to reach \$8.1 billion by 2018.(Joo & Tansel, 2015). Over the last forty years, reverse osmosis membrane technology has advanced to account for 44% of global desalting output capacity and 80% of all desalination plants deployed globally.(Greenlee et al., 2009). Finding the ideal polymeric membrane materials was the main focus of research from the late 1950s to the 1980s (Lee et al., 2011). However, membrane fouling is an inevitable issue. Membrane fouling leads to higher operating pressure, flux decline, frequent chemical cleaning and shorter membrane life. (Jiang et al., 2017). Based on the weight, substance, and energy balances and considering concentration polarization a mathematical simulation model was created. The simulation results are over 96% near ROSA and over 80% close to the experimental data, according to comparison of this model and ROSA. (Hadadian et al., 2021)

Owing to its drawbacks, including the requirement for chemical input online, the conventional coagulation, flocculation, and sedimentation chains are not seen to be an option in small water treatment systems. Many studies have proposed membrane filtration (MF/UF) procedures in gravity-driven mode (GDM) that do not require pre-treatment.(Rasouli et al., 2024). Gravity-driven membrane (GDM) filtration is a popular choice for long-term passive filtration due to its high particle removal efficiency, low energy consumption and capacity to obtain a stabilized flux.(Rasouli et al., 2024)

In many situations, tunable methods like membrane capacitive deionization (MCDI), capacitive deionization (CDI), and electrodialysis (ED) are superior to traditional reverse osmosis (RO) because of their lower energy requirements and operating costs.(Honarparvar et al., 2019). Distillation is a thermal energy-based method that efficiently rids polluted water of impurities. The basic idea behind this method is to boil the salt water, let it evaporate, and then collect the condensed vapour to create pure water.(Thimmaraju et al., 2018)

Electrodialysis is a voltage driven process. This process uses electrical potential to remove salt using a membrane leaving fresh water behind.(Thimmaraju et al., 2018). Because electrodialysis (ED) uses less energy than other methods for treating industrial water, it is more practical. Anion exchange membranes (AEM) and cation exchange membranes (CEM) are the two types of membranes utilized in electrodialysis.(Rathod et al., 2024). Seawater/brackish desalination of water is a popular application for Multi Effect Desalination Systems (MED) driven by Mechanical Vapour Compression (MVC). The energy utilized to power these devices can come from renewable sources, such as solar, wind, or a mix of the two.(Shamet & Antar, 2023)

Membrane distillation (MD) presents a viable substitute for traditional saltwater desalination methods. Regrettably,

the membrane production techniques often involve the use of hazardous solvents and non-biodegradable polymers.(Gontarek-Castro & Castro-Muñoz, 2024). Membrane distillation (MD) is a crucial technique for achieving nearly 0% discharge of hyper saline wastewater. However, it frequently faces problems due to the accumulation of mineral scale on the membrane surface.(Zhu et al., 2024). Solar distillation is one of the solutions of getting potable water using solar energy. Solar distillation unit coupled with thermal collectors, photovoltaic panels, and concentrators.(Manchanda & Kumar, 2018)

2. Methodology. - Following are the foremost common methods that are utilized in the treatment and purification of the water:

- Boiling
- Distillation
- Water filters
- Ultra violet light
- Ion exchange
- Microfiltration (MF)
- Ultra-filtration (UF)
- Nanofiltration (NF)
- Reverse Osmosis (RO)
- Vapor compression
- Multistage flash
- Electrodialysis

Boiling: Employed as a primary method during emergencies, boiling water effectively eliminates waterborne pathogens, particularly when turbidity is present. It is recommended to maintain a vigorous boil for a minimum of 3 minutes (increasing to 5 minutes at higher elevations) to ensure thorough disinfection.

Distillation: This method involves heating water to produce steam, which is then condensed to remove impurities, including volatile organic compounds (VOCs). Employing additional filtration mechanisms can augment the purification process, ensuring a comprehensive removal of contaminants.

Water Filtration: Utilizing a variety of physical and adsorptive mechanisms, water filtration systems effectively remove contaminants from water sources. Common types include sediment, ceramic, and activated carbon filters, each offering unique advantages in purifying water.

UV Light: UV disinfection systems utilize ultraviolet light to eradicate bacteria and viruses by disrupting their genetic material. This method provides a highly efficient and environmentally friendly approach to water treatment.

Ion Exchange: Ion exchange technology facilitates the removal of ions from water, resulting in demineralization. While effective in purifying water, it is imperative to adhere to regular maintenance protocols to prevent microbial contamination.

Microfiltration: Employing membranes with fine pores, microfiltration effectively removes particles, bacteria, and other contaminants from water. This method finds extensive applications in various industries, including pharmaceuticals and food processing.

Ultrafiltration: With smaller pore sizes compared to microfiltration, ultrafiltration systems can effectively concentrate proteins and enzymes while removing larger molecules and particles. This process is integral in achieving high-purity water for specialized applications.

Nanofiltration: Nanofiltration systems utilize advanced membrane technology to selectively remove small molecules

and ions from water sources. This process is particularly useful in concentrating and purifying substances such as sugars and dyes.

Reverse osmosis: Reverse Osmosis is a process that uses the membrane. It is abbreviated as RO. It has the smallest pores size range from 0.0001-0.001 microns. The pressure requirement is 25-100 Bar which is the largest among all. The RO process is used to remove water and concentrate very small molecular weight substances. Typical applications include concentrating dairy or food products (lactose), recovery/polishing of water from permeate, recovery/polishing of evaporator condensate.

RO systems can be efficaciously pragmatic to saline groundwater, seawater and brackish water. It may also account for confiscation of inorganic contaminants like, arsenic, nitrates, radio nuclides and other toxins such as pesticides. The mechanism of RO systems works on such track where the pressure is applied to a greater concentration solution to go through semipermeable plastic membrane and producing a more strenuous solution. Pressurization of the feed water is the basic energy need for RO. Within the membrane module containing compactly arranged passages, the feed water must be acquiesced and other pollutants causing the turbidity must be eradicated.

In RO systems, membrane washing via backwashing is crucial to maintain performance and extend membrane life. However, particles that accumulate cannot be completely removed, leading to reduced efficiency. Scaling, primarily due to calcium carbonate, decreases membrane permeability and irreversibly damages membranes. Fouling, the accumulation of solids on membrane surfaces, further diminishes system performance, causing pressure and flux losses. Proper waste disposal is essential due to the high concentration of brine produced, typically exceeding that of seawater. Discharging brine into sewerage lines can impact underground water levels and ecological balance over time. Throughout the world there are many of the municipal water treatment facilities that utilizes RO membrane. Although it looks similar and is fabricated in a different way to RO membranes for dairy and other highly specific sanitary applications.

3. Experimental analysis of reverse osmosis. - For the experimental analysis of reverse osmosis, the brackish water was first pre-treated to remove any large particles or organic matter that could damage the semipermeable membrane.

3.1. Pre-treatment. - The pre-treatment processes involved were sediment filtration, carbon filtration, water softening, antiscalant injection and micro filtration.

- Sediment filtration: Firstly, water passes through sediment filters to remove larger particles like sand or dirt.
- Carbon filtration: Then, the carbon filtration was done to remove chlorine and organic compounds present in water.
- Water softening: Then, water softening was done to remove the calcium and magnesium ions.
- Antiscalant solution: Then, antiscalant solution was injected to prevent the scale formation in the RO membrane.
- Micro-filtration: Then, the micro-filtration was done to remove the micro-organisms and bacteria that could foul the RO membrane.



Figure 1. Pre-treatment of brackish water.

3.2. Methodology for Experimental analysis of reverse osmosis. - In the experimental analysis of reverse osmosis (RO), meticulous pre-treatment of brackish water was paramount to safeguard the integrity of the semipermeable

membrane. This pre-treatment regimen encompassed a series of sophisticated processes tailored to remove various contaminants that could compromise membrane performance.

Initially, the brackish water underwent sediment filtration, a crucial step aimed at eliminating larger particles such as sand and dirt. Subsequently, carbon filtration was employed to effectively remove chlorine and organic compounds present in the water, ensuring optimal membrane function. Following carbon filtration, water softening procedures were implemented to tackle the removal of calcium and magnesium ions, which are notorious for causing scale formation on the RO membrane. To further fortify membrane protection, an antiscalant solution was judiciously injected to mitigate the risk of scale deposition, thereby prolonging membrane longevity and efficacy. Moreover, microfiltration was meticulously conducted to target the removal of microorganisms and bacteria that could potentially foul the RO membrane, ensuring the highest standards of water purity and safety.

The equations involved to calculate these factors are as,

$$\text{Flux: } J = \frac{Q}{A}$$

(Halliday et al., 2013)

$$\text{Recovery: } R = \frac{Q_p}{Q_f}$$

(Wang & Zhou, 2013)

$$\text{Permeability: } K = \frac{J}{TMP}$$

(Baker, 2023)

$$\text{Rejection: } r = \frac{C_p}{C_f}$$

(Davis, 2010)

$$\text{Energy consumption: } E = \frac{P}{t}$$

(Moran et al., 2010)

In the given context: Q represents flow rate, A represents area, Q_p represents permeate flow rate, Q_f represents feed flow rate, TMP represents trans-membrane pressure, C_p represents concentration of solute in permeate, C_f represents concentration of solute in the feed, P represents power consumption and t represents time.



Figure II. Reverse Osmosis process.

4. Experimental analysis of ion exchange distillation. - In the ion exchange process for treating brackish water, the resin bed undergoes meticulous preparation through regeneration with a brine solution to enhance its exchange capacity. Once ready, the brackish water is introduced into the system, initiating the ion exchange phenomenon. As water flows through the resin bed, unwanted ions are removed, and desirable ions are released, facilitating purification. Throughout the process, careful monitoring of parameters such as water flow rate, resin exchange capacity, and contact time ensures optimal performance. After treatment, the exhausted resin is regenerated using a brine solution, maintaining the system's effectiveness in producing high-quality water.



Figure III. Ion exchange process

4.1. Experimental analysis of vapor compression distillation. - For the experimental analysis of vapor compression distillation, the equipment and setup were prepared, including the vapor compression distillation unit, heat source, condenser, and collection vessels. Then, a specific brackish water sample was selected for testing. The distillation process was initiated by applying heat to the brackish water, causing evaporation. The vapor was then compressed using a compressor, increasing its temperature and pressure. Next, the compressed vapor was cooled in the condenser, causing it to condense back into liquid form. The resulting distilled water was collected in the vessels, while the remaining concentrated brine was disposed of. Throughout the experiment, various parameters such as temperature, pressure, and flow rate were measured and recorded. The collected data was then analyzed to evaluate the performance of the vapor compression distillation process and determine its efficiency in producing fresh water from brackish water.

4.2. Experimental analysis of electro dialysis distillation. - For the experimental analysis of electro dialysis distillation, firstly, the experimental setup was prepared, including the electro dialysis cell, electrodes, and brackish water feed solution. The cell was filled with the feed solution, and the electrodes were positioned accordingly. Then, an electric field was applied across the cell, causing the migration of ions through ion-exchange membranes. This process helped separate the ions and remove impurities from the brackish water. The purified water and concentrated brine were collected separately. Throughout the experiment, parameters such as voltage, current, and conductivity were measured and recorded. The collected data was then analyzed to evaluate the performance of the electro dialysis distillation process and assess its efficiency in desalinating brackish water.

4.3. Experimental analysis of multi-stage flash distillation. - For the experimental analysis of multi-stage flash distillation, firstly, the experimental setup was prepared, including the flash chamber, heat source, and brackish water feed. The brackish water was heated using the heat source, causing it to evaporate. The resulting vapor was then condensed in a series of flash chambers, each operating at a lower pressure than the previous one. This process allowed for the separation of fresh water vapor from the concentrated brine. The fresh water vapor was collected and condensed into liquid form, while the concentrated brine was removed. Throughout the experiment, parameters such as temperature, pressure, and flow rate were carefully monitored and recorded. The collected data was then analyzed to evaluate the efficiency and performance of the multi-stage flash distillation process.

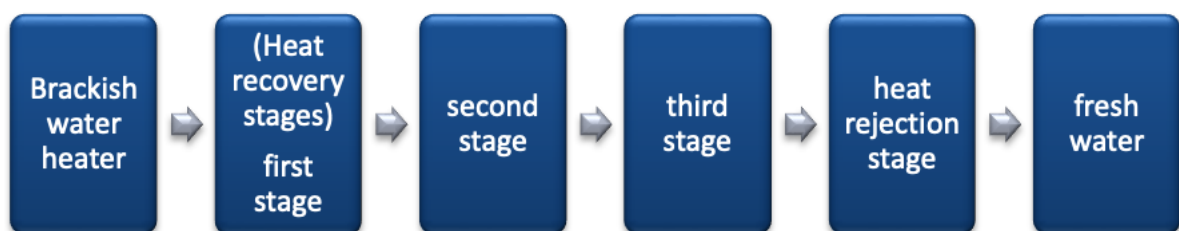


Figure IV. Multi-stage flash distillation.

5. Results and Discussions. - The specifications of the membrane used in reverse osmosis are shown in Table I. In Table II, the dimensions of the membrane are shown and the operating limits and maximum pressure, temperature conditions and the pH range for both short term and continuous cleaning are listed in Table III. In Table IV, the system details of the ROSA software are shown including the feed pressure, temperature, TDS, flow factor, avg NDP. Number of elements is taken to be 1 and in Table V, for 1 element the stage details are shown. The re-circulation flow, permeate

pressure and boost pressure are found to be zero in this case. The raw water test report before the reverse osmosis is shown in Table VI and the results of the reverse osmosis are shown in the final test report after the process of reverse osmosis in Table VII. The total dissolved solids (TDS) was 3230 ppm initially but after the RO process it became 15 ppm. The total hardness initially was 710 ppm and after the RO process it became 150 ppm and the total suspended solids were found to be nil. From all of these results, it is clearly shown that the brackish water is converted into pure and drinkable water and all the impurities including the dissolved and suspended solids, organic compounds, bacteria, chlorine, micro-organisms, chloramines are removed by virtue of reverse osmosis. For further purification and advanced cleaning and to make the process more, there are various ways including the advancement in membrane cleaning, membrane technology, more effective monitoring and post-treatment. Advancement in membrane materials and design can enhance permeability, selectivity, and durability, improving overall efficiency. Implementing regular membrane cleaning protocols using appropriate chemicals and techniques to remove fouling and maintain performance. All of these factors and other factors as effective pump designs, pressure recovery devices, and optimization of operating conditions such as accurate pressure drop and flow rate through the membrane can improve RO plant's efficiency.

Product	Part number	Active area ft ² (m ²)	Applied pressure psig(bar)	Permeate flow rate gpd(m ³ /d)	Stabilized salt rejection %
BW30-4040	80783	82(7.6)	225(15.5)	2400(9.1)	99.5

Table I. Membrane specifications.

Product	A	B	C	D
BW30-4040	40.0(1,016)	1.05(26.7)	0.75(19)	3.9(99)

Table II. Membrane dimensions.

Maximum operating temperature °F(°C)	Maximum operating pressure psi(bar)	Maximum feed flow rate Gpm(m ³ /h)	Maximum pressure drop Psig(bar)	pH range (continuous operation)	pH range (short term cleaning)	Maximum feed silt density index	Free chlorine tolerance
113°F(45°C)	600 psi(41 bar)	4040 elements 16gpm(3.6 m ³ /h)	15 psig(1 bar)	2-11	1-12	SDI 5	<0.1 ppm

Table III. Operating limits.

Feed flow to stage 1	6.93 gpm
Feed pressure	200.6 psig
Flow factor	0.85
Total active area	78.00 ft ²
Pass 1 permeate flow	1.04 gpm
Pass 1 recovery	15.00 %
Feed temperature	25°C
Feed TDS	3250.01mg/l
Average pass 1 flux	19.2 gfd
Number of elements	1
Average NDP	154.2 psig
Concentration	44.14 psig
Power	0.76 kW
Specific energy	12.13 kWh/kg

Table IV: System details.

Stage	1
Element	BW30-4040
#PV	1
#Ele	1
Feed flow	6.93 gpm
Feed pressure	195.68 psig
Rrcirc flow	0.00 gpm
Conc flow	5.89 gpm
Conc pressure	194.01 psig
Permeate flow	1.04 gpm
Avg flux	19.2 gfd
Permeate press	0 psig
Boost press	0 psig
Perm TDS	29.12 mg/l

Table V. Stage details.

Parameters	Analysis Results	Units
Total dissolved solids	3230	ppm
Total suspended solids	2	ppm
Total hardness	710	ppm as CaCO ₃
pH	7.5	-
Calcium hardness	256	ppm as CaCO ₃
Magnesium hardness	454	ppm as CaCO ₃
Iron total	0.2	ppm as Fe ²⁺

Table VI. Raw (brackish) water test report.

Parameters	Analysis results	Units
Total dissolved solids	15	ppm
Total suspended solids	Nil	ppm
Total hardness	150	ppm as CaCO ₃
pH	7.5	-
Calcium hardness	40	ppm as CaCO ₃
Magnesium hardness	53	ppm as CaCO ₃
Iron total	Nil	ppm as Fe ²⁺

Table VII. Final report of water after RO process.

5. Comparative Analysis of Desalination Methods and Advantages of Reverse Osmosis (RO). -

5.1. Reverse Osmosis (RO). - RO is a membrane-based technology that forces saline water through a semipermeable membrane under high pressure, selectively rejecting salts and other dissolved impurities. This process has gained prominence as the leading desalination method globally.

Advantages: RO systems demonstrate high salt rejection rates (up to 99%) and are highly effective across a range of salinity levels, from seawater to brackish sources. They also tend to consume less energy than thermal desalination methods due to their non-reliance on heat, making RO more economically viable, particularly for high-volume applications. Moreover, advancements in membrane materials and configurations have increased permeability and selectivity while mitigating fouling, thus improving RO's operational efficiency and lifespan.

Disadvantages: Despite its efficacy, RO membranes are susceptible to fouling from organic matter, scale, and biofouling, necessitating regular maintenance and chemical cleaning protocols. High-pressure requirements for seawater desalination also elevate energy costs and can increase system wear.

5.2. Multi-Effect Distillation (MED). - MED is a thermal process that involves a series of evaporators (“effects”) where steam from one effect heats the next stage at progressively lower temperatures.

Advantages: MED is robust and ideal for large-scale desalination applications, especially when renewable heat sources are available. Its multi-stage design allows for efficient energy recycling, and it is less prone to biological fouling, making it suitable for regions with high salinity or limited maintenance resources.

Disadvantages: The high capital costs and spatial requirements make MED less feasible for smaller facilities. Additionally, MED’s reliance on thermal energy results in elevated operational costs and makes it susceptible to fluctuations in energy prices.

5.3. Multi-Stage Flash (MSF). - MSF desalination rapidly heats seawater, which is then “flashed” to steam in multiple stages under decreasing pressure levels.

Advantages: MSF systems are highly reliable and capable of long operational lifespans, making them suitable for continuous, large-scale desalination. They are also effective for high-salinity seawater and can leverage waste heat, contributing to energy efficiency in combined power and water production settings.

Disadvantages: MSF is one of the most energy-intensive desalination technologies, given its heavy reliance on thermal energy. The high operational and maintenance costs, coupled with significant environmental concerns related to brine discharge, restrict its widespread use.

5.4. Electrodialysis (ED). - ED utilizes an electric field to drive ions through selective membranes, effectively separating salts from water.

Advantages: ED is particularly efficient for low-salinity water sources, such as brackish water, due to its low energy consumption relative to salinity. It also has minimal chemical requirements for maintenance and can be more cost-effective at smaller scales.

Disadvantages: ED’s limited desalination capability for seawater restricts its applicability in high-salinity contexts. Additionally, membrane fouling can still be an issue, especially in water sources with high organic content.

5.4. Membrane Distillation (MD). - MD is a thermally driven membrane process that utilizes a temperature gradient to drive water vapor through a hydrophobic membrane, leaving salts behind.

Advantages: MD achieves high salt rejection and can utilize waste heat, making it suitable for niche applications, including zero-liquid discharge systems. MD systems can operate at relatively low temperatures, which reduces thermal energy demands.

Disadvantages: Scaling and fouling issues can impact membrane performance, and the technology remains cost-intensive due to complex membrane requirements. Additionally, the reliance on non-biodegradable materials raises environmental concerns, limiting MD’s sustainability profile.

RO’s superiority lies in its combination of high efficiency, flexibility, and scalability across various salinity levels and operational scales. Unlike thermal processes, which require significant energy input and large physical footprints, RO is compact and energy-efficient, especially when treating brackish or moderately saline water. Its adaptability to different water sources and the continuous innovation in membrane technology make RO an optimal solution for desalination. While fouling remains a challenge, advancements in fouling-resistant membranes and cleaning protocols have made RO systems increasingly resilient, reducing maintenance frequency and prolonging membrane life. These qualities position RO as the preferred choice for sustainable desalination, especially where operational flexibility and cost-effectiveness are critical considerations.

6. Factors Influencing the Performance of the Reverse Osmosis (RO) Process

6.1. Membrane Characteristics. - The efficiency of the RO process is closely linked to the properties of the membrane used:

6.2. Material Composition. - Polyamide membranes are widely chosen for brackish water desalination due to their high salt rejection capabilities and durability. In contrast, cellulose acetate membranes are less commonly used due to their lower resistance to pH variations.

6.3. Pore Structure. - The size and structure of the membrane's pores directly influence salt rejection. Smaller pores typically enhance salt rejection but may reduce the flow rate. For brackish water, membranes are designed to balance pore size, achieving effective salt removal while maintaining adequate water permeability.

6.4. Fouling Resistance. - RO membranes are prone to fouling from organic matter, salts, and biological growth, which can reduce efficiency. To combat this, anti-fouling coatings are often applied, enhancing the membrane's operational life and sustaining process performance.

7. Operating Conditions. - The conditions under which RO operates significantly impact its effectiveness:

7.1. Pressure. - Brackish water desalination operates at a lower pressure range (10-20 bar) than seawater desalination, due to its reduced salinity. The pressure must be sufficient to overcome the osmotic pressure, enabling permeate flow while optimizing energy use.

7.2. Temperature. - Elevated temperatures generally increase water permeability but may compromise salt rejection. As a result, RO systems for brackish water typically operate at moderate temperatures to balance water flux and salt removal.

7.3. Recovery Rate. - The recovery rate, or the percentage of feed water converted into permeate, is optimized to prevent excessive concentration of salts at the membrane surface. This concentration polarization can lead to fouling, so maintaining an appropriate recovery rate is essential for system efficiency and durability.

8. Water Quality. - The initial quality of the feed water, including salinity and the presence of contaminants, also affects RO performance.

8.1. Salinity. - Although brackish water is less saline than seawater, it still requires effective salt removal to achieve the desired level of purification. Lower salinity allows for energy-efficient operation at reduced pressures.

8.2. Contaminants. - Brackish water may contain organic materials, suspended particles, and microorganisms that can lead to membrane fouling. Pre-treatment, such as sedimentation or filtration, is typically applied to improve RO performance by minimizing the risk of fouling.

9. Conclusion. - After undergoing reverse osmosis (RO), the water undergoes a significant transformation in its composition. The total dissolved solids (TDS) decrease significantly from an initial 3230 ppm to just 15 ppm. Similarly, the total hardness decreases from 710 ppm to 150 ppm after treatment, and there are no total suspended solids present. These results demonstrate the effectiveness of reverse osmosis in removing various pollutants, such as dissolved and suspended particles, organic compounds, bacteria, chlorine, microorganisms, and chloramines. As a result, the treated water becomes pure and safe for consumption. The substantial reduction in TDS and hardness levels, along with the absence of suspended solids, underscores the efficiency of the RO process in water purification.

10. Future recommendations. - There are various ways to enhance the purification process and achieve advanced cleaning. This includes advancements in membrane technology, improved monitoring, and post-treatment. By improving the permeability, selectivity, and durability of membranes through material and design enhancements, overall efficiency can be increased. Implementing regular membrane cleaning procedures to prevent fouling and

maintain performance using appropriate chemicals and methods is crucial. Efficiency can also be boosted by efficient pump designs, pressure recovery equipment, and optimizing operating conditions like precise pressure drop and membrane flow rate.

10.1. Membrane Cleaning Improvements. –

Tailored Chemical Cleaners: Use specific cleaning agents tailored to different types of fouling (e.g., acid cleaners for scaling, alkaline cleaners for organic fouling). Customized chemical blends can target fouling more effectively and minimize membrane damage.

Enzymatic Cleaning: For organic fouling, enzymatic cleaners can be employed to break down biofilm layers without damaging the membrane material. This is especially useful in systems prone to biofouling.

Periodic Backwashing and Forward Osmosis: Integrate regular backwashing with air scouring to remove particles from the membrane surface. In forward osmosis, alternating directions in flow help release deposited particles, maintaining membrane permeability.

Electrically Enhanced Cleaning: Introducing an electric field across the membrane surface can help repel charged foulants, reducing biofouling and scaling. This approach, called electrochemical cleaning, has shown potential in maintaining flux and extending membrane lifespan.

10.2. Enhanced Monitoring Techniques. -

Real-time Fouling Detection Sensors: Install sensors that monitor pressure drop, permeate quality, and flow rates to detect fouling or scaling as it develops. Optical or ultrasonic sensors can identify fouling layers in real time, enabling proactive cleaning before significant flux reduction.

Automated Data Analytics: Use machine learning algorithms to analyze operational data (e.g., temperature, pressure, and flux) and predict potential fouling events. This preemptive approach allows operators to adjust cleaning schedules based on real-time data rather than fixed intervals.

pH and Conductivity Monitoring: Regularly monitor pH and conductivity levels, especially in feed and brine streams, to detect changes indicating scaling or chemical imbalance. Conductivity monitoring, in particular, is useful for tracking salinity changes that may require operational adjustments.

10.3. Post-Treatment Optimization. -

Advanced Oxidation Processes (AOPs): Implement AOPs, such as ozone or UV treatments, to degrade any remaining organic contaminants and improve water quality. AOPs are highly effective in eliminating residual micropollutants that may not be removed by membranes alone.

Activated Carbon Filtration: Use granular activated carbon (GAC) as a post-treatment step to adsorb dissolved organic compounds (DOCs) and trace contaminants, improving taste and safety. GAC is effective for removing substances that might otherwise compromise water quality.

Ion Exchange for Heavy Metals: In areas with potential heavy metal contamination, an ion exchange unit can selectively remove ions like lead, copper, and mercury. This process is particularly beneficial when dealing with brackish water sources with variable metal content.

Antiscalant Dosing in Post-Treatment: Apply controlled antiscalant dosing in the final stages to mitigate the potential of scaling in downstream equipment, ensuring consistent quality and flow in distributed water.

10.4. Operational Efficiency Enhancements. -

Energy Recovery Devices (ERDs): Incorporate ERDs, such as pressure exchangers or isobaric chambers, to capture and reuse energy from the brine stream. This reduces overall energy costs and improves system efficiency.

Optimized Pressure and Flow Controls: Use variable-frequency drives (VFDs) on pumps to dynamically adjust pressure and flow rates based on real-time demands and membrane conditions. Lower pressure settings during low fouling can prolong membrane life.

References

- [1] Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=EyXgEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA525&dq=membrane+technology+and+application+book&ots=i4UkgJFvUY&sig=FMNUj6--gBKOXC-pFKzQDtcQDFw>
- [2] Darre, N. C., & Toor, G. S. (2018). Desalination of Water: A Review. *Current Pollution Reports*, 4(2), 104–111. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0085-9>
- [3] Davis, M. L. (2010). *Water and wastewater engineering: A design principles and practice*. McGraw-Hill. <https://thuvienshoasen.edu.vn/handle/123456789/9253>
- [4] Elbassoussi, M. H., Ahmed, M. A., Lawal, D. U., Antar, M. A., & Zubair, S. M. (2024). The impact of a balanced humidification-dehumidification desalination system driven by a vapor-compression heat-pump system. *Energy Conversion and Management: X*, 21, 100521.
- [5] El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). *Fundamentals of salt water desalination*. Elsevier. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=eqssS2EMBU4C&oi=fnd&pg=PP1&dq=water+desalination&ots=6is7wFM11q&sig=5qMSsBwJTadAyLpxIvpz14hu8XA>
- [6] Gontarek-Castro, E., & Castro-Muñoz, R. (2024). How to make membrane distillation greener: A review of environmentally friendly and sustainable aspects. *Green Chemistry*. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/gc/d3gc03377e>
- [7] Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=HybkAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=fundamentals+of+physics+and+david+halliday&ots=TudaBeNO5B&sig=zdEh-nmEPr-RkpM4bDgE7zv4n38>
- [8] Hoslett, J., Massara, T. M., Malamis, S., Ahmad, D., van den Boogaert, I., Katsou, E., Ahmad, B., Ghazal, H., Simons, S., & Wrobel, L. (2018). Surface water filtration using granular media and membranes: A review. *Science of the Total Environment*, 639, 1268–1282.
- [9] Kabir, M. M., Sabur, G. M., Akter, M. M., Nam, S. Y., Im, K. S., Tijing, L., & Shon, H. K. (2024). Electrodialysis desalination, resource and energy recovery from water industries for a circular economy. *Desalination*, 569, 117041.
- [10] Manchanda, H., & Kumar, M. (2018). Study of water desalination techniques and a review on active solar distillation methods. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(1), 444–464. <https://doi.org/10.1002/ep.12657>
- [11] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=oyt8iW6B4aUC&oi=fnd&pg=PA21&dq=fundamentals+of+engineering+thermodynamics&ots=9-G2wzmZGT&sig=ATPp85nYPkmvZimuU0VQuD-u5Wg>
- [12] Rasouli, Y., Maltais-Tariant, R., Barbeau, B., Peldszus, S., Boudoux, C., & Claveau-Mallet, D. (2024). Performance of biological ion exchange resin and gravity-driven ceramic membrane hybrid process for surface water treatment. *Separation and Purification Technology*, 332, 125769.
- [13] Shamet, O., & Antar, M. (2023). Mechanical vapor compression desalination technology—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113757.
- [14] Thimmaraju, M., Sreepada, D., Babu, G. S., Dasari, B. K., Velpula, S. K., & Vallepu, N. (2018). Desalination of water. *Desalination and Water Treatment*, 333–347.

- [15] Wang, H., & Zhou, H. (2013). Understand the basics of membrane filtration. *Chemical Engineering Progress*, 109(4), 33–40.
- [16] Zhu, Z., Xue, X., Song, M., Qi, J., Zhou, Y., Yang, Y., & Li, J. (2024). Boosting membrane distillation lifespan: Superhydrophobic micro-nano surface construction and concentrate concentration management. *Resources, Conservation and Recycling*, 202, 107365.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

IA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

MHB has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

SH has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

SA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Fatigue failure analysis of washing machine top frame under cyclic loading – an investigative study in mitigating market complaint

Análisis de fallas de fatiga del marco superior de la lavadora bajo la carga cíclica: un estudio de investigación mitigando la queja del mercado

Análise de falha de fadiga do quadro superior da máquina de lavar sob carga cíclica - um estudo de investigação na mitigação de queixa do mercado

Sohail Hasnain¹, Muhammad Mansoor Uz Zaman Siddiqui², Adeel Tabassum³,
Syed Haider Raza Naqvi⁴, Asad A. Naqvi^{5,*}

Recibido: 20/05/2024

Aceptado: 12/10/2024

Summary. - This study paper looks into the structural integrity and failure mechanisms of washing machine top frames, with the goal of improving household appliance durability and reliability. Critical regions prone to fatigue failure were identified using SolidWorks software. Stress analysis and deformation analysis revealed the failure prone areas but upon assessing the costs associated with designing new molds for modified design and performing the breakeven calculation, we decided to go with an approach of using an alternate material which will not cause any change in existing mold. Polycarbonate (PC) with 50% long glass fiber reinforcement, were investigated to improve fatigue resistance. A new top frame of this material was made along with existing material ABS. Testing on a door simulator machine demonstrated a considerable improvement in durability, with the PC-based top frame demonstrating a 1128% increase in cycle endurance over the ABS counterpart. Top frame made up of ABS broke after 297 cycles and PC with 50% long glass fiber top frame broke after 3697 cycles. These findings highlight the significance of systematic design optimization and material selection for assuring long-term performance and safety in washing machine top frames.

Keywords: Finite element analysis, Fracture mechanics, Fracture behavior, Fatigue, Modelling, Simulations, Stress-Strain measurements.

(*) Corresponding Author

¹ Lecturer, NED University of Engineering and Technology, sohail@neduet.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-2970-2908>

² Masters in Industrial and Manufacturing Engineering, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, University of Engineering and Technology Lahore, mansoorresearch1986@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-8992-7601>

³ Bachelors in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, National University of Sciences and Technology, E&ME College Rawalpindi, adeeltabassum1@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-9375-1090>

⁴ Bachelors in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Engineering and Technology, Lahore, Shrn_naqvi@hotmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-4565-2043>

⁵ Assistant Professor of Mechanical Engineering, NED University of Engineering and Technology, asadakhter@cloud.neduet.edu.pk, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6290-3115>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 145-160
<https://doi.org/10.36561/ING.27.10>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Resumen. - Este documento de estudio analiza los mecanismos de integridad y falla estructural de los mejores marcos de la lavadora, con el objetivo de mejorar la durabilidad y la confiabilidad del aparato doméstico. Las regiones críticas propensas a la falla de fatiga se identificaron utilizando el software SolidWorks. El análisis del estrés y el análisis de deformación revelaron las áreas propensas a la falla, pero al evaluar los costos asociados con el diseño de nuevos moldes para el diseño modificado y realizar el cálculo de equilibrio, decidimos ir con un enfoque de usar un material alternativo que no causará ningún cambio en el molde existente. Se investigaron policarbonato (PC) con un refuerzo de fibra de vidrio 50% largo para mejorar la resistencia a la fatiga. Se realizó un nuevo marco superior de este material junto con el material de material existente. Las pruebas en una máquina del simulador de puerta demostraron una mejora considerable en la durabilidad, con el marco superior basado en PC demostrando un aumento del 1128% en la resistencia del ciclo sobre la contraparte de ABS. El marco superior compuesto por ABS se rompió después de 297 ciclos y PC con un marco superior de fibra de vidrio de vidrio al 50% que se rompió después de 3697 ciclos. Estos hallazgos resaltan la importancia de la optimización de diseño sistemático y la selección de materiales para asegurar el rendimiento y la seguridad a largo plazo en los marcos superiores de las lavadoras.

Palabras clave: Análisis de elementos finitos, mecánica de fractura, comportamiento de fractura, fatiga, modelado, simulaciones, mediciones de tensión-deformación.

Resumo. - Este documento de estudo analisa os mecanismos de integridade estrutural e falhas dos quadros superiores da máquina de lavar, com o objetivo de melhorar a durabilidade e a confiabilidade dos aparelhos domésticos. Regiões críticas propensas a falhas de fadiga foram identificadas usando o software SolidWorks. A análise de estresse e a análise de deformação revelaram as áreas propensas a falhas, mas, ao avaliar os custos associados ao projeto de novos moldes para o design modificado e executar o cálculo do ponto de equilíbrio, decidimos seguir uma abordagem de usar um material alternativo que não causará nenhuma mudança no molde existente. O policarbonato (PC) com reforço de fibra de vidro de 50% de comprimento foi investigado para melhorar a resistência à fadiga. Um novo quadro superior desse material foi fabricado junto com o material de material existente. Os testes em uma máquina de simulador de porta demonstraram uma melhoria considerável na durabilidade, com a estrutura superior baseada em PC demonstrando um aumento de 1128% na resistência ao ciclo sobre a contraparte do ABS. A estrutura superior composta de ABS quebrou após 297 ciclos e PC com quadro superior de fibra de vidro de 50% de comprimento quebrou após 3697 ciclos. Esses achados destacam o significado da otimização sistemática do projeto e da seleção de materiais para garantir o desempenho e a segurança a longo prazo nos quadros superiores da máquina de lavar.

Palavras-chave: Análise de elementos finitos, mecânica de fratura, comportamento de fratura, fadiga, modelagem, simulações, medições de tensão-deformação.

List of abbreviation and symbols

PC – Polycarbonate
ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene
ANN – Artificial neural network
CNN – Convolutional neural network
LSM – Large scale manufacturing
WM – Washing machine
FEA – Finite element analysis

1. Introduction. - The need for durable and effective home appliances products is growing, thus it is critical to comprehend the mechanics behind fatigue failure and crack propagation in washing machine top frames. These frames' structural integrity reduces potential risks to user and environmental safety in addition to ensuring optimal operation [1]. Washing machines are essential tools for contemporary homes since they make doing laundry easier and more efficient. Although it's frequently disregarded, a washing machine's top frame, especially on top-loaded models, is essential for housing internal components and granting access to the washing drum. In order to improve user accessibility and operational functionality, the top frame piece that connects with the hinge mechanism makes it easier to open and close the lid [2].

A washing machine's top frame is essential to its general stability and performance. It acts as a cover, protecting internal parts from the elements and offering a practical surface for loading and unloading laundry. The hinge mechanism in top-loaded washing machines must be accommodated in the top frame design to ensure smooth and dependable lid operation without sacrificing structural integrity. Throughout its operating lifecycle, the top frame of washing machines experiences cyclic loading and polymers behavior under cyclic loading has been extensively studied because of its significant impact on economy and environment [3].

The top frame of washing machines is often made using the injection molding process, which allows for the precise and fast construction of complex geometries. In this context, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) is the material of choice due to its good mechanical qualities and ease of processing. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) is widely used in various essential components in the consumer electronics sector since it is lighter than metal. ABS offers excellent impact, heat and tensile strength characteristics. ABS plastic works well for creating consumer goods that are meant to be used frequently [4].

The upper frame's material grade is Starex QU-0191s, which is known for its exceptional performance in structural applications. Starex QU-0191s provides a compelling set of characteristics that make it excellent for washing machine components. Its strong impact resistance ensures longevity against mechanical stresses and vibrations encountered during use, protecting the top frame's integrity over time. Furthermore, ABS' intrinsic stiffness contributes to the top frame's total structural rigidity, increasing its capacity to sustain cyclic loading conditions without deformation or failure.

The injection molding process highlights the benefits of ABS by allowing to produce complicated designs with constant quality and dimensional accuracy. ABS's adaptability enables the top frame's geometry to be customized and optimized to fulfill specific functional and aesthetic needs, enabling perfect integration with the overall design of the washing machine.

In recent observations, incidences of breakdown in washing machine top frames, particularly in areas which interfaces with hinges, have been reported within Company A's product range. Due to marketing considerations, the company's identity is kept hidden. These issues have been reported in the market from consumers and was observed during rigorous testing in Company A's lab. Complaints about top frame breakdowns in washing machines highlight a critical issue that requires thorough research and resolution. The observed failures, particularly in parts where top frame interfaces with hinge, pose substantial difficulties to the structural integrity and reliability of Company A's washing machines. Such failures have a negative influence on consumer confidence while also incurring significant expenses connected with warranty claims, repairs and potential brand reputation damage. Understanding the underlying causes

of these failures and executing effective mitigation methods is critical for Company A's commitment to product quality, customer satisfaction and market competitiveness. By resolving these problems, the company may improve the longevity and functionality of its washing machine top frames, resulting in a better user experience while lowering the chance of future failures.

The purpose of this study is to undertake a detailed stress analysis of the top frame of a top-loaded washing machine, with an emphasis on the component that interfaces with the hinge mechanism. Objectives include:

1. Evaluating the structural performance of ABS top frames under different loading circumstances, with a special focus on stress concentrations around hinge interfaces and to identify critical stress areas and failure modes in top frame's hinge area.
2. Usage of alternate materials to improve the longevity of washing machine top frame.

The results of this study have important impact on improving the durability and structural integrity of top load washing machines, especially those in Company A's product range and for all the home appliances manufacturers in general. Manufacturers, especially in home appliances industry, can improve design processes and investigate alternate materials to effectively prevent failures by evaluating stress distribution patterns and failure mechanisms inside top frames of washing machines made up of ABS material. Adopting creative strategies demonstrates a dedication to raising customer confidence, cutting maintenance costs and increasing product reliability. The results of the study add to the larger conversations surrounding material selection and design optimization in the appliance manufacturing sector, which in turn promotes continual development and raises the value offer for stakeholders and customers alike.

2. Literature review. - The material properties of different polymers are widely studied by number of researchers [5-7]. A material will experience fatigue failure if it is repeatedly subjected to cyclic loads below its ultimate tensile strength. This condition is characterized by progressive and localized structural damage. The accumulation of microstructural damage in a material, which is triggered by cyclic loading conditions, is the cause of fatigue failure [8]. Cycle loading causes fatigue failure, which leads to crack initiation and propagation over an extended period of time. This is in contrast to static loading, which causes failure abruptly when the material achieves its maximal strength. Comprehending the underlying principles of fatigue failure necessitates acknowledging the correlation among stress levels, cycle count and fatigue life of the material [9].

Determining the fatigue life of structural elements is essential to evaluating their robustness and dependability. Numerous techniques are used to predict fatigue life based on S-N curve data, stress analysis and material parameters, including empirical, semi-empirical and analytical approaches [10]. Predictive models that help with fatigue life prediction include Miner's rule, Goodman diagram and Palmgren-Miner rule. These models provide insights into the process of cumulative damage accumulation [11]. Along with these models now there are several machine learning techniques that can serve the same purpose of predictive failure analysis by using machine learning algorithms especially designed for the purpose of remaining useful life (RUL) estimation [12]. Those machine learning algorithms include linear regression [13], decision trees [14], support vector machines (SVM) [15] and different neural network techniques like ANN or CNN [16] that can extract complex nonlinear relationship between input features like operating conditions, torque application, material properties, load distribution and different type of stresses like shear stress, torsional stress etc. and fatigue failure.

Fatigue life of a component depends on several factors. Material properties and loading conditions are the factors that are most relevant to our study. Washing machine top frame is usually made up of different grades of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) as it is a cost-effective material while exhibiting extremely good mechanical and thermal properties [17]. The impact resistance, durability, chemical resistance and ease of processing of ABS make it a preferred material among manufacturers. ABS is a popular material to use in the production of many parts for household appliances like microwaves, refrigerators, washing machines and dishwashers because of these qualities [18]. In industry, different components of home appliances products are manufactured from ABS pellets by the processes of injection molding and extrusion. Along with ease of manufacturing ABS is very durable and reliable material thus making it most popular material amongst home appliances manufacturers.

Secondly loading conditions also have a significant impact on how structural components behave when fatigued. Crack propagation rates and fatigue life are strongly influenced by variables such as stress ratio, load amplitude, mean stress and loading frequency. Premature failure is caused by high stress concentrations, sudden changes in loading direction and changing loads that intensify fatigue damage [19].

In this investigative study, we will delve into the details of how the crack in the washing machine's top frame in the hinge interface area came to be. Every time you open and close the washing machine door, this area endures torsional stresses. Top frame area which interfaces with the hinge undergoes torsional stress whenever door is open or closed and this leads to crack formation and propagation as this formation and progression of pre-existing cracks is due to fatigue damage when cyclic loads surpass the fatigue threshold of the material [20]. Determining the structural integrity and estimating the fatigue life of components that remain is dependent on an understanding of the factors that drive crack development [21].

Torsional stress results from applying torque to a structural member, causing it to twist and deform. The material experiences torsional strains when a torque is applied to one end of a shaft or beam while the other end stays fixed [22]. The element's cross-section twists in relation to its longitudinal axis as a result of angular deformation brought on by these stresses. The polar moment of inertia of the cross-section and the applied torque are inversely related to the torsional stress magnitude. During opening and closing of washing machine's top frame in the hinge interface area undergoes torsional stress because of its design and in this investigative study we will find its root cause and potential countermeasures for issue resolution.

Usually, fatigue cracks start at locations where there is a concentration of stress, including material inclusions, surface imperfections or geometric discontinuities. Crack initiation under cyclic loading is initiated at the nucleation sites of microscopic defects present in the material. The susceptibility of materials to crack initiation is influenced by various factors, including stress conditions, environmental factors and material qualities [23].

This experimental study of finding root cause and development of improved design of top frame of washing machine is unique as no other study specifically related to crack formation in washing machine top frame near area which interfaces with hinges has ever been done.

3. Methodology. - A door simulator (open/close) testing machine will used in this study's research methodology to replicate home environments similar to those encountered while a washing machine is operating. With the help of this machine, it is possible to replicate the cyclic loading and strains that are frequently experienced by washing machine top frame area that interface with the hinge by accurately simulating the conditions of household use.

After that, SolidWorks software will be used to design the washing machine top frame. For precise analysis, a detailed model of the top frame will be created using the original dimensions and accurate geometry of top frame of WM. ABS material will be defined before the commencement of analysis in order to get the accurate data. After that Finite Element Analysis (FEA) in the SolidWorks will be used to do thorough stress analysis, deformation analysis and factor of safety (FOS) study after the design phase. These evaluations will provide valuable insight about the top frame design's safety margins, performance under load and structural integrity.

After that a sample of top frame will be made with alternate material through injection molding and it will be tested on open/close machine in order to improve the life cycle of top frame without changing the current design.

3.1. Experimental planning. -

3.1.1. Machine. - A custom-built door simulator machine was used in order to simulate the market condition in which washing machine was open/closed and is shown in figure 1.



Figure I. Door Simulator (open/close) machine

3.1.2. Material. - Washing machine top frame is made up of ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) and an improved design will be made up of PC (Polycarbonate).

3.1.3. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene). - The thermoplastic polymer Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) is a common material that is valued for its strength, resilience and adaptability. Because of its advantageous qualities, ABS material is widely used in the production of home appliances. When it was first introduced to the market, production procedures saw a dramatic change because manufacturers could now use this sturdy yet lightweight material for a wide range of components. Appliances for the home, including kitchenware, vacuum cleaners, refrigerators and washing machines are frequently made up of ABS. Because of its heat resistance, impact resistance and ease of molding, it is perfect for crafting complex shapes and designs without sacrificing structural integrity. Furthermore, because ABS is so easily colored and treated to provide desired textures and appearances, it is well renowned for its aesthetic appeal.

3.1.4. SolidWorks. - SolidWorks was used for designing the top frame of washing machine as well as the analysis

4. Design & Analysis of top frame. - Existing CAD model design of washing machine top frame was made in SolidWorks. Isometric views are available in Fig 2 & Fig 3



Figure II. Isometric view of top frame.



Figure III. Back view of Top frame.

Simplified design of the hinge is shown in Figure IV.

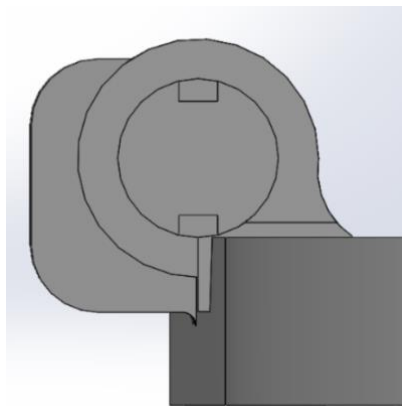


Figure IV. Side view of the hinge.

Motion study was done to calculate loads and dynamics of frame. For this counter torques were provided to both hinges and applied torque was onto the edge to open or close the frame.

Average torque values provided are **3000 N/mm** for counter torques and **9000 N/mm** for applied torque. Moreover, a Handle was attached to make applied torque uniformly distributed.

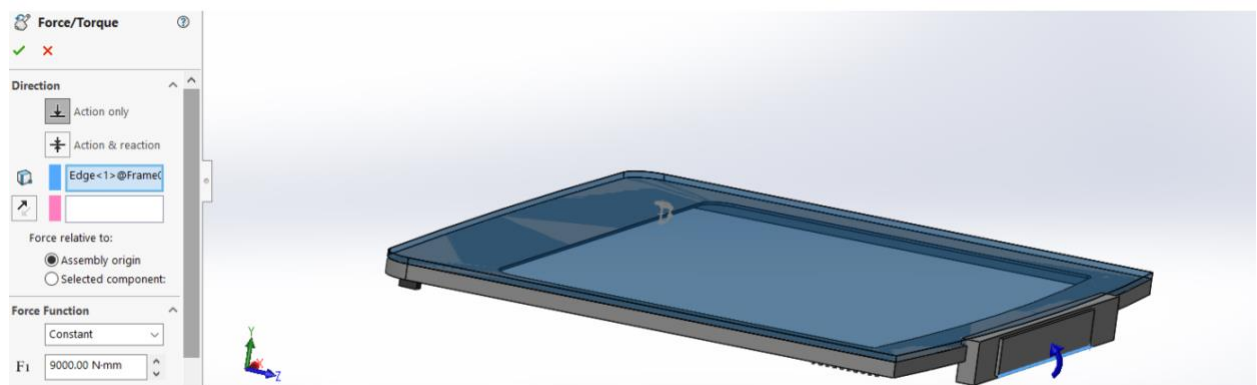


Figure V. Applied torque on the handle of the door.

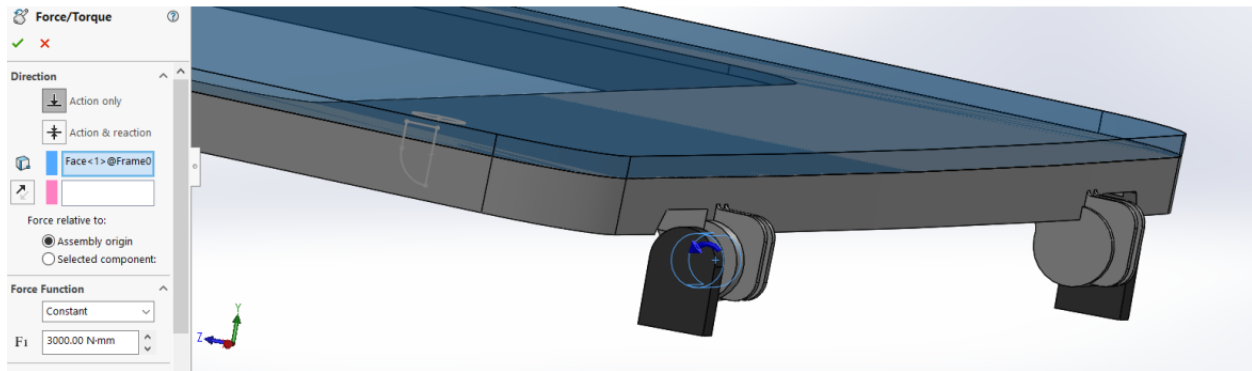


Figure VI. Counter torque on door hinges (same on both hinges).

Load bearing faces were given for applied torque as well. All three torques are applied and motion analysis was done.

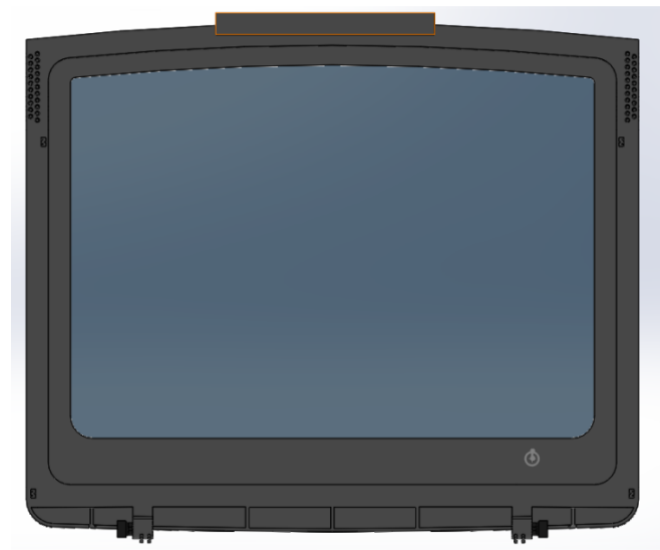


Figure VII. Current design of top frame.

Considerable changes were made to the design in the modified design in order to improve the top frame durability and structural integrity. The area between both hinges, which had been flagged as a possible weak point in the preliminary research, was the main target for reinforcement. Its detailed analysis was done in SolidWorks but minimal improvements were observed in FEA analysis of stress plots, deformation plots and FOS plots.

In order to better disperse stress throughout the frame, more ribs had to added to the design and placed in key locations between the hinges. These ribs could reduce the chance of failure under cyclic loading circumstances and strengthened the structure's overall stiffness.

When the costs associated with creating a new mold for the design modification were evaluated, they were found to be significant. As a result, calculations were made to determine the threshold at which the investment in the new mold development breaks even. But after careful consideration, a different strategy was found to be a more viable option. Instead of changing the mold's design, the decision was made to switch the material in order to prolong the top frame's lifespan. This tactical change promises to increase the product's overall longevity and efficiency while also reducing the high expenses related to mold development.

Modified design of top frame is shown in Figure VIII:

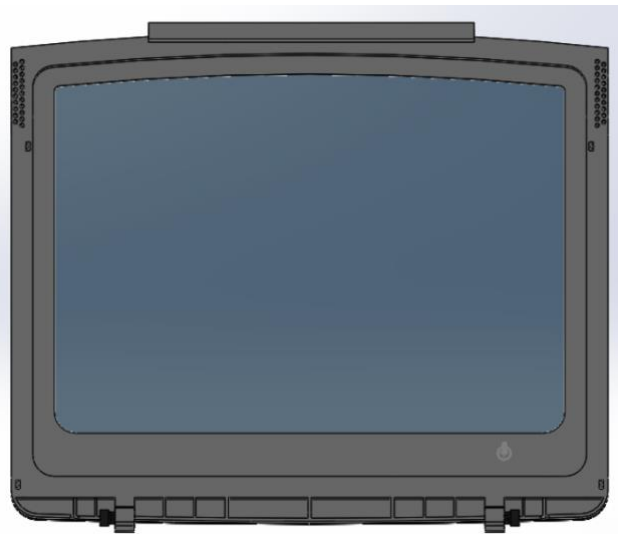


Figure VIII. Improved design of top frame.

A stringent strategy is necessary in order to systematically pick a suitable material to replace ABS in the construction of washing machine top frames. First, CES EduPack 2020 software is used to create a graph that shows fatigue strength versus pricing. With the help of this graph, the list of materials suitable for large-scale production operations can be narrowed without incurring undue material processing expenses. A selection process was carried out among the easily accessible materials in home appliance manufacturing companies, which included HDPE, PP, PC, PC (50% glass fiber reinforced) and ABS. Because ABS has a higher fatigue strength than HDPE or PP, these materials were eliminated. Even though PC's fatigue strength was somewhat higher than ABS's, its higher material cost and not significantly higher fatigue strength made it undesirable. Instead, a PC variation with 50% longer glass fiber was selected. This material is the best option for the application because it has the highest fatigue strength amongst all the available materials. Fatigue strength vs Price graph was prepared in CES EduPack 2020 and is shown in Figure IX.

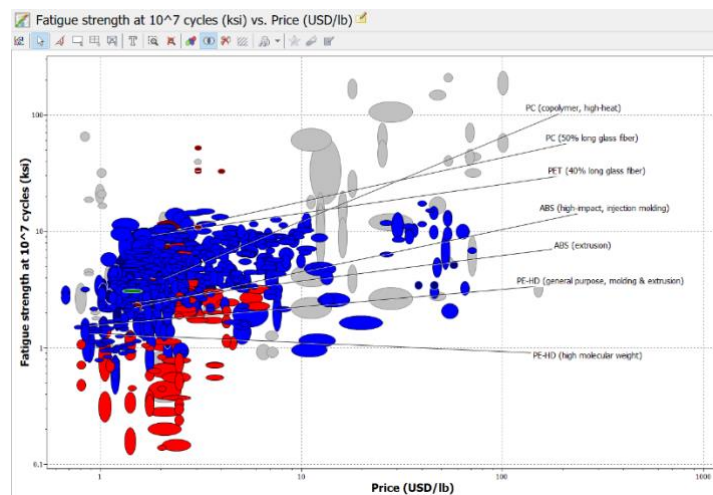


Figure IX. Fatigue strength vs Price graph.

Extensive analyses were carried out on maximum service temperatures as well as processing temperatures after the material was finalized. To make sure that the application complied with the standards, these reviews were essential. The chosen material was found to closely correspond with ABS's processing temperatures and greatly surpass ABS in maximum service temperatures. This alignment upholds operational integrity and process efficiency similar to ABS, giving confidence in the material's suitability for the intended usage in the fabrication of washing machine top frames.

5. Results and Discussion. - In order to identify weak places for future redesign and modification, the first and maybe most important step in the process entails a thorough examination of the stresses and deformations applied to the frame. A number of precise procedures were carefully followed in order to complete this crack initiation and propagation investigation. In order to analyze, visualize and quantify the stress distribution, deformation patterns and factor of safety throughout the frame structure, stress Plot, deformation Plot and factor of safety (FOS) Plot were made. We were able to identify possible weak points or failure sites by using these charts, which gave us crucial insights into how different forces and loads interacted with the frame so that we can have an understanding of the reason and points of failure in washing machine top frame.

Now through the utilization of stress, deformation and factor of safety plots we formulated tailored approaches to strengthen weak areas, maximize material efficiency and improved the frame's overall structural integrity and performance. Therefore, using SolidWorks tools was essential to the iterative design process and made sure that the final frame design satisfied strict reliability and performance requirements.

The original design of the top frame in which crack was getting developed during opening and closing was mentioned in Figure VI. In the original top frame design, von mises stress levels, particularly where the hinge area and the top frame crossed, were really high.

Stress analysis of top frame is show in Figure IX:

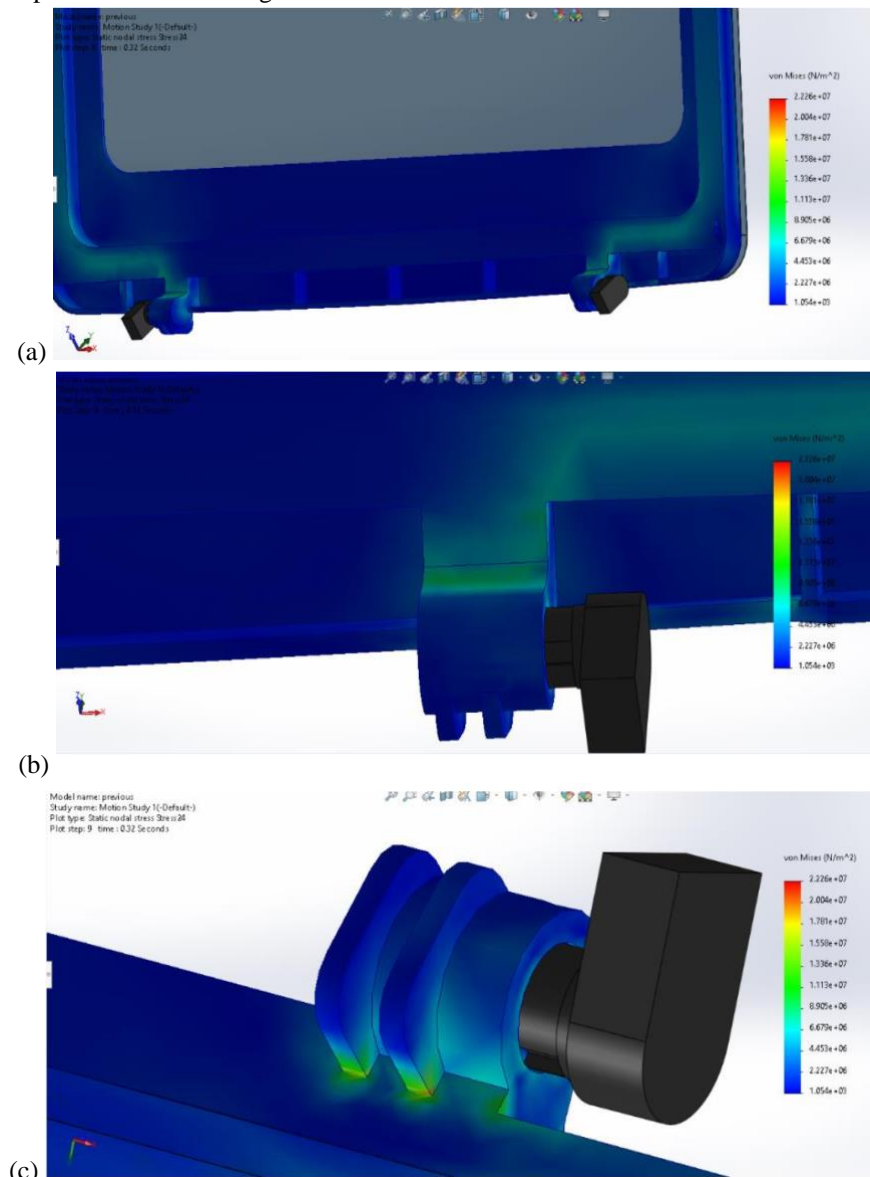


Figure IX – Stress analysis of top frame while opening.

It can be clearly seen in figure IXc that top frame hinge area shows higher von misses stresses i.e., 2.2×10^7 . This excessive stress was compromising the structural integrity of washing machine top frame, and this condition exacerbates when that part is under constant cyclic loading thus causing the hinge to break because of fatigue during operation of washing machine.

Whenever washing machine is operation, hinge region undergoes cyclic loading and deformation will be high in this region.

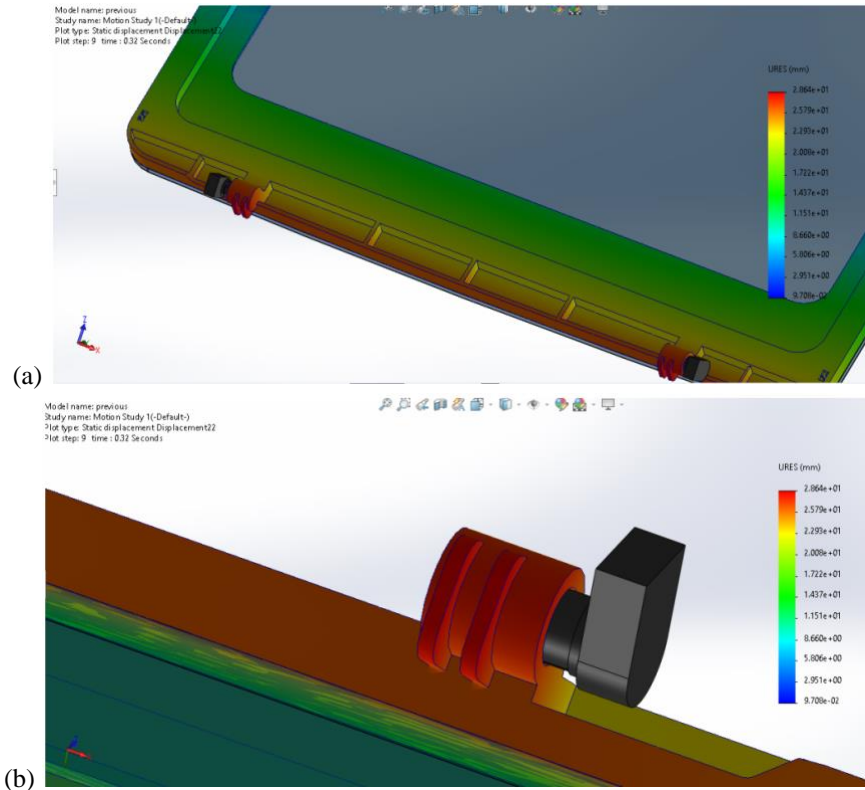


Figure X. Deformation analysis while opening.

During analysis in SolidWorks, 28mm of deformation was observed. 9000 Nm^{-2} was applied on top frame in order to open and close it. Counter torque of 3000 Nm^{-2} was applied on hinges

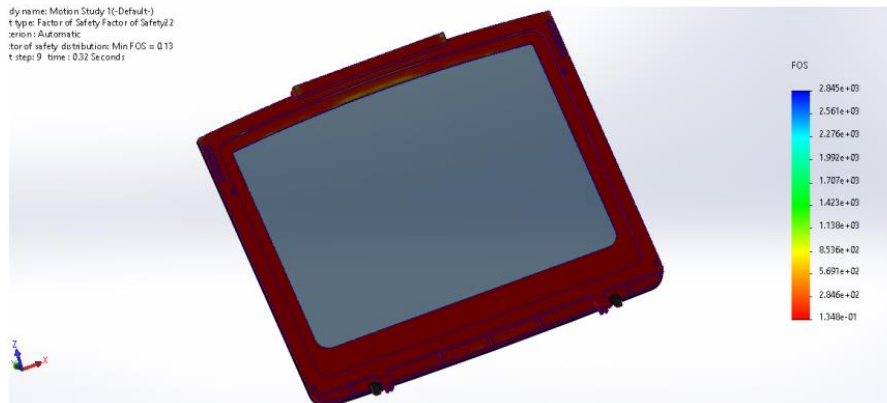


Figure XI. FOS analysis while opening.

Factor of safety of top frame was calculated using SolidWorks software under same boundary conditions and it came out to be 2.845×10^3 .

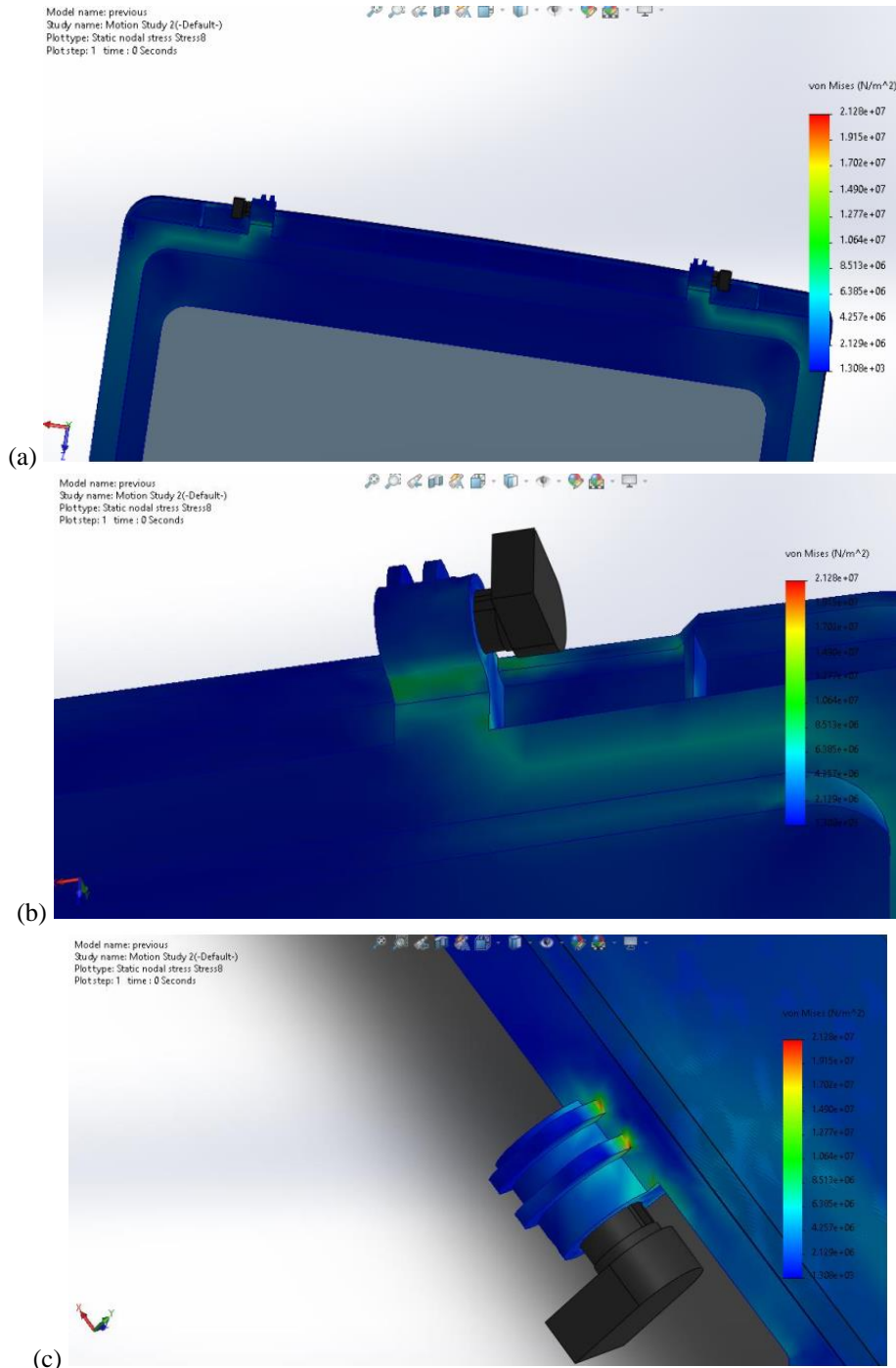


Figure XII. Stress analysis of top frame for closing.

The Von Mises stresses on the washing machine's top frame in closed position were also calculated using SolidWorks software. A careful inspection of Figures 12a, 12b and 12c shows that the overall frame and hinge assembly keep stress levels within a generally safe range. However, closer analysis reveals that the exact place where the top frame integrates with the hinge, which is characterized by acute angles, exhibits increased stress concentrations, even when the washing machine is firmly closed. This discovery implies that, while the frame and hinge assembly can sustain the expected loads, the presence of sharp angles at this key junction remains a source of concern due to the high stress levels it experiences.

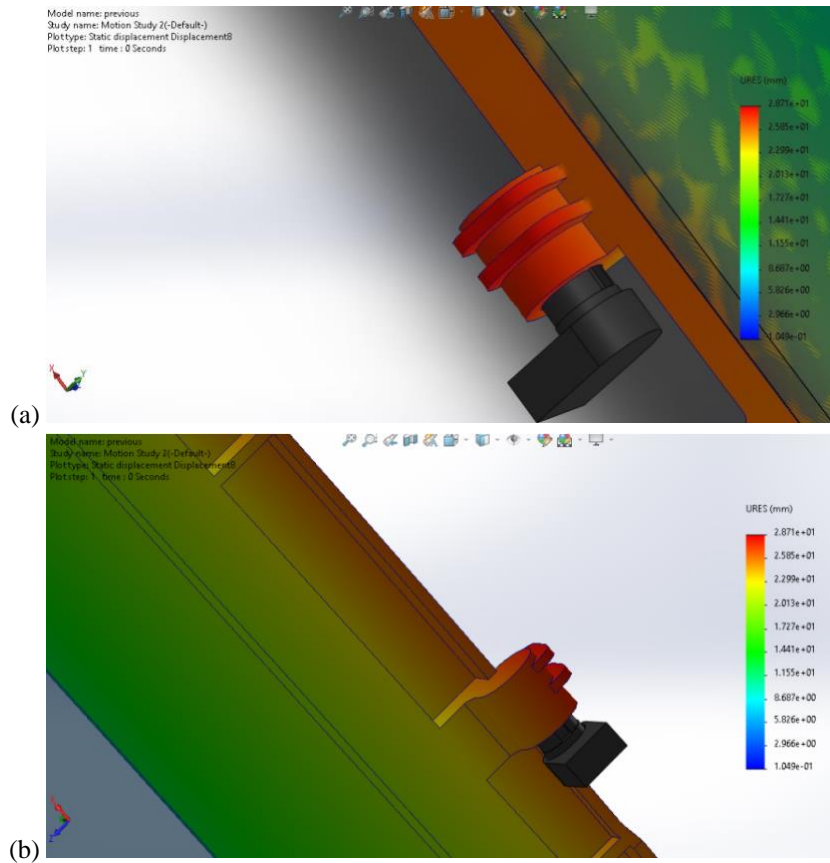


Figure XIII. Deformation analysis of top frame for closing.

During analysis of deformation in top frame in close position using SolidWorks software, 28 mm deformation is observed similar to open position. This indicates that the whole top frame structure is prone to failure under cyclic loading.

Factor of safety analysis was also done using SolidWorks software.

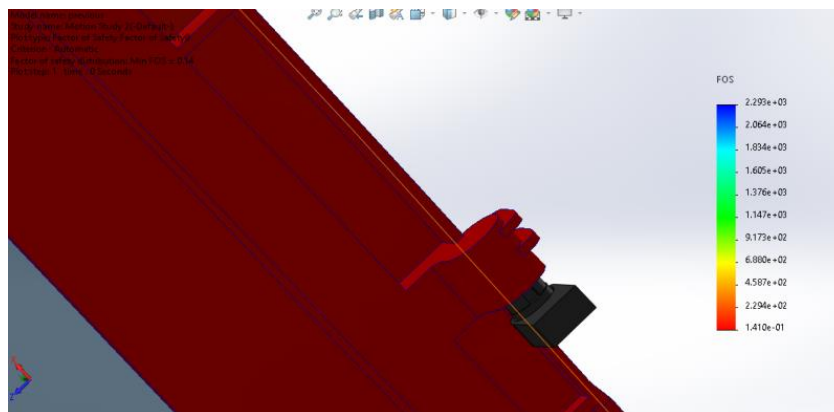


Figure XIV. FOS analysis of top frame for closing

Factor of safety in close position near to hinge interfacing with top frame is extremely low i.e., 0.14 which is extremely less.

Owing to the expenses linked with redesigning, two top frames were produced and put through testing on a door simulator machine, as figure 1 shows. The first top frame was made of ABS (Injection molding grade), which was used for production, and it was first installed on a washing machine. Next, the door simulator machine's open/close

test was started. After 297 cycles, the top frame failed at the hinge interface area. The same testing process was then used to a second top frame made of PC with 50% long glass fiber. A crack developed at the hinge interface location of this top frame just after 3647 cycles.

Improvement of 3350 cycles was observed which ultimately resolves the market defect rate problem and improves the cycle %age by 1128%.

6. Conclusion. - Investigations into the failure processes and structural integrity of washing machine top frames have yielded important insights into the material and design choices that are essential to improving durability and dependability. Thorough stress analysis and deformation analysis have allowed for the identification and treatment of important fatigue failure points, especially at the hinge interface.

Given the financial implications associated with modifying the top frame, a different strategy was considered. An alternative material, PC, was carefully chosen in this experimental method. Testing was then done utilizing a door simulation machine to compare how well the top frame constructed of the current material, ABS, performed. There was significant improvement in result as open/close cycle of washing machine top frame improved from 297 to 3697 cycles which is a 1128% improvement. This resolved the performance issue of washing machine and reduced the market defect rate drastically. A lot of work can be done in improving the design of washing machine top frame as well as development of advanced material like composites with enhanced fatigue resistance and lower processing cost. Machine learning programs can be developed in order to calculate remaining useful life (RUL) for different high stress parts of top frame and hinge. By addressing these prospective areas of work will allow researchers and industry practitioners to continue to develop the state-of-the-art in washing machine top frame design, hence boosting product reliability, sustainability, and customer pleasure in the dynamic home appliances market.

Acknowledgement

We are grateful to Pakistan Elektron Limited (PEL) for providing access to resources and facilities essential for conducting experiments and analysis. We also acknowledge the Madiha Salam for her constructive feedback and guidance, which greatly improved the quality of this manuscript. Without the collective efforts of everyone involved, this research would not have been possible.

References

- [1] M. T. A. Ansari, K. K. Singh, and M. S. Azam, “Fatigue damage analysis of fiber-reinforced polymer composites—A review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 37, no. 9, pp. 636–654, 2018, doi: 10.1177/0731684418754713.
- [2] J. S. Jeong, J. H. Sohn, C. J. Kim, and J. H. Park, “Dynamic analysis of top-loader washing machine with unbalance mass during dehydration and its validation,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 4, pp. 1675–1684, 2023, doi: 10.1007/s12206-023-0309-9.
- [3] J. Gao and Y. Yuan, “Probabilistic modeling of stiffness degradation for fiber reinforced polymer under fatigue loading,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, no. July, p. 104733, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104733.
- [4] C. C. Kuo, N. Gurumurthy, and S. H. Hunag, “Fatigue Behavior of Rotary Friction Welding of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polycarbonate Dissimilar Materials,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 16, 2023, doi: 10.3390/polym15163424.
- [5] A. A. Naqvi, Z. Awan, and A. A. Shaikh, “Effects of Graphite Flakes on the Material and Mechanical Properties of Polystyrene Membranes,” *J. Test. Eval.*, vol. 51, no. 5, 2023, doi: 10.1520/JTE20220409.
- [6] A. Zahoor, A. A. Naqvi, F. A. Butt, G. R. Zaidi, and M. Younus, “Effect of graphene oxide on polyvinyl alcohol membrane for textile wastewater treatment,” *Membr. Water Treat.*, vol. 13, no. 3, pp. 121–128, 2022.
- [7] Z. Awan, A. A. Naqvi, Z. Shahid, F. A. Butt, and F. Raza, “Synthesis and Characterization of Graphene sheets from graphite powder by using ball milling,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 3, pp. 71–76, 2022, doi: 10.18273/revuin.v21n3-2022006.
- [8] A. Fajri, A. R. Prabowo, N. Muhayat, D. F. Smaradhana, and A. Bahatmaka, “Fatigue analysis of engineering structures: State of development and achievement,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 33, no. C, pp. 19–26, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.004.
- [9] George Antaki and R. Gilada, “Design Basis Loads and Qualification,” in *Design Basis Loads and Qualification. In Nuclear Power Plant Safety and Mechanical Integrity*. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417248-7.00002-3>.
- [10] Y. Murakami, T. Takagi, K. Wada, and H. Matsunaga, “Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter,” *Int. J. Fatigue*, vol. 146, p. 106138, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106138.
- [11] P. A. P. M. Ciavarella, D’antuono, “On the connection between Palmgren-Miner rule and crack propagation laws M,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1111/ffe.12789>.
- [12] A. D. Cho, R. A. Carrasco, and G. A. Ruz, “A RUL Estimation System from Clustered Run-to-Failure Degradation Signals,” *Sensors*, vol. 22, no. 14, pp. 1–29, 2022, doi: 10.3390/s22145323.
- [13] N. Tengtrairat, W. L. Woo, P. Parathai, D. Rinchumphu, and C. Chaichana, “Non-Intrusive Fish Weight Estimation in Turbid Water Using Deep Learning and Regression Models,” *Sensors*, vol. 22, no. 14, 2022, doi: 10.3390/s22145161.
- [14] J. L. de M. Vieira *et al.*, “Remaining Useful Life Estimation Framework for the Main Bearing of Wind Turbines Operating in Real Time,” *Energies*, vol. 17, no. 6, pp. 1–17, 2024, doi: 10.3390/en17061430.
- [15] Y. Zhang, “Support vector machine classification algorithm and its application,” *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 308 CCIS, no. PART 2, pp. 179–186, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-34041-3_27.
- [16] M. I. Vawda, R. Lottering, O. Mutanga, K. Peerbhay, and M. Sibanda, “Comparing the Utility of Artificial Neural Networks (ANN) and Convolutional Neural Networks (CNN) on Sentinel-2 MSI to Estimate Dry Season Aboveground Grass Biomass,” *Sustain.*, vol. 16, no. 3, 2024, doi: 10.3390/su16031051.
- [17] N. Vidakis, M. Petousis, A. Maniadi, E. Koudoumas, M. Liebscher, and L. Tzounis, “Mechanical properties of 3D-printed acrylonitrile-butadiene-styrene TiO₂ and ATO nanocomposites,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 7, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/polym12071589.
- [18] V. R. Sastri, “Other Polymers: Styrenics, Silicones, Thermoplastic Elastomers, Biopolymers, and Thermosets,” in *Plastics in Medical Devices (Third Edition)*, 2022, pp. 287–342. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85126-8.00007-2>.
- [19] K. Ravi-Chandar, J. Lu, B. Yang, and Z. Zhu, “Failure mode transitions in polymers under high strain rate loading,” *Int. J. Fract.*, vol. 101, no. 1–2, pp. 33–72, 2000, doi: 10.1023/a:1007581101315.
- [20] S. F. Siddiqui, F. Irmak, A. A. Fasoro, and A. P. Gordon, “Torsional Fatigue Failure of Additively Manufactured Stainless Steel of Reduced Specimen Size,” *Jom*, vol. 72, no. 1, pp. 440–447, 2020, doi: 10.1007/s11837-019-03842-9.

- [21] Q. Z. Fang, T. J. Wang, H. G. Beom, and H. M. Li, “Effect of cyclic loading on tensile properties of PC and PC/ABS,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 8, pp. 1422–1432, 2008, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.022.
- [22] A. D. Hassan, A. A. Nassar, and M. A. Mareer, “Comparative and assessment study of torsional fatigue life for different types of steel,” *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 11, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1390-7.
- [23] E. Correa Gómez, G. M. Domínguez Almaraz, and J. C. Verduzco Juárez, “Crack initiation and propagation on CT specimens of two polymers (ABS and PMMA), under cyclic constant displacement loading,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 100, no. October 2018, pp. 55–64, 2019, doi: 10.1016/j.tafmec.2018.12.013.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

MPRV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

RRPL ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JSLY ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Comparación de sistemas estructurales en edificio de 5 pisos: Base fija vs. interacción suelo-estructura por modelo Barkan-Savinov en Arequipa, Perú

Comparison of structural systems in a 5-story building: Fixed base vs. Soil-structure interaction by Barkan-Savinov model in Arequipa, Peru

Comparaçãõ de sistemas estruturais em edifício de 5 andares: Base fixa vs. Interaçãõ solo-estrutura pelo modelo Barkan-Savinov em Arequipa, Peru

Rosmery Mamani¹, Mirian Ramos², Genner Villarreal^{3(*)}, Arnaldo Falcón⁴

Recibido: 13/08/2024

Aceptado: 30/10/2024

Resumen. - Esta investigación evalúa la variabilidad del resultado estructural contemplando el sistema de interacción suelo-estructura (ISE) aplicado al edificio de 5 pisos con estructura de concreto el cual considera el sistema dual en Arequipa, distrito de Miraflores.

La investigación tiene un método no experimental – descriptiva, el edificio fue analizado por medio del modelo dinámico realizado por los científicos D.D. Barkan - O.A. Savinov y su modelamiento con base fija de suelo intermedio (S2), teniendo en cuenta el análisis de sismicidad dinámica modal espectral, en el cual se consideran los lineamientos en base al RNE E.030 y el análisis que compara el modelo dinámico de base fija y el modelo con interacción suelo-estructura.

Palabras clave: Interacción suelo-estructura, modelamiento numérico, respuesta en el comportamiento estructural.

(*) Autor de Correspondencia

¹ Ingeniero Civil. Universidad de San Martín de Porres (Perú), pao96.ml@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8669-7372>

² Ingeniero Civil. Universidad de San Martín de Porres, mirianramosparillo@usmp.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-6204-7223>

³ PhD. Universidad de San Martín de Porres, gvillarreal@usmp.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1768-646X>

⁴ Magister. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, pcinafal@upc.edu.pe, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0579-8424>

Summary. - This research evaluates the variability of the structural performance contemplating the soil structure interaction (SSI) system applied to the 5-storey building with concrete structure which considers the dual system in Arequipa, district of Miraflores.

The research has a non-experimental - descriptive method, the building was analyzed by means of the dynamic model made by the scientists D.D. Barkán - O.A. Savinov and its modeling with fixed base, of intermediate soil (S2) taking into account the analysis of dynamic spectral-modal seismicity, in which the guidelines based on the RNE E.030 are considered, and the analysis comparing the dynamic model of fixed base and the model with soil - structure interaction.

Keywords: Soil structure interaction, numerical modeling, structural behavior response.

Resumo. - Esta pesquisa avalia a variabilidade do resultado estrutural considerando o sistema de interação solo-estrutura (ISE) aplicado ao edifício de 5 andares com estrutura de concreto que considera o sistema dual em Arequipa, distrito de Miraflores.

A pesquisa possui método não experimental – descritivo, o edifício foi analisado através do modelo dinâmico realizado pelos cientistas D.D. Barkan-O.A. Savinov e sua modelagem com base fixa de solo intermediário (S2), levando em consideração a análise de sismicidade dinâmica modal espectral, na qual são consideradas as diretrizes baseadas na RNE E.030 e a análise que compara o modelo dinâmico de base fixa. e o modelo com interação solo-estrutura.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura, modelagem numérica, resposta no comportamento estrutural.

1. Introducción. - El Perú está situado en una zona sísmica de las más activas del mundo, y se pueden producir fuertes terremotos en la zona. La fuga de la energía sísmica puede producir incrementos comparables a los terremotos del año 1746 y terremotos de 8,8 Mw o menos. Asimismo, alrededor del 83% que compone a la población de Arequipa (INEI, 2020), están propensos a sismos severos.

En Miraflores distrito de Arequipa, el número de casas de concreto, sistemas duales se están aumentando, por lo que es muy importante garantizar la seguridad de la estructura brindando procesamiento directo y modelado estructural de los edificios. Dado que los daños sísmicos varían según las condiciones del terreno, se requiere una investigación conjunta entre el suelo, los cimientos y la superestructura. Los suelos y las estructuras deben verse como un sistema que interactúa entre sí, por lo que la falla de cualquier parte del sistema puede afectar la estructura. Estudiarlo de forma aislada no es algo aplicado en la vida real (Rodríguez, 2019).

En la actualidad, la interacción suelo-estructura (ISE) es ampliamente investigada, y este problema generalmente se considera como una relación dinámica entre el suelo y los cimientos (Villarreal, 2020). A pesar de ello, cabe señalar que el inconveniente actual de la ISE está lejos de un planteamiento práctico porque hay muchos espectros que no pueden resolverse en modelos matemáticos y físicos. Por esta razón, este es un problema amplio para los investigadores. La efectividad de los modelos ISE cuando se analiza y diseña estructuralmente permite asegurar que una estructura no pueda separarse del terreno (Villarreal, Cerna y Espinoza, 2021).

Al no considerar la ISE en el análisis y diseño de estructuras en terreno blando, no es aceptable porque afecta no sólo las características dinámicas y las fuerzas de diseño sino también al movimiento total del cual la estructura es capaz. Esto es cierto tanto para estructuras en suelos blandos y porosos como para estructuras en suelos duros (Tena, 2019).

Se tiene como antecedentes de investigación a los siguientes autores:

(Arquiñego & Velásquez 2020) El presente trabajo se realiza debido a los eventos sísmicos que se tuvo en Ica del año 2007, que produjo desastres en hospitales, carreteras y viviendas. Por lo que se realizó una edificación bajo el sistema aporticado y zapatas aisladas en el Distrito de Cercado de Lima. La finalidad de la investigación era ejecutar un análisis dinámico en un modelo tipo suelo – estructura, para así poder ver certeramente el comportamiento dinámico de las cimentaciones esto debido a los sismos que altera la interacción suelo-estructura y así poder ejecutar una edificación segura. Se ha considerado la aplicación de la Norma E-030, también se utilizó el software ETABS. De acuerdo a los resultados se obtuvo que las vibraciones que se derivan de entre piso aumentan de 0.57%, 3.15% y 21.75%.

(Franco & Gálvez 2021) tiene como objetivo en su investigación analizar la interacción suelo – estructura para cimentaciones superficiales de vivienda de dos pisos sobre relleno antrópico, Cieneguilla – Lima 2021. La vivienda familiar en donde se realizó la investigación se encuentra asentado sobre relleno antrópico, por lo que presentaría fallas estructurales y esto produciría fisuras en el concreto, esta edificación no soportaría una sobrecarga y puede producir un colapso de la edificación. En esta investigación, se obtuvo la respuesta que la edificación, la cual, se encuentra en una zona de relleno antrópico, se verificó el incremento de desplazamientos de entrepisos hasta 54.77% y el aumento de periodo de vibración de 0.7774s, las fuerzas axiales disminuyeron 54.27%, las fuerzas cortantes disminuyeron 54.27% y el momento flector disminuyó 46.36%.

(Prada & Mateo, 2022) El objetivo del proyecto de investigación es concluir la interacción suelo-estructura de un edificio con oficinas de 6 pisos y 2 sótanos, esta investigación intenta incrementar comparaciones de las diferentes respuestas, cambiando las condiciones del suelo sobre donde estaría cimentado por lo que se tiene que tomar el efecto de la ISE. Se ejecutará el análisis para suelos S1, S2 y S3 según la norma E.030 (2018). Se utilizó el programa SAP2000 en donde se modeló cada caso y se realizó el análisis estático.

(Villarreal, Cerna & Espinoza, 2021) se encamina en su investigación a desarrollar métodos de cálculo dinámico de edificaciones que reflejen la práctica internacional en el diseño de estructuras que brinden confianza y seguridad, se lleva a cabo una investigación en una edificación residencial de cinco niveles con muros de ductilidad limitada y se analiza la ISE para los modelos de Barkan D.D. - Savinov O.A. y la Norma Rusa, se utilizó el programa SAP2000 con las siguientes conclusiones: Considerar la ISE permite acercar la investigación a la realidad y las fuerzas estructurales asociadas a la actividad sísmica se distribuyen entre los muros estructurales y la cimentación.

(Miao et al., 2020) investigan la interacción dinámica de sistemas de los edificios sobre el suelo que cuenta con una estación de metro sujeta a movimientos producidos en el suelo, conocido como estructura arena-arena-superficie (SSSI). Se realizó un análisis numérico basado en pruebas vibratorias teniendo la reacción sísmica que compone el edificio, túnel y un suelo. Para verificar el modelo numérico, los resultados se comparan con registros experimentales. Luego del proceso que se modela, desarrollando con el software ABAQUS, y rápidamente se mejoró el sistema de modelamiento automático para generar sistemas aéreos multiestación para el cálculo del sitio. Durante el cálculo, se ejecutó el procedimiento del modelo Davidenkov modificado para tener en cuenta la no linealidad de los suelos blandos. Se estudió el efecto de las comunicaciones en la interpretación sísmica de las estaciones subterráneas mediante un sistema de modelización automatizada. Se eligió la relación entre la aceleración inferior y superior para evaluar las interacciones dinámicas del sistema complejo. Se consideran en el estudio los factores influyentes del edificio como la distancia horizontal y en esta estación de metro, así como los niveles de los edificios, la altura total de la profundidad que comprende la estación subterránea. Teniendo como resultado diversos aspectos cruciales, como la cantidad de construcciones y la profundidad de la excavación, influyen significativamente.

(Zhang, Esmailzadeh Seylab, & Taciroglu, 2019) se investiga el tema “ABAQUS Toolbox for Soil-Structure Interaction Analysis”. Es bien sabido que la interacción suelo-estructura (ISE) tienen efectos significativos durante los sismos muy severos, convirtiendo dicho efecto a un factor importante que diseña estructuras resistentes a los sismos. Este análisis de ISE se realiza mediante métodos directos o indirectos. En ambas opciones, el modelo numérico representa el dominio computacional truncado y reducido. Actualmente, las funciones antes mencionadas no se disponen para investigadores e ingenieros, es por ello, que se implementa en ABAQUS el denominado Método de Reducción de Dominio y Ecuaciones Perfectas para calcular y definir las fuerzas de nodos. Verifican su precisión y estabilidad que se implementa en las regiones de terreno uniformes y heterogéneas, ondas SV verticales y horizontales, también los problemas bidimensionales y tridimensionales. Por último, presentan ejemplos de aplicación utilizando las funciones implementadas: extrayendo funciones de impedancia y realizando un análisis en su respuesta de estructuras enterradas bajo ondas de choque. El código implementado para DRM y PML se distribuye para uso general.

(Tena, 2019) su investigación evidencia la utilidad al incorporar ISE en el análisis estructural de suelos sólidos y cimientos superficiales y su aplicación simple y original a suelos compresibles que se ubica en la ciudad de México, se realizaron estudios con aportes de ISE. Se optó por estructuras construidas sobre relleno con cimentaciones poco profundas y estructuras construidas sobre terreno blando, se discute el daño de las edificaciones estudiadas luego de un gran sismo con base en el detalle de las investigaciones realizadas para estructuras existentes. Se registró el comportamiento sísmico durante los sismos y se obtuvieron las propiedades dinámicas mediante ensayos de vibración dinámica. Por lo tanto, se ve la importancia de modelar estructuras y las relaciones suelo-estructura, no sólo para estructuras en terrenos blandos e irregulares, sino también para estructuras en terrenos rígidos.

(Castro & Pérez 2020) de acuerdo a su proyecto de investigación es desarrollar un modelo estructural contemplando la interacción sísmica del suelo para los 3 tipos de suelos (A, C y E) y tiene la finalidad de considerar el modelo de una edificación y su objetivo principal es saber el comportamiento de los elementos estructurales dependiendo de la calidad del suelo. El resultado obtenido en el cálculo de las zapatas, se determina la importancia de la influencia de las cadenas de cimentación porque actúan como resortes laterales y esto aumenta la rigidez lateral de la zapata.

(Pinto y Ledezma, 2019) en su estudio de investigación, examinan edificios altos y su comportamiento sísmico, considerando la interacción dinámica suelo-estructura (DSSI) y realizar un análisis bidimensional utilizando elementos finitos. Los resultados muestran las fuerzas laterales del muro, que modifican la respuesta sísmica. De igual forma, para el análisis simple utilizado antes de las normas de diseño estructural, se muestra que es importante tener en cuenta todas las variables como la profundidad del subsuelo, las características del terreno y las edificaciones cercana.

(Calderín, Almenarez y Boada, 2020) de acuerdo el estudio su apreciación se centró en los edificios de 18 pisos en la ciudad más propensa a sismos en Cuba, por medio de un estudio que compara al diseño de la Norma Mexicana con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, utilizando un modelo simple que toma en cuenta la reducción de la ductilidad de la edificación debido a la extensión del período base. Los resultados obtenidos con base en el código para sismos antes mencionado se presentan con las siguientes conclusiones. Sin tomar en cuenta la norma NC 46:2017 de

Cuba, se calcula una mayor resistencia al corte, lo que redonda en un mejor diseño y un aumento de los indicadores económicos. Los diferentes valores de desplazamiento horizontal y valores de corte de "X" son superiores a los del estándar americano.

2. Análisis Sísmico Dinámico – Modelo Base Fija. - Tenemos una edificación de categoría “C” (oficinas) en consecuencia, la carga sísmica conforme a la norma de diseño sismorresistente del Perú E.030 considera el aporte del 100%CM y 25%CV.

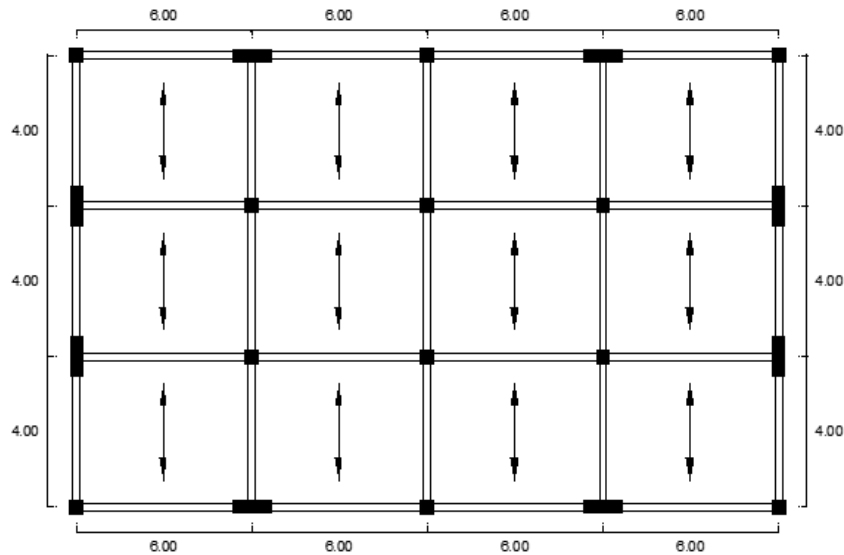


Figura 1.- Planta típica primer piso.

2.1. Validación del Factor R. - Para el sistema dual, se contrarrestan las fuerzas sísmicas combinando muros y pórticos estructurales. La repartición de la fuerza cortante a lo largo de los muros se sitúa en un porcentaje de 20 % y el 70 % de la fuerza cortante en la base del edificio.

Story	Load Case/Combo	VX (tonf)
Piso 5	SISMO XX Max	43,42
Piso 4	SISMO XX Max	84,18
Piso 3	SISMO XX Max	114,34
Piso 2	SISMO XX Max	134,34
Piso 1	SISMO XX Max	144,08

Tabla I. Fuerzas en dirección XX.

Story	Load Case/Combo	VY (tonf)
Piso 5	SISMO YY Max	41,94
Piso 4	SISMO YY Max	83,91
Piso 3	SISMO YY Max	115,67
Piso 2	SISMO YY Max	137,25
Piso 1	SISMO YY Max	147,80

Tabla II. Fuerzas en dirección YY.

2.2. Vista de placas. -

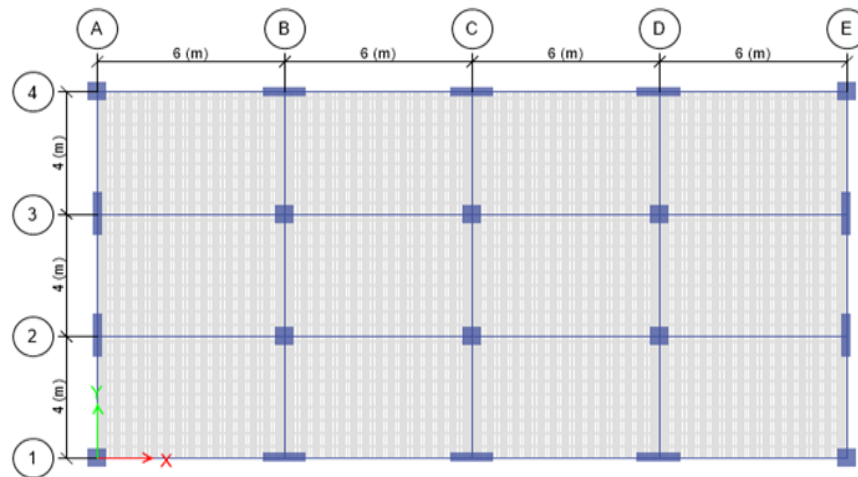


Figura 11.- Vista de placas.

Story	Load Case/Combo	VX (tonf)
Piso 5	SISMO XX Max	45,15
Piso 4	SISMO XX Max	89,86
Piso 3	SISMO XX Max	124,01
Piso 2	SISMO XX Max	147,01
Piso 1	SISMO XX Max	158,27

Tabla III. Fuerzas en dirección X.

Observamos que la base del edificio tiene una fuerza cortante de 158,27 tonf.

Las placas en la dirección XX tienen el siguiente cortante:

Placas: $V_x = 17,53$ tonf $V_x = 17,93$ tonf

Son 6 placas: $V_x = 4(17,53) + 2(17,93) = 105,98$ tonf

Porcentaje = $105,98 \times 100 / 158,27 = 66,96\% < 70\%$

Las placas llevan un cortante sísmico cuyo porcentaje no supera el 70% del cortante en la base. Por ello, el factor $R=7$ es correcto y en su sistema estructural en XX califica como Dual.

Story	Load Case/Combo	VY (tonf)
Piso 5	SISMO YY Max	43,84
Piso 4	SISMO YY Max	89,48
Piso 3	SISMO YY Max	125,11
Piso 2	SISMO YY Max	149,79
Piso 1	SISMO YY Max	162,32

Tabla IV. Fuerzas en dirección Y.

En la base del edificio su fuerza cortante es de 162,32 tonf.

Las placas en la dirección YY tienen el siguiente cortante:

Placa: $V_y = 22,99$ tonf

Son 4 placas: $V_y = 4(22,99) = 91,96$ tonf

Porcentaje = $91,96 \times 100 / 162,32 = 56,65\% < 70\%$

Las placas llevan un cortante sísmico cuyo porcentaje no supera el 70% del cortante en la base. Por ello, el factor $R=7$ es correcto y el sistema estructural en la dirección YY califica como Dual.

2.3. Modos de vibración en base fija. -

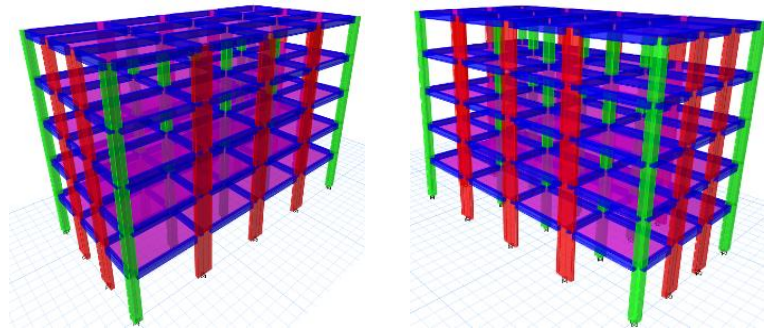


Figura III.- Isométricos de Modelo Estructural.

Las propiedades de la estructura (propiedades dinámicas) son importantes en el análisis modal espectral, su vibración y cada modo contribuye individualmente en la respuesta.

Es necesario tener en cuenta por cada entrespaño al menos 3 modos de vibración, por lo que para este proyecto se han considerado 15 modos. Sin embargo, la selección de los modos que se requiera para la suma de sus masas efectivas garantizan el 90% total de la masa. Se exhibe gráficamente los tres primeros modos, junto con sus respectivos periodos de vibración.

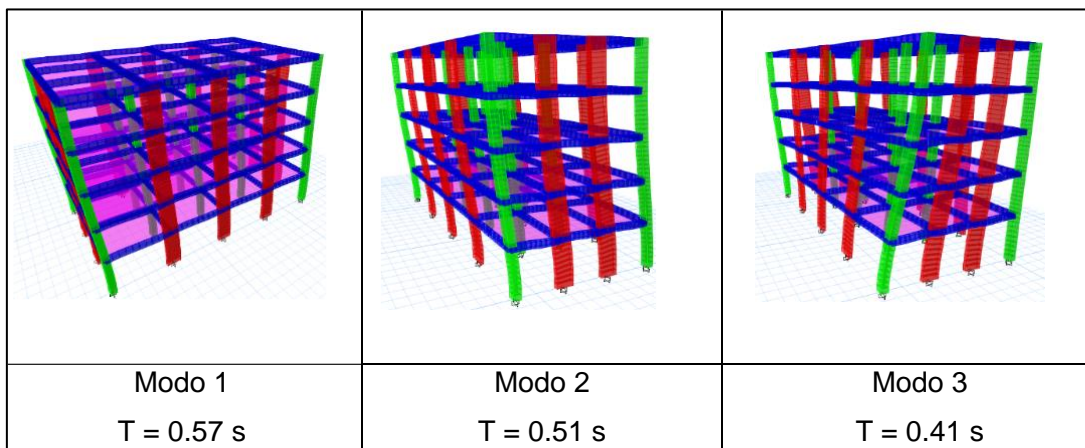


Figura IV.- Modos de vibración.

Mediante la representación gráfica observamos que las vibraciones en el modo 1 y el modo 2 indican traslación en "X" e "Y", respectivamente. Por otro lado, el modo 3, de manera evidente, se visualiza como una rotación en el eje "Z". El cálculo de sus modos vibración sigue un proceso que analiza y adecua la distribución de masas y las propiedades de rigidez.

2.4. Porcentaje de masa participativa en modos de vibración de la estructura. -

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
Case	Mode	Periodo	UX	UY	Sum UX	Sum UY
Modal	1	0,569	81,14%	0,00%	81,14%	0,00%
Modal	2	0,509	0,00%	83,51%	81,14%	83,51%
Modal	3	0,405	0,00%	0,00%	81,14%	83,51%
Modal	4	0,162	12,32%	0,00%	93,46%	83,51%

Modal	5	0,155	0,00%	10,88%	93,46%	94,39%
Modal	6	0,119	0,00%	0,00%	93,46%	94,40%
Modal	7	0,082	0,00%	3,47%	93,46%	97,87%
Modal	8	0,078	4,46%	0,00%	97,92%	97,87%
Modal	9	0,060	0,00%	0,00%	97,92%	97,87%
Modal	10	0,056	0,00%	1,50%	97,92%	99,36%
Modal	11	0,047	0,00%	0,00%	97,92%	99,36%
Modal	12	0,047	1,64%	0,00%	99,56%	99,36%
Modal	13	0,045	0,00%	0,40%	99,56%	99,77%
Modal	14	0,041	0,00%	0,12%	99,56%	99,89%
Modal	15	0,037	0,00%	0,00%	99,56%	99,89%

Tabla V. Masa Participativa.

Se obtuvieron los datos de "participating mass ratio" en ETABS. De acuerdo con la norma E030 se requiere considerar un número mínimo de modos cuya masa participativa supere el 90%. A partir de estos resultados, se pueden realizar las siguientes interpretaciones:

- El modo 1 se caracteriza por una traslación en la dirección "X", lo que se confirma mediante el porcentaje de masa participativa, que alcanza un 81,14%.
- El modo 2 se corresponde con una traslación en la dirección "Y", respaldado por un porcentaje de masa participativa del 83,51%.
- El modo 3 predominante corresponde a una rotación en "Z".
- Hasta el modo 4, la acumulación del porcentaje de masa participativa alcanza un 93,46%, superando el umbral del 90%. Se puede considerar sólo hasta el modo 4 en la dirección XX y no los 15 modos que se considera en software.
- En el modo 5 se tiene la masa participativa del 94,39%, que supera el 90%, podemos limitarnos a considerar solo hasta el modo 5 en la dirección YY, en lugar de los 15 modos que fueron considerados en el programa.
- En concordancia con la norma E030, para este caso, se deben de considerar como mínimo 5 modos de vibración.

2.5. Control de distorsión de entrepisos. - La norma E.030 indica valores máximos permitidos para la distorsión de entrepisos, específicamente 0.007 para concreto armado, como es el caso de la presente investigación. En las figuras V y VI se muestran las distorsiones y desplazamientos en las direcciones X e Y.

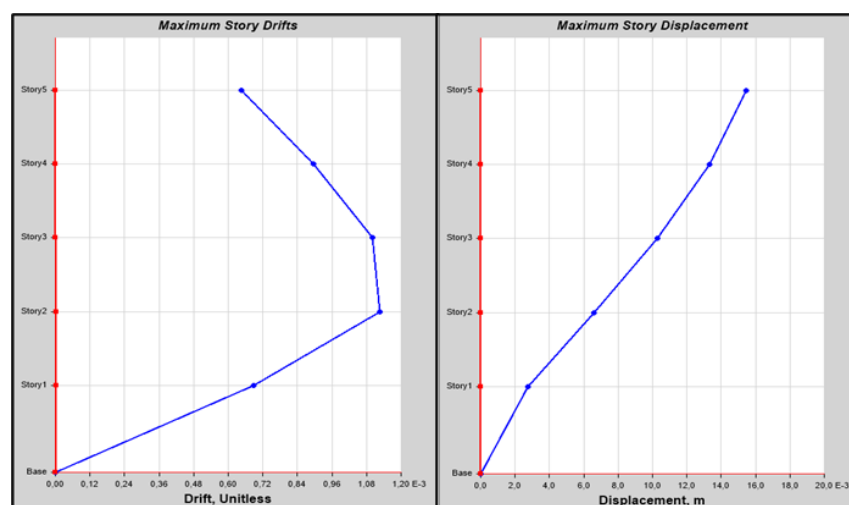


Figura V.- Distorsiones de entripiso y desplazamientos en X.

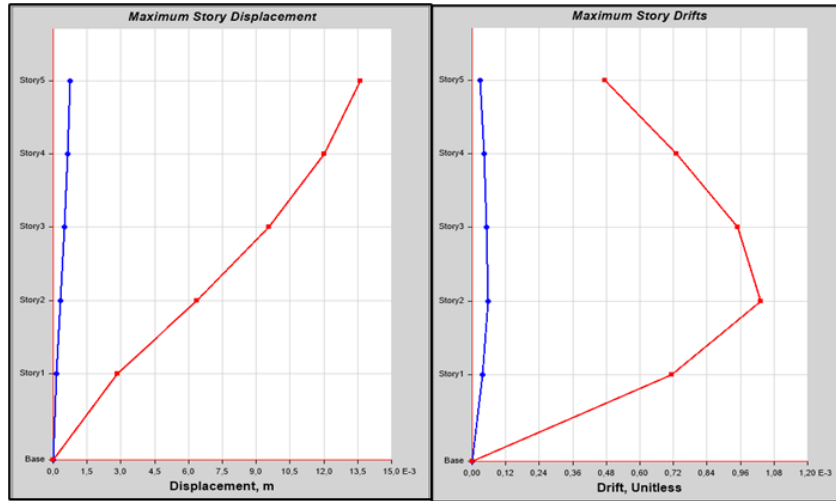


Figura VI.- Distorsiones de entrepiso y desplazamientos en Y.

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: XX						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	XX Max	0,015457	3,40	0,081	0,011	0,0033	0,0070
Piso 4	XX Max	0,013306	3,40	0,070	0,016	0,0047	0,0070
Piso 3	XX Max	0,010292	3,40	0,054	0,020	0,0058	0,0070
Piso 2	XX Max	0,006567	3,40	0,034	0,020	0,0059	0,0070
Piso 1	XX Max	0,002753	4,00	0,014	0,014	0,0036	0,0070

Tabla VI. Distorsión de entrepiso en la dirección X.

Máxima distorsión = 0,0059

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión < Máxima distorsión permisible: correcto

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: YY						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	YY Max	0,012119	3,40	0,064	0,007	0,0022	0,0070
Piso 4	YY Max	0,010720	3,40	0,056	0,011	0,0034	0,0070
Piso 3	YY Max	0,008545	3,40	0,045	0,015	0,0044	0,0070
Piso 2	YY Max	0,005690	3,40	0,030	0,016	0,0048	0,0070
Piso 1	YY Max	0,002563	4,00	0,013	0,013	0,0034	0,0070

Tabla VII. Distorsión de entrepiso en la dirección Y.

Máxima distorsión = 0,0048

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión < Máxima distorsión permisible: correcto

3. Análisis Sísmico Dinámico Modal Espectral – Modelo ISE. -

3.1. Recopilación de datos del Estudio de Mecánica de Suelos. - Habiendo realizado el estudio de mecánica de suelos (EMS) para el presente proyecto, a fin de tener las propiedades del suelo de fundación y sus condiciones geotécnicas físico y mecánicas, se llevó a cabo el procedimiento mediante el análisis sísmico dinámico del edificio de 5 pisos. Al modelo numérico se incorporaron los resultados, considerando las propiedades geotécnicas del estudio de suelos. Revisado los estudios se tiene como conclusión que pertenece a la categoría de suelo intermedio "S2" con las características siguientes:

Del EMS, se cuenta con datos de propiedades del suelo de fundación a ser empleados para el análisis ISE:

- Clasificación de suelo: Arena arcillosa de baja plasticidad
- Módulo de elasticidad del suelo $E_s = 20 \text{ MPa}$
- Densidad del suelo $\rho_s = 0,10 \text{ tonf.s}^2/\text{m}^4 = 1,00 \text{ kN.s}^2/\text{m}^4$
- Coeficiente de Poisson del suelo $\mu_s = 0,35$
- Capacidad portante del suelo $q_{adm} = 1,09 \text{ kgf/cm}^2$

Piso	Estado	Localización	P (tonf)
Piso 1	Dead	Top	792,61
Piso 1	Dead	Bottom	867,49
Piso 1	Live	Top	259,20
Piso 1	Live	Bottom	259,20
Piso 1	Dead	Top	443,28
Piso 1	Dead	Bottom	443,28

Tabla VIII. Cargas acumuladas del 1er piso.

$$\text{Peso} = 867,49 + 443,28 + 259,20$$

$$\text{Peso} = 1569,97 \text{ tonf}$$

3.2. Cálculo de masas de la platea de cimentación y coeficientes de rigidez del modelo D.D. Barkan – O.A. Savinov. -

En la platea de cimentación sus masas experimentan traslaciones en los ejes centroidales "X, Y, Z" y rotaciones alrededor de los ejes de contacto del suelo - platea (designados como X', Y', Z'), se determinan mediante el enfoque de una lámina rectangular delgada, utilizando las dimensiones totales como punto de referencia.

Para el cálculo de los coeficientes de rigidez por el modelo dinámico D.D. Barkan – O.A. Savinov, se siguió el procedimiento claramente explicado en el capítulo 2 del libro "Interacción suelo-estructura en edificaciones con platea de cimentación" del Dr. Villarreal

Masas traslacionales:

$$M_x = 21,14 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_y = 21,14 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_z = 21,14 \text{ tonf.s}^2.m$$

Masas rotacionales:

$$M_{\phi x'} = 1015,20 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_{\phi y'} = 254,16 \text{ tonf.s}^2.m$$

$$M_{\psi z'} = 1268,40 \text{ tonf.s}^2.m$$

Coefficientes de rigidez de la platea:

$$K_x = 398\,260,80 \text{ tonf/m}$$

$$K_y = 398\,260,80 \text{ tonf/m}$$

$$K_z = 505\,728,00 \text{ tonf./m}$$

$$K_{\varphi x} = 30\,744\,576,00 \text{ tonf. m}$$

$$K_{\varphi y} = 6\,877\,440,00 \text{ tonf. m}$$

3.3. Diseño numérico con ISE. - El diseño con ISE involucra a la representación del suelo el cual cuenta con elementos elásticos deformables. En el modelo dinámico Barkan, los grados de libertad son limitados durante el giro en el eje "Z", considerando cinco de los seis grados de libertad.

- Al liberar los nudos y crear el material rígido para la platea se realizará la asignación de masas.

Story	Label	Unique Name
Base	540	640
GUID: 3a944fae-b6ac-4f8d-adfe-967352c29310		

Object Data	
Geometry	Assignments
Assignments > Restraints RZ Springs COEFICIENTES Diaphragm From Shell Object Panel Zone None > Mass UX; UY; UZ; RX; RY; RZ Include in Analysis Mesh No > Groups 1 Group	

Masa traslacional:
$M_x = 21,14 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_y = 21,14 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_z = 21,14 \text{ tonf. s}^2.m$
Masa rotacional:
$M_{\varphi x'} = 1015,20 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_{\varphi y'} = 254,16 \text{ tonf. s}^2.m$
$M_{\psi z'} = 1268,40 \text{ tonf. s}^2.m$

Figura VII.- Cuadro de Asignación de Masas.

- Asignación de coeficientes de rigidez.

General Data		Coeficientes de rigidez de la platea:
Property Name	COEFICIENTES	
Display Color	Change...	$K_x = 398\,260,80 \text{ tonf./m}$
Property Notes	Modify/Show Notes...	$K_y = 398\,260,80 \text{ tonf./m}$
Spring Stiffness Options		$K_z = 505\,728,00 \text{ tonf./m}$
<input checked="" type="radio"/> User Specified/Link Properties <input type="radio"/> Based on Soil Profile and Footing Dimensions		$K_{\varphi x} = 30\,744\,576,00 \text{ tonf. m}$
Simple Spring Stiffness in Global Directions		$K_{\varphi y} = 6\,877\,440,00 \text{ tonf. m}$
Translation X	398260,8 tonf/m	Assignments > Restraints RZ Springs COEFICIENTES Diaphragm From Shell Object Panel Zone None > Mass UX; UY; UZ; RX; RY; RZ Include in Analysis Mesh No > Groups 1 Group
Translation Y	398260,8 tonf/m	
Translation Z	505728 tonf/m	
Rotation about X-Axis	30744576 tonf-m/rad	
Rotation about Y-Axis	6877440 tonf-m/rad	
Rotation about Z-Axis	0 tonf-m/rad	

Figura VIII.- Cuadro de Asignación de Rigidez en la platea.

- Resultados de modos del modelamiento ISE.

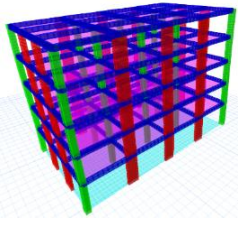
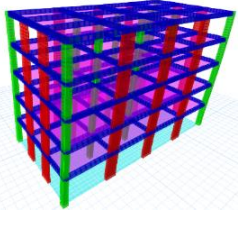
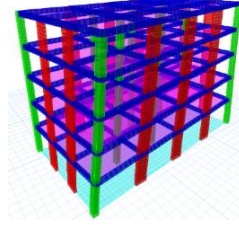
		
Modo 1 T = 0.76 s	Modo 2 T = 0.66 s	Modo 3 T = 0.58 s

Figura IX.- Modos de vibraciones considerando la ISE.

Como se observa, las formas de vibración son representadas gráficamente: las traslaciones en "X" e "Y" corresponden al Modo 1 y el Modo 2. En el Modo 3, visualmente se aprecia que implica una rotación en el eje "Z".

En el análisis de los modos de vibración se ha considerado la rigidez y la distribución de sus masas. En la norma E.030 se indica que se deben de considerar un número de modos que superen el 90% de la masa participativa.

En la tabla IX se muestran las masas participativas para los 15 modos de vibración.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
Case	Mode	Periodo	UX	UY	Sum UX	Sum UY
Modal	1	0,756	80,71%	0,00%	80,71%	0,00%
Modal	2	0,656	0,00%	82,36%	80,71%	82,36%
Modal	3	0,580	0,00%	0,00%	80,71%	82,36%
Modal	4	0,170	0,00%	0,00%	80,71%	82,36%
Modal	5	0,168	12,60%	0,00%	93,31%	82,36%
Modal	6	0,159	0,00%	11,79%	93,31%	94,16%
Modal	7	0,083	3,64%	0,00%	96,96%	94,16%
Modal	8	0,083	0,00%	2,92%	96,96%	97,08%
Modal	9	0,078	0,00%	0,00%	96,96%	97,08%
Modal	10	0,050	0,00%	1,08%	96,96%	98,16%
Modal	11	0,048	1,29%	0,00%	98,25%	98,16%
Modal	12	0,043	0,00%	0,00%	98,25%	98,16%
Modal	13	0,036	0,00%	0,21%	98,25%	98,37%
Modal	14	0,033	0,25%	0,00%	98,50%	98,37%
Modal	15	0,028	0,00%	0,00%	98,50%	98,37%

Tabla IX. Porcentaje de masa participativa en modos de vibración de la estructura.

Los resultados fueron extraídos del programa ETABS "participating mass ratio". De acuerdo con la norma E030 se requiere considerar un número mínimo de modos cuya masa participativa supere el 90%. A partir de estos resultados, se pueden realizar las siguientes interpretaciones:

- El modo 1 se caracteriza por una traslación en "X", evidenciado por un porcentaje de masa participativa del 80,71%.
- El modo 2 refleja un porcentaje de masa participativa del 82.36% implicando una traslación en "Y".
- El tercer modo que predomina, se caracteriza por una rotación en "Z".
- En el modo 5 la acumulación del porcentaje de la masa participativa es de 93,31%, superando el 90%. Se sugiere considerar solo hasta el modo 5 en la dirección X en lugar de los 15 modos contemplados en el programa.
- Hasta el modo 6 la acumulación del porcentaje de masa participativa es del 94,16%, superando el 90%. Se propone considerar solo hasta el modo 6 en la dirección Y en lugar de los 15 modos contemplados en el programa.
- En concordancia con la norma E030, para este caso, se deben de considerar como mínimo 5 modos de vibración.

3.4. Control de distorsiones de entresijos. - La norma E.030 indica valores máximos permitidos para la distorsión de entresijos, específicamente 0.007 para concreto armado, como es el caso de la presente investigación. En las figuras X y XI se muestran los desplazamientos y distorsiones en las direcciones X e Y.

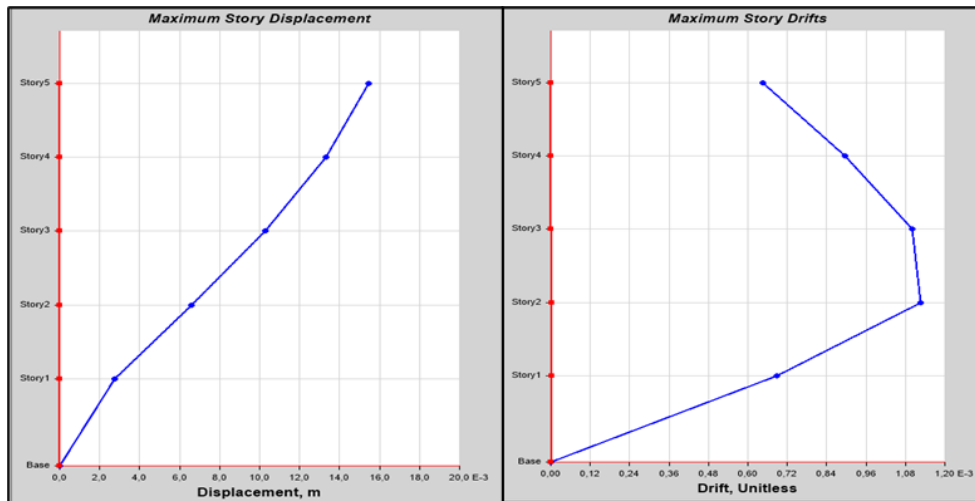


Figura X.- Desplazamientos y distorsiones de entrepiso en X.

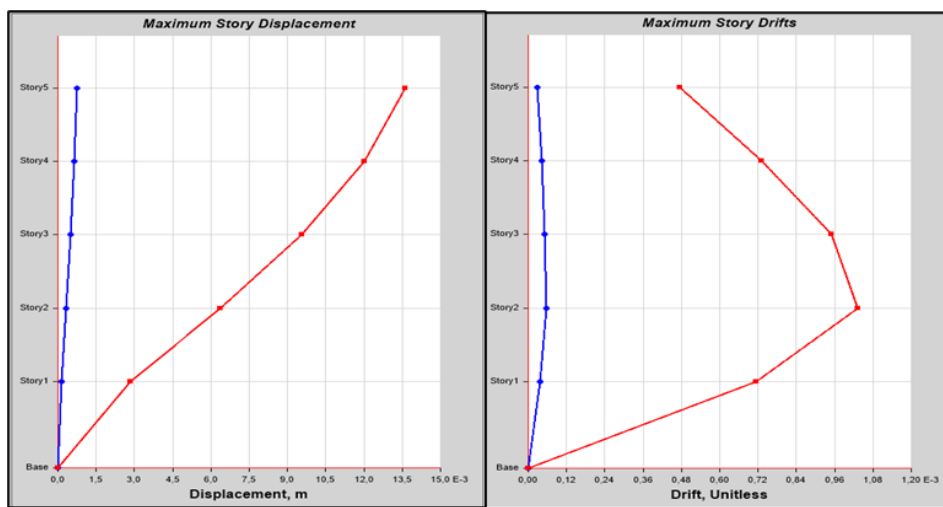


Figura XI.- Desplazamientos y distorsiones de entrepiso en Y.

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: XX						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX m	h m	D m	DR m	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
Piso 5	XX Max	0,022200	3,40	0,117	0,019	0,0055	0,0070
Piso 4	XX Max	0,018651	3,40	0,098	0,022	0,0065	0,0070
Piso 3	XX Max	0,014413	3,40	0,076	0,025	0,0074	0,0070
Piso 2	XX Max	0,009603	3,40	0,050	0,026	0,0076	0,0070
Piso 1	XX Max	0,004709	4,00	0,025	0,025	0,0062	0,0070

Tabla X. Distorsión de entrepiso en la dirección X.

Máxima distorsión = 0,0076

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión > Máxima distorsión permisible: incorrecto

DIRECCIÓN DE ANÁLISIS: XX						Factor R =	7,00
Piso	Load Case	UX	h	D	DR	DISTORSIÓN	DISTORSIÓN LIMITE
		m	m	m	m		
Piso 5	YY Max	0,019043	3,40	0,100	0,014	0,0042	0,0070
Piso 4	YY Max	0,016318	3,40	0,086	0,018	0,0053	0,0070
Piso 3	YY Max	0,012882	3,40	0,068	0,021	0,0063	0,0070
Piso 2	YY Max	0,008820	3,40	0,046	0,023	0,0067	0,0070
Piso 1	YY Max	0,004496	4,00	0,024	0,024	0,0059	0,0070

Tabla XI. Distorsión de entrepiso en la dirección Y.

Máxima distorsión = 0,0067

Máxima distorsión permisible = 0,0070

Máxima distorsión < Máxima distorsión permisible: correcto

4. Análisis comparativo del modelo base fija y el modelo con interacción suelo-estructura. -

4.1. Periodos de vibración. - Se realiza el comparativo de los periodos de vibración en los modos del edificio con modelo base fija.

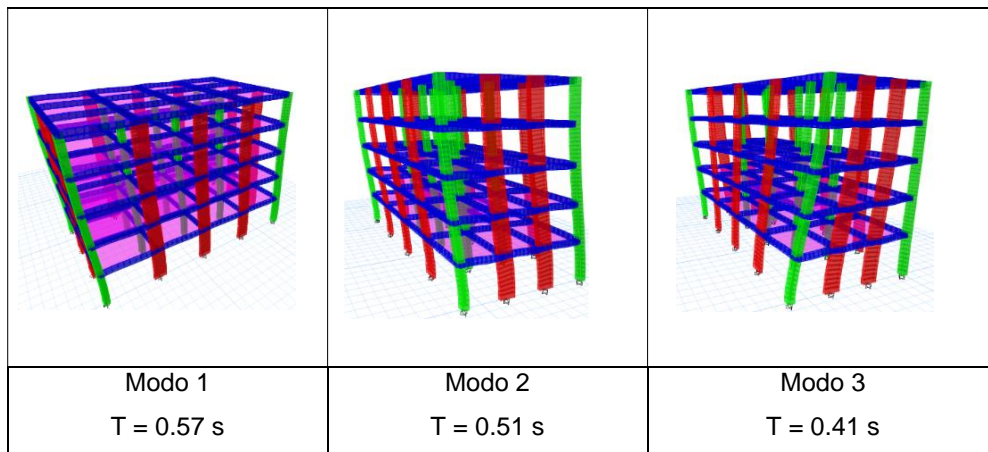


Figura XII.- Modos de vibración del edificio con base fija.

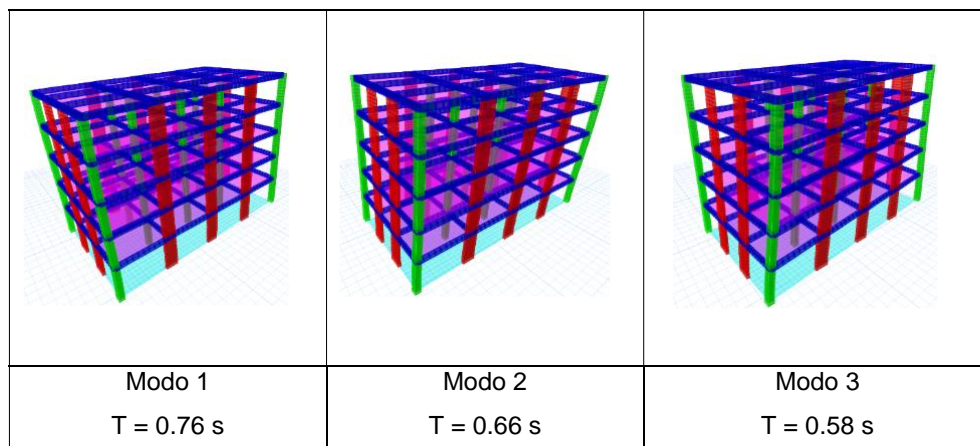


Figura XIII.- Modos de vibración del edificio con interacción suelo-estructura.

Observamos que en los modos 1, 2 y 3 se registró un aumento del 33,33%, 29,41% y 41,46%, respectivamente, en el modelo con ISE. También se observa que se presenta traslación en las dos primeras formas modales, sin embargo, se tiene una forma rotacional en el tercer modal.

4.2. Desplazamientos laterales. - Los desplazamientos en las direcciones "X" y "Y" en los modelos de base fija e ISE presentan una variación importante, siendo muy necesario para identificar posibles daños y anticipar la necesidad de juntas de separación sísmica. En el modelo ISE se obtienen mayores desplazamientos.

- Desplazamientos con base fija e ISE en X.

Variación en el desplazamiento total del piso 5: + 44,44%
Variación en el desplazamiento total del piso 4: + 40,00%
Variación en el desplazamiento total del piso 3: + 40,74%
Variación en el desplazamiento total del piso 2: + 47,06%
Variación en el desplazamiento total del piso 1: + 78,57%

- Desplazamientos con base fija e ISE en Y.

Variación en el desplazamiento total del piso 5: + 56,25%
Variación en el desplazamiento total del piso 4: + 53,57%
Variación en el desplazamiento total del piso 3: + 51,11%
Variación en el desplazamiento total del piso 2: + 53,33%
Variación en el desplazamiento total del piso 1: + 84,62%

4.3. Distorsión de entrepisos. - Se analizan las distorsiones de entrepiso para los modelos de base fija e ISE, siendo el valor máximo para la norma E030 de 0.007 y obteniéndose mayores distorsiones para el modelo ISE en las direcciones X e Y.

- Desplazamientos con base fija e ISE en X.

Variación en el desplazamiento relativo del piso 5: + 72,73%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 4: + 37,50%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 3: + 25,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 2: + 30,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 1: + 78,57%

- Desplazamientos con base fija e ISE en Y.

Variación en el desplazamiento relativo del piso 5: + 50,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 4: + 63,64%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 3: + 40,00%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 2: + 43,75%
Variación en el desplazamiento relativo del piso 1: + 84,62%

4.3. Fuerza internas. -

Dirección X: Pórtico 1

Placa

Modelo con base fija:

Axial $P = 5,19$ tonf

Corte $V = 17,96$ tonf

Momento flector $M = 72,93$ tonf-m

Modelo con base flexible:

Axial $P = 5,10$ tonf Reducción en 1,73%

Corte $V = 14,05$ tonf Reducción en 21,77%

Momento flector $M = 56,83$ tonf-m Reducción en 22,08%

Viga

Modelo con base fija:

Corte $V = 4,71$ tonf

Momento flector $M = 10,85$ tonf-m

Modelo con base flexible:

Corte $V = 4,01$ tonf Reducción en 11,86%

Momento flector $M = 9,22$ tonf-m Reducción en 15,02%

Dirección Y: Pórtico A

Placa

Modelo con base fija:

Axial $P = 17,05$ tonf

Corte $V = 25,08$ tonf

Momento flector $M = 81,23$ tonf-m

Modelo con base flexible:

Axial $P = 14,10$ tonf Reducción en 17,30%

Corte $V = 21,73$ tonf Reducción en 13,36%

Momento flector $M = 70,17$ tonf-m Reducción en 13,62%

Viga

Del modelamiento con base fija:

Corte $V = 14,09$ tonf

Momento flector $M = 18,32$ tonf-m

Del modelamiento con base flexible:

Corte $V = 12,44$ tonf Reducción en 11,71%

Momento flector $M = 16,17$ tonf-m Reducción en 11,74%

5. Conclusiones. -

- a) En el modelo ISE se tiene un aumento del 33,33%, 29,41% y 41,46% en los modos 1, 2 y 3. También observamos que para ambos modelos del edificio los primeros dos modos son presentados en traslación, sin embargo, para el tercer modo es rotacional.
- b) En la dirección X hay un incremento promedio en los desplazamientos absolutos del orden de 50,16% y en la dirección Y un incremento promedio en los desplazamientos absolutos del orden de 59,78% del modelo ISE referente al de base fija.
- c) En la dirección X hay un incremento promedio en las distorsiones de entrepiso del orden de 48,76% y en la dirección Y un incremento promedio en las distorsiones de entrepiso del orden de 56,40% del modelo ISE referente al de base fija.
- d) Se observa que existe en la dirección X una reducción del cortante basal del orden de 17,97% y en la dirección Y una reducción del orden de 6,36% del modelo ISE referente al de base fija.
- e) Se observa que para el modelo ISE las placas en la dirección X experimentan una disminución de la fuerza axial, fuerza cortante y momento flector, del orden del 1,73%; 21,77% y 22,08%, respectivamente.
- f) Se observa, las placas que van en dirección Y sufren una reducción de la fuerza axial, fuerza cortante y momento flector del orden del 17,30%; 13,36% y 13,62% en el modelo ISE referente al de base fija.
- g) Se observa que las vigas en la dirección X sufren una reducción de la fuerza cortante y momento flector del orden del 11,86% y 15,02% en el modelo ISE referente al de base fija.
- h) Se observa que las vigas en la dirección Y sufren una reducción de la fuerza cortante y momento flector del orden del 11,71% y 11,74% en el modelo ISE referente al de base fija.
- i) Para el diseño de las vigas en la dirección X, las demandas por flexión y corte se reducen en 38,43% en base fija y 30,63% en base flexible.
- j) Para el diseño de las vigas en la dirección Y, las demandas por flexión y corte se reducen en 8,95% en base fija y 9,64% en base flexible.
- k) Para el diseño de las placas en la dirección X, las demandas por flexión y corte se reducen en 9,80% en base fija y 6% en base flexible.
- l) Para el diseño de las placas en la dirección Y, las demandas por flexión y corte se reducen en 7,84% en base fija y 6,76% en base flexible.

Referencias

- [1] Arancibia, D. (2020). Estudio del efecto de la interacción suelo estructura en edificios bajos de albañilería. [Tesis de titulación, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177340?show=full>.
- [2] Arquíñe, J., & Velázquez, N. (2020). Evaluación de la interacción suelo - estructura en una edificación de 4 pisos, en el distrito de Cercado de Lima. [Trabajo de Investigación para grado de bachiller, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3473>
- [3] Calderín, F., Almenarez, D. & Boada, D. (2020). Consideración del fenómeno interacción suelo-estructura en edificio prefabricado. *Redalyc UAEMEX*, 1(4), 79–94. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181366194007>.
- [4] Castro, C., & Pérez, G. (2020). Análisis de la interacción suelo – estructura estática para una edificación regular de Hormigón Armado y 3 tipos de suelos. [Tesis de titulación, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito]. Repositorio Digital Institucional. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18193>
- [5] Franco, T., & Gálvez, Z. (2021). Análisis de la interacción suelo – estructura para cimentaciones superficiales de vivienda de dos pisos sobre relleno antrópico, Cieneguilla - Lima 2021. [Tesis de titulación, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/66182>
- [6] Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020). Estado de la población peruana. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1743/Libro.pdf
- [7] Miao, Y., Zhong, Y., Ruan, B., Cheng, K. & Wang, G., (2020). Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103629>
- [8] Pinto, F. J., & Ledezma, C. (2019). Interacción suelo-estructura en edificios de gran altura con subterráneos en Santiago, Chile. *Obras y proyectos*, (25), 66-75. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132019000100066>
- [9] Prada, G., & Mateo, I. (2022). Influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un edificio de oficinas de 6 pisos y 2 sótanos considerando diferentes condiciones de suelo. [Tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/189457>
- [10] Reglamento Nacional de Edificaciones E.030. (2019). Disponible en línea: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366641/51%20E.030%20DISE%20C3%91O%20SISMORRESISTENTE%20RM-043-2019-VIVIENDA.pdf>
- [11] Rodríguez, S. (2019). Fundamentos de ingeniería geotécnica suelos y cimentaciones. https://www.academia.edu/38931233/INGENIER%C3%8DA_GEOT%C3%89CNICA_2019_Suelos_y_Cimentaciones_LIBRO
- [12] Tena, A. (2019). Soil-structure interaction. Reflections about its importance in the dynamic response of structures during earthquakes. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(2), 141-165 <https://docplayer.es/189980156-Soil-structure-interaction-reflections-about-its-importance-in-the-dynamic-response-of-structures-during-earthquakes.html>
- [13] Villarreal, G. (2020). Interacción Suelo Estructura en Edificaciones con Zapatas Aisladas. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25 (3), 311-332. <https://drive.google.com/file/d/1EeF12nEpNgS5-ZK158cmuaJB9Owb0Whk/view>
- [14] Villarreal, G., Cerna, M., & Espinoza, C. (2021). Seismic Interaction of Soil-Structure in Buildings with Limited Ductility Walls on Foundation Plates. <https://drive.google.com/file/d/1LQVzhICZ8utu-OqWO519LJTuuDM1HxSo/view>
- [15] Zhang, W., Seylabi, E.E. & Taciroglu, E. (2019). An ABAQUS toolbox for soil structure interaction analysis. *Computers and Geotechnics*, 114, 103143. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103143>

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

RM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

GV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

AF ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

A Review on Quantum Machine Learning and Quantum Cryptography

Una revisión sobre el aprendizaje automático cuántico y la criptografía cuántica

Uma revisão sobre aprendizado de máquina quântica e criptografia quântica

Mauricio Solar^{1,*}, *Felipe Cisternas Alvarez*², *Jean-Pierre Villacura*³, *Liuba Dombrovskaja*⁴

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Summary. - This article corresponds to an extensive review of Quantum Computers. We chose to consider topics relevant to quantum computing, such as machine learning, and the deepening of other issues related to cybersecurity. We introduce the reader to the basic concepts of quantum computing so that they can easily understand the terms mentioned in this review. We analyze different state of the art articles, and we give a summary of the contributions made. Finally, we conclude with the analysis of the bibliography, the research centers, the current state of the art, surprising results and conclusions.

Keywords: Quantum Machine Learning; Quantum Key Distribution (QKD); Quantum Cryptography.

(*) Autor de correspondencia.

¹ Académico, Universidad Técnica Federico Santa María, mauricio.solar@usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4433-4622>

² Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, felipe.cisternasal@sansano.usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-7029-8736>

³ Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, jean-pierre.rojas@sansano.usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-8611-1408>

⁴ Académica, Universidad Técnica Federico Santa María, liuba@inf.utfsm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/00000001-6572-9765>

Resumen. - Este artículo corresponde a una revisión extensa (no exhaustiva) de Computación Cuántica. Se eligió considerar temas relevantes para la computación cuántica, como el aprendizaje automático, y la profundización de otros temas relacionados con la ciberseguridad. Se presenta los conceptos básicos de la computación cuántica para comprender los términos mencionados en esta revisión. Se analiza diferentes artículos sobre el estado del arte y se entrega un resumen de los aportes realizados. Finalmente, se presentan las conclusiones sobre el análisis de la bibliografía, los centros de investigación, el estado actual del arte y resultados.

Keywords: Aprendizaje Automático Cuántico; Distribución de Claves Cuánticas (QKD); Criptografía Cuántica.

Resumo. - Este artigo corresponde a uma revisão extensa (não exhaustiva) da Computação Quântica. Optou-se por considerar temas relevantes para a computação quântica, como aprendizado de máquina, e aprofundar outros temas relacionados à segurança cibernética. Os conceitos básicos da computação quântica são apresentados para compreender os termos mencionados nesta revisão. São analisados diferentes artigos sobre o estado da arte e fornecido um resumo das contribuições realizadas. Por fim, são apresentadas as conclusões sobre a análise da bibliografia, os centros de investigação, o estado atual da arte e os resultados.

Palavras-chave: Aprendizado de Máquina Quântica; Distribuição Quântica de Chaves (QKD); Criptografia Quântica.

1. Introduction. - With certainty it can be stated that today's computers are much faster than the computers of 70 years ago. The computers of that time were large, heavy, with a very limited capacity and processing speed compared to what is the standard now a day. We could consider quantum computers to be in this same state, as an emerging technology that is still expensive, bulky and with a lot of research potential (15).

The theory of quantum computing points out that its processing speed can be much faster than even the fastest supercomputer today. Examples such as Shor's algorithm with its potential ability to factor large prime numbers in a matter of seconds, as opposed to the thousands of years that classical computing could take, are considered signs of the advances and development that is to come with quantum computing (14).

This paper explores a range of subjects concerning quantum computing, including quantum computers and technologies. It is structured to provide readers with a comprehensive understanding, starting from the basics of quantum computing and progressing to cover a wide range of proposed models for quantum computers. Additionally, the paper delves into the future prospects and developments of the fields Quantum Machine Learning (QML) and Quantum Cryptography, highlighting the immense potential of quantum computing and discussing current advancements.

The structure of this paper after this introduction includes a brief overview of Quantum Computing (Quantum Computers and Technologies, Quantum Data, Quantum Gates, Noise, Quantum Error Correction Quantum Cybersecurity, and Quantum Machine Learning). In the section State of the Art we show the methodology, we describe the new works and research, we show a comparative analysis of the latest advances, a bibliographic discussion and we show a state of the art timeline jointly with expected or surprising results. The final section summarizes the conclusions of this work.

2. Brief overview of Quantum Computing. –

2.1. Quantum Computing. - Quantum computing relies on properties of quantum mechanics to compute problems that would be out of reach for classical computers. A Quantum Computer (QC) uses qubits. Qubits are like regular bits in a classical computer, but with the added ability to be put into a superposition state and share entanglement with one other (26).

A QC works using quantum principles. Quantum principles require a new dictionary of terms to be fully understood, terms that include superposition, entanglement, and decoherence. Let's explain these principles below.

- **Superposition:** Superposition states that, much like waves in classical physics, you can add two or more quantum states and the result will be another valid quantum state. Conversely, you can also represent every quantum state as a sum of two or more other distinct states. This superposition of qubits gives QCs their inherent parallelism, allowing them to process millions of operations simultaneously.
- **Entanglement:** Quantum entanglement occurs when two systems link so closely that knowledge about one gives you immediate knowledge about the other, no matter how far away they are. Quantum processors can draw conclusions about one particle by measuring another one, Quantum entanglement allows QCs to solve complex problems faster. When a quantum state is measured, the wavefunction collapses and you measure the state as either a zero or a one. In this known or deterministic state, the qubit acts as a classical bit. Entanglement is the ability of qubits to correlate their state with other qubits.
- **Decoherence:** Decoherence is the loss of the quantum state in a qubit. Environmental factors, like radiation, can cause the quantum state of the qubits to collapse. A large engineering challenge in constructing a QC is designing the various features that attempt to delay decoherence of the state, such as building specialty structures that shield the qubits from external fields.

The current state of quantum computing is referred to as the Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) era (8), characterized by quantum processors containing 50–100 qubits which are not yet advanced enough for fault-tolerance or large enough to achieve quantum supremacy, the term NISQ was coined by (32). These processors, which are

sensitive to their environment (noisy) and prone to quantum decoherence, are not yet capable of continuous quantum error correction. This intermediate scale is defined by the quantum volume, which is based on the moderate number of qubits and gate fidelity.

Classical computers perform deterministic classical operations or can emulate probabilistic processes using sampling methods. By harnessing superposition and entanglement, QCs can perform quantum operations that are difficult to emulate at scale with classical computers. Ideas for leveraging NISQ quantum computing include optimization, quantum simulation, cryptography, and Machine Learning (ML).

Notably, QCs are believed to be able to solve many problems quickly that no classical computer could solve in any feasible amount of time—a feat known as *quantum supremacy*.

2.2. QCs and technologies. - A QC is a computer that exploits quantum mechanical phenomena. At small scales, physical matter exhibits properties of both particles and waves, and quantum computing leverages this behavior using specialized hardware. Classical physics cannot explain the operation of these quantum devices, and a scalable QC could perform some calculations exponentially faster than any modern classical.

No one has shown the best way to build a fault-tolerant QC, and multiple companies and research groups are investigating different types of qubits. We give a brief example of some of these qubit technologies below.

- **Gate-based ion trap processors:** Trapped ion QCs implement qubits using electronic states of charged atoms called ions. The ions are confined and suspended above the microfabricated trap using electromagnetic fields. Trapped ion-based systems apply quantum gates using lasers to manipulate the electronic state of the ion (41). Trapped ion qubits use atoms that come from nature, rather than manufacturing the qubits synthetically (31).
- **Gate-based superconducting processors:** Superconducting quantum computing is an implementation of a QC in superconducting electronic circuits. Superconducting qubits are built with superconducting electric circuits that operate at cryogenic temperatures (22).
- **Photonic processors:** A quantum photonic processor is a device that manipulates light for computations. Photonic QCs use quantum light sources that emit squeezed-light pulses, with qubit equivalents that correspond to modes of a continuous operator, such as position or momentum (23).
- **Neutral atom processors:** Neutral atom qubit technology is similar to trapped ion technology. However, it uses light instead of electromagnetic forces to trap the qubit and hold it in position. The atoms are not charged, and the circuits can operate at room temperatures (42). QuEra has a publicly accessible neutral-atom computer⁵. It is a 256-qubit QC based on programmable arrays of neutral Rubidium atoms, trapped in vacuum by tightly focused laser beams.
- **Rydberg atom processors:** A Rydberg atom is an excited atom with one or more electrons that are further away from the nucleus, on average. Rydberg atoms have a number of peculiar properties including an exaggerated response to electric and magnetic fields, and long life. When used as qubits, they offer strong and controllable atomic interactions that you can tune by selecting different states (21).
- **Quantum annealers:** Quantum annealing uses a physical process to place a quantum system's qubits in an absolute energy minimum. From there, the hardware gently alters the system's configuration so that its energy landscape reflects the problem that needs to be solved. The advantage of quantum annealers is that the number of qubits can be much larger than those available in a gate-based system. In fact, Quantum annealing is implemented in D-Wave's generally available QCs, such as the Advantage™⁶, enabling the creation of Quantum Processing Units (QPUs) with more than 1200 qubits, far beyond the state of the art for gate-model quantum computing. However, their use is limited to specific cases only (1).

⁵ <https://www.quera.com>

⁶ <https://www.dwavesys.com>

2.3. Quantum Data. - Quantum data is any data source that occurs in a natural or artificial quantum system. Quantum data exhibits superposition and entanglement, leading to joint probability distributions that could require an exponential amount of classical computational resources to represent or store. The quantum supremacy experiment showed it is possible to sample from an extremely complex joint probability distribution of 2^{53} Hilbert space.

The qubit serves as the basic unit of quantum information. It represents a two-state system, just like a classical bit, except that it can exist in a superposition of its two states. In one sense, a superposition is like a probability distribution over the two values. However, a quantum computation can be influenced by both values at once, inexplicable by either state individually. In this sense, a superposed qubit stores both values simultaneously. When measuring a qubit, the result is a probabilistic output of a classical bit. If a QC manipulates the qubit in a particular way, wave interference effects can amplify the desired measurement results.

The quantum data generated by NISQ processors are noisy and typically entangled just before the measurement occurs. Heuristic ML techniques can create models that maximize extraction of useful classical information from noisy entangled data.

The following are examples of quantum data that can be generated or simulated on a quantum device:

- **Chemical simulation:** Extract information about chemical structures and dynamics with potential applications to material science, computational chemistry, computational biology, and drug discovery (10).
- **Quantum matter simulation:** Model and design high temperature superconductivity or other exotic states of matter which exhibits many-body quantum effects (25).
- **Quantum control:** Hybrid quantum-classical models can be variationally trained to perform optimal open or closed-loop control, calibration, and error mitigation. This includes error detection and correction strategies for quantum devices and quantum processors (17).
- **Quantum communication networks:** Use ML to discriminate among non-orthogonal quantum states, with application to design and construction of structured quantum repeaters, quantum receivers, and purification units (3).
- **Quantum metrology:** Quantum-enhanced high precision measurements such as quantum sensing and quantum imaging are inherently done on probes that are small-scale quantum devices and could be designed or improved by variational quantum models (24).

2.4. Quantum Gates. - The state of qubits can be manipulated by applying quantum logic gates, analogous to how classical bits can be manipulated with classical logic gates. Unlike many classical logic gates, quantum logic gates are reversible (6). Quantum logic gates are represented by unitary matrices, a gate which acts on n qubits is represented by $2^n \times 2^n$ unitary matrix.

Quantum states are typically represented by kets, from a notation know as *bra-ket*, the vector representation of a single qubit is shown in equation 1.

$$|a\rangle = v_0|0\rangle + v_1|1\rangle \rightarrow \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Here v_0 and v_1 are the complex probability amplitudes of the qubit, these values determine the probability of measuring a 0 or a 1, when measuring the state of the qubit. The value zero is represented by the ket in equation 2, and the value one is represented by the ket in equation 3.

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

The tensor product denoted by the symbol \otimes , is used to combine quantum states. The action of the gate on a specific

quantum state is found by multiplying the vector $|\phi_1\rangle$ which represents the state by the matrix U representing the gate, thus the result is a new quantum state $|\phi_2\rangle$ shown in equation 4.

$$U|\phi_1\rangle = |\phi_2\rangle \tag{4}$$

There exist many numbers of quantum gates, below we review some of the most often used in the literature:

- **NOT Gate:** This gate is widely known as X-Pauli gate, as this particular quantum gate transforms the existing state of the qubit to be rotated around the X-axis. As the name suggests, the NOT gate would convert a qubit from its initial state to its complement state. This quantum gate is represented by the matrix in equation 5 and operates as shown in equation 6.

$$X := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$X|0\rangle = |1\rangle \quad , \quad X|1\rangle = |0\rangle \tag{6}$$

- **Y-Pauli Gate:** The Y-Pauli gates are capable of rotating the input qubit around the Y-axis. This quantum gate is represented by the matrix in equation 7 and operates as shown in equation 8.

$$Y := \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \tag{7}$$

$$Y|0\rangle = i|1\rangle, \quad Y|1\rangle = -i|0\rangle \tag{8}$$

- **Z-Pauli Gate:** The Z-Pauli or phase flip gate are capable of rotating the input qubit around the Z-axis. This quantum gate is represented by the matrix in equation 9.

$$Z := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{9}$$

Pauli Z leaves the basis state $|0\rangle$ unchanged and maps $|1\rangle$ to $-|1\rangle$ as shown in equation 10.

$$Z|0\rangle = |0\rangle, \quad Z|1\rangle = -|1\rangle \tag{10}$$

- **Controlled NOT Gate:** The Controlled NOT (CNOT) gate acts on 2 (or more) qubits and performs the NOT operation on the second (or more) qubit only when the first qubit is $|1\rangle$, this gate is represented by the Hermitian unitary matrix (equation 11), and operates as in equation 12.

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} CNOT|00\rangle &= |00\rangle \\ CNOT|01\rangle &= |01\rangle \\ CNOT|10\rangle &= |11\rangle \\ CNOT|11\rangle &= |10\rangle \end{aligned} \tag{12}$$

- **Hadamard gate:** The Hadamard gate, acts on a single qubit and creates an equal superposition state given a basis state. The Hadamard gate performs a rotation of $\sqrt{\pi}$ around the axis $(x^{\wedge} + z^{\wedge})/\sqrt{2}$ at the Bloch Sphere (Figure I). This gate is represented by the Hadamard matrix (equation 13) and operates as in equation 14.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \tag{13}$$

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}, \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \tag{14}$$

2.5. Noise. - Noise is present in modern day QCs. Qubits are susceptible to interference from the surrounding environment, imperfect fabrication, TLS and sometimes even gamma rays. Until large scale error correction is reached, the algorithms of today must be able to remain functional in the presence of noise. This makes testing algorithms under noise an important step for validating quantum algorithms and quantum models.

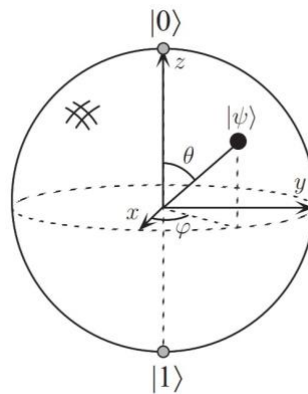


Figure I. Bloch sphere to represent a qubit.

2.6. Quantum Error Correction (QEC). - QEC is used in quantum computing to protect quantum information from errors due to decoherence and other quantum noise. Traditional error correction employs over repetition. The repetition code is the simplest but most inefficient way. The idea is to store the information multiple times and take a larger vote in the event that these copies are later found to differ. Copying quantum information is not possible due to the no-cloning theorem. This theorem seems to present an obstacle to formulating a theory of QEC, nevertheless, it is conceivable to transfer the logical information of a single qubit to a highly entangled state of several physical qubits (33).

2.7. Quantum Cybersecurity. –

2.7.1. Quantum Cryptography. - Cryptography has had an important development since 1975 with the establishment of the Data Encryption Standard (DES) algorithm for file encryption while computing was emerging. Since then, several algorithms have been developed to fulfill this cryptographic function, the best-known being RSA (Rivest-Shamir-Adleman) and Advanced Encryption Standard (AES).

With the emergence of quantum computing, several researchers comment on the risk that the rise of this paradigm may threaten encryption algorithms based on classical computing, which are considered secure due to the amount of time it takes to test all combinations, easily 50 years using supercomputers. Quantum computing threatens the security of these algorithms by being able to perform calculations much faster. Being able to solve operations that in the classical paradigm would take about 50 years using supercomputers in a matter of seconds.

The state of the art of quantum computing proposes modifications to algorithms RSA (7) and AES (19):

- (19) proposes a modified AES algorithm comparing different methods of random number generation, resulting in the use of Quantum Random Walk (QRW) the best encryption performance. It is proposed the modifying the Shift row operation introducing random movements using QRW, making it difficult to predict the correct order during the decryption process. This adds an additional layer of complexity and makes attempts to decrypt encrypted information difficult without proper knowledge of the correct sequence.
- (7) proposes that the little investigation about RSA algorithm in Quantum computing is due to actual limits of Shor's algorithm. They propose a Quantum ring algorithm: GEECM (Grover plus Elliptic-Curve factorization Method using Edwards curves), using pre-quantum algorithm to find small primers and accelerate it with quantum techniques (7).

2.7.2. Quantum Key Distribution (QKD). - This topic is closely related to cryptography, since the security of the data depends on the transmission of the key previously generated by a cryptographic algorithm.

There are dangers associated with the transmission of the key that were partly solved with the introduction of the asymmetric key (whose most famous algorithm is RSA).

Quantum computing proposes new solutions in this aspect by being able to transmit the same key to two recipients (Alice and Bob), with a very high certainty of corroborating that there is no third person obtaining this key. This is possible due to quantum properties such as entanglement and non-cloning. With entanglement it is possible to know the state of both photons (i.e. direction of spin) and non-cloning allows to detect if there is any intruder in the system, since it would yield a common key different from Alice and Bob (Figure II).

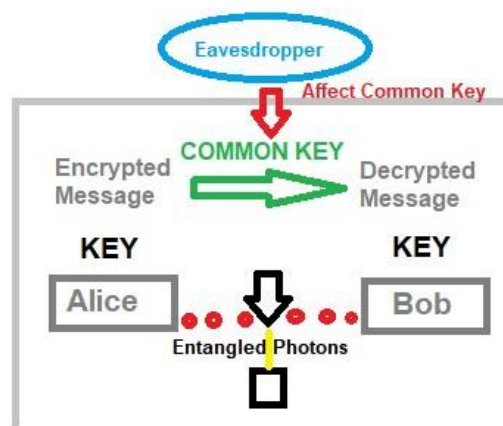


Figure II: Quantum Key Distribution (QKD)

Since Alice and Bob have the same common key, Alice can encrypt her message and send it to Bob, who has the key to decrypt and therefore read the message. We assume noise-free channel for this situation.

Quantum computing can also contribute to the 'one-time-pad' problem of classical computing by providing random keys due to the Heisenberg uncertainty principle. Note that in this type of problem security depends to some degree on the randomness of the key.

2.8. Quantum Machine Learning (QML). - One of the most successful technologies of this century is ML, a subset of Artificial Intelligence (AI) that focuses on developing algorithms and models that enable computers to learn from data and make predictions or decisions without being explicitly programmed.

Like other classical theories, ML and learning theory can in fact be embedded into the quantum mechanical formalism. Formally speaking, this embedding leads to the field known as QML which aims to understand the ultimate limits of

data analysis allowed by the laws of physics. While there are similarities between classical and QML, there are also some differences. Because QML employs QCs, noise from these computers can be a major issue.

In ML we have different paradigms that also applies to QML:

- Supervised Learning (Task-based)
- Unsupervised Learning (Data-based)
- Reinforcement Learning (Reward-based) and there is a bunch of algorithms of QML being researched:
- Quantum Neural Networks (QNNs)
- Quantum Kernels (QKs)
- Variational Quantum Algorithms (VQAs)

2.8.1. Quantum Neural Networks (QNNs). - A QNN is used to describe a parameterized quantum computational model that is best executed on a QC. This term is often interchangeable with Parameterized Quantum Circuit (PQC). These involve a sequence of unitary gates acting on the quantum data states $|\psi_j\rangle$, some of which have free parameters θ that will be trained to solve the problem.

QNNs are employed in all three QML paradigms mentioned above. For instance, in a supervised classification task, the goal of the QNN is to map the states in different classes to distinguishable regions of the Hilbert space, in the unsupervised learning scenario of a clustering task is mapped onto a MAXCUT problem (27) and solved by training a QNN to maximize distance between classes. Finally, in the reinforced learning task of a QNN can be used as the Q-function approximator (36), which can be used to determine the best action for a learning agent given its current state. As in classical neural networks, there are different types of networks such as convolutional networks, recurrent networks, etc. their quantum variants have been researched, such as quantum convolutional neural networks (13) and quantum recurrent neural networks (4).

2.8.2. Quantum Kernels (QKs). In ML, a kernel is a function that defines the similarity or distance between pairs of data points in a high-dimensional feature space. QK methods consider the computation of kernel functions using QCs. There are many possible implementations. For example, consider a reproducing kernel Hilbert space equal to the quantum state space, which is finite dimensional. In simpler terms, we can think of the quantum state space as a finite-dimensional space (34). By using this approach, we can calculate kernel functions within this finite-dimensional space. Another approach involves studying a reproducing kernel Hilbert space that is infinite-dimensional. In this case, we are transforming classical vectors (which represent data points) using a QC. The QC helps us map these classical vectors into infinite-dimensional vectors, an infinite-dimensional space allows for more complex representations and calculations.

2.8.3. Variational Quantum Algorithms (VQAs). - VQAs are a hybrid quantum-classical optimization algorithm in which an objective function is evaluated by quantum computation, and the parameters of this function are updated using classical optimization methods (12).

The variational method in quantum theory is a classical method for finding low energy states of a quantum system. The idea of this method is that one defines a wave function (called an ansatz) as a function of some parameters, and then one finds the values of these parameters that minimize the expectation value of the energy.

It has been realized that QCs can mimic the classical technique and that a QC does so with certain advantages (29), (40), when one applies the classical variational method to a system of n qubits, an exponential number of complex numbers is necessary to generically represent the wave function of the system. However, with a QC, one can directly produce this state using a PQC with less than exponential parameters.

2.8.4. Inductive Bias. - Inductive bias means that any model, can only represent a subset of all possible functions and is naturally inclined towards certain types of functions. These functions relate the input features to the output predictions.

Inductive bias encompasses the assumptions and restrictions made in the model design and optimization process, shaping the search space for potential models. The choice of model parameterization or embedding, as well as techniques like regularization and learning rate modulation, contribute to the inductive bias.

To achieve quantum advantage with QML, we aim for QML models that have an inductive bias that is difficult to simulate efficiently using classical models. Recent research has shown that it is possible to construct QKs with this property, although there are some complexities regarding their trainability.

3. State of the Art. –

3.1. Methodology. - To gather new information on Quantum Cybersecurity it was used the classical search method with the following set:

- Relevant Topic: Quantum Cybersecurity. Format: Investigation and State of art. Specialized Authors: Abd El-Latif, Ahmed. Time Frame: 2021-2023.
- Keywords: Quantum, post-quantum, Cybersecurity, encryption, Key-Distribution, Authentication, Digital signature, IoT. BDB: Web of Science, Springerlink.

Meanwhile, to gather more information on QML, it was used the Snowball methodology, reading the citations of the most recent papers on QML.

3.2. Related works and Research to QML and Cybersecurity. - The related works on cybersecurity reported in the literature is summarized below.

In (19), the authors propose a modified AES algorithm and use quantum computing to encrypt/decrypt AES image files using IBM Qiskit for performance evaluation. They show that AES algorithm can be implemented using quantum gates and suggest that AES be implemented with random number generation.

AES is combined with the use of random number generation in the process. In the traditional implementation of the AES algorithm, the Shift Row operation moves the data to align them at certain encryption steps. Since the decryption process can reverse the order of these steps, it becomes predictable. To address this vulnerability, the author suggests modifying the performance of the Shift Row operation to introduce random movements using Quantum Random Walk (QRW), making it difficult to predict the correct order during the decryption process, achieving greater security than classical approach.

In (37), the authors focus on analyzing characteristics of the quantum cryptography and exploring of the advantages of it in the future internet. They analyze the QKD protocol in the noise-free channel by making measurements of different variables. Probability of the eavesdropper being detected v/s number of photons measured in a noise-free channel and 30% noise. Also analyzes the probabilities of errors in the receiver v/s probability of eavesdropper to eavesdrop on the channel.

In (39), the authors make a contribution in the state of the art of cybersecurity from wide perspectives. They give an overview of quantum computing and how it can affect cybersecurity issues. Also demonstrate solutions in quantum computing to problems in classical computing paradigm related to cybersecurity and relates how quantum computing could be used in the future to make cybersecurity solutions better.

In (7), the authors make a contribution proposing parameters and changes to RSA to make Key-Generation, encrypt and decryption, signatures and verification feasible in actual computing and, at the same time, protected against

quantum computing attacks. They propose a new quantum algorithm to generate factor numbers, GEECM faster than Shor and algorithms of classic paradigm.

In (36), the authors introduce a new training method for PQCs that can be used to solve Reinforcement Learning (RL) tasks for discrete and continuous state spaces based on the deep Q-learning algorithm. They adapt the Deep Q-Network (DQN) algorithm to use a PQC as its Q-function approximator instead of a Neural Network (NN). For this, they use a hardware-efficient ansatz, a target network, an ϵ -greedy policy to determine the agent's next action and experience replay to draw samples for training the Q-network PQC. The Q-network then is $U_\theta(s)$ parametrized by θ and the target network PQC is $U_{\theta_\delta}(s)$, where θ_δ is a snapshot of the parameters θ which is taken after fixed intervals of episodes δ and the circuit is otherwise identical to that $U_\theta(s)$.

Depending on the state the authors distinguish between two different types of space states: *Discrete* and *Continuous*.

The Q-values of the quantum agent are computed as the expectation values of a PQC that is fed a state s according to equation 15.

$$Q(s, a) = \langle 0^{\otimes n} | U_\theta^\dagger(s) O_a U_\theta(s) | 0^{\otimes n} \rangle \quad (15)$$

where O_a is an observable and n the number of qubits, and the model outputs a vector including Q-values for each possible O_a .

In (11), the authors demonstrate the out-of-distribution generalization for the task of learning in QML, where the training and testing data are drawn from a different distribution. The authors consider the QML task of learning an unknown n -qubit unitary $U \in U(C^{2^n})$. The goal is to use training states to optimize the classical parameters α of $V(\alpha)$, an n -qubit unitary QNN, such that for the optimized parameters α_{opt} , $V(\alpha_{opt})$ well predicts the action of U on previously unseen test states. The prediction performance of the trained QNN $V(\alpha_{opt})$ can be quantified in terms of the average distance between the output state predicted by $V(\alpha_{opt})$ and the true output state determined by U .

They provide numerical evidence to support analytical results showing that out-of-distribution generalization is possible for the learning of quantum dynamics. They focused on the task of learning the parameters of an unknown target Hamiltonian by studying the evolution of product states under it. The authors work establishes that for learning unitaries, QNNs trained on quantum data enjoy out-of-distribution generalization between some physically relevant distributions if the training data size is roughly the number of trainable gates.

In (2), the authors propose a new strategy for reducing the number of measurements in variational quantum-classical algorithms (VQCs) needed for convergence. VQCs efficiently evaluate a cost function on a QC while optimizing the cost value using a classical computer. Certain issues arise in VQCs that are not common in classical algorithms, implying that standard off-the-shelf classical optimizers may not be best suited to VQCs. For example, multiple runs of quantum circuits are required to reduce the effects of shot noise on cost evaluation. An additional complication is that quantum hardware noise flattens the training landscape.

The authors have recently investigated shot-frugal gradient descent for VQCs, introduced an optimizer, called iCANS (individual Coupled Adaptive Number of Shots), which outperformed off-the-shelf classical optimizers such as Adam for variational quantum compiling and Variational Quantum Eigensolver (VQE) tasks. The key feature of iCANS is that it maximizes the expected gain per shot by frugally adapting the shot noise for each individual partial derivative. In VQE and other VQCs, it is common to express the cost function $C = \langle H \rangle$ as the expectation value of a Hamiltonian H that is expanded as a weighted sum of directly measurable operators $\{h_i\}_i$ according to equation 16.

$$H = \sum_{i=1}^N c_i h_i \quad (16)$$

then C is computed from estimations of each expectation $\langle h_i \rangle$, which is obtained from many shots. The author's proposal is to randomly assign shots to the h_i operators according to a weighted probability distribution proportional

to $|c_i|$, they prove that this leads to an unbiased estimator of the cost C , even when the number of shots is extremely small like a single shot. This allows one to unlock a level of shot-frugality for unbiased estimation that simply cannot be accessed without operator sampling. In addition, the randomness associated with operator sampling can provide a means to escape from local minima of C .

A combination of the new sampling strategy with iCANS leads to the main result, which is an improved optimizer for VQCs that they call Rosalin (Random Operator Sampling for Adaptive Learning with Individual Number of shots). Rosalin retains the crucial feature of maximizing the expected gain per shot. The authors analyze the potential of Rosalin by applying it to VQE for three molecules, namely H_2 , LiH , and BeH_2 , and compare its performance with that of other optimizers. In cases with more than a few terms in the Hamiltonian, Rosalin outperforms all other optimizer and sampling strategy combinations considered.

In (20), the authors generalize a quantum natural gradient to consider arbitrary quantum states to significantly outperform other VQAs. Quantum Fisher information in the context of general VQCs is a measure that quantifies how much and in what way changing parameters in a quantum circuit affects the underlying quantum state.

The aim of the authors is to minimize the expectation value $E(\underline{\theta}) = Tr[\rho(\underline{\theta})H]$ of a Hermitian observable H over the parameters $\underline{\theta}$ using a VQC that depends on these parameters, this circuit produces the quantum states $\rho(\underline{\theta}) = \Phi(\underline{\theta})\rho_0$ via mapping and might involve non-unitary transformations due to experimental imperfections or indeed intentional non-unitary elements, such as measurements.

The authors propose a natural gradient update rule, where the quantum Fisher information matrix F_q corrects the gradient vector g_k to account for the dependent and non-uniform effect of the parameters on an arbitrary quantum state $\rho(\underline{\theta})$ mixed or pure. Their method also applies to infinite-dimensional quantum states as continuous-variable systems.

The natural gradient descent proposed by the authors in principle allows for improvements relative to imaginary time evolution and the pure-state variant of natural gradient. First even when the objective function is generated by an observable as $E(\underline{\theta}) = Tr[\rho(\underline{\theta})H]$, their approach allows for general non-unitary elements as Completely Positive Trace-Preserving (CPTP) maps which in principle enable the manipulation of exponentially more degrees of freedom. Second the expected value $E(\underline{\theta}) := Tr[\rho(\underline{\theta})H]$ is a mapping that is linear in quantum state, their results shown that are well-defined for more general objective functions and its convergence is guaranteed even in the presence of shot noise. When compared to previous studies, the new approach has the advantage that it explicitly takes into account imperfections of the VQC.

In (16), the authors provide an accessible introduction to Quantum Embedding Kernels (QEKs) and then analyze the practical issues arising when realizing them on a noisy near-term QC. QEKs are a subclass of quantum kernel methods where a PQC is used to embed datapoints into the Hilbert space of quantum states. QEKs have certain appealing properties that make them attractive for use, like their limited depth does not require long coherence times, another strong point is that noisy PQCs still lead to well-defined QEKs. The authors propose a series of improvements. First, to use the kernel-target alignment as a cost function to train parameters of the QEK to increase its performance on particular datasets. Second, they propose a mitigation strategy tailored for the QEKs that exploits the kernel's definition to infer the underlying noise levels. Lastly, they propose a strategy to alleviate the influence of noise on the kernel matrix based on a semi-definite program.

The QEK is defined as the inner product between quantum states, which is given by the overlap shown in equation 17.

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = |\langle \phi(\mathbf{x}') | \phi(\mathbf{x}) \rangle|^2 \quad (17)$$

Associated to the quantum feature map $|\phi(x)\rangle$, but we are not able to avoid noise, which means that we cannot assume that the embedded quantum state is pure, then the quantum embedding is realized by a data-dependent density matrix $\rho(x)$ which for pure states reduces to $\rho(x) = |\phi(x)\rangle\langle\phi(x)|$, with this modification the inner product is given by equation 18.

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \text{Tr}\{\rho(\mathbf{x})\rho(\mathbf{x}')\} \quad (18)$$

This inner product is also known as the Hilbert-Schmidt inner product for matrices. In summary, any quantum feature map induces a QEK. We can use this kernel as a subroutine in a classical kernel method, for example the Support Vector Machine (SVM), which yields a hybrid quantum-classical approach.

To be able to use QEKs in this way, is needed to evaluate the overlap of two quantum states on near-term hardware. There are a number of advanced algorithms to estimate the overlap of two quantum states. All these algorithms work for arbitrary states, and so they are agnostic to how the states were obtained by necessity. By exploiting the structure and specifics of QEKs, though. The authors propose a better way to do this overlap, for unitary quantum embeddings they construct the adjoint of the data-encoding circuit $U^\dagger(\mathbf{x})$. Another approach proposed is the SWAP test, based on the SWAP trick, a mathematical gimmick that allow to transform the product of the density matrices into a tensor product (9).

Finally, the authors have performed various numerical experiments that showed improvement in classification accuracy after training. They have also investigated noise mitigation techniques and proposed device noise mitigation techniques specific for kernel matrices and combined them with regularization methods. Lastly, they tested a large set of combinations, both on simulated depolarizing noise as well as on data from a real quantum processing unit.

3.3. Comparative analysis of the latest advances. - Table I shows the advantage (column “Comparative advantage”) of the contribution made (2nd column) by the reference in column “Ref”.

3.4. Bibliographic Discussion. - From the literature about the problems and the context of development of the search, it has been possible to delve into the new contributions and their functionalities.

We have noticed that in the QML field, researchers opted for different algorithms competing against each other to see which one gives the best results, QNNs vs. QVAs vs. QKs, each one with its own pros and cons. It will be necessary to observe how these algorithms evolve with the passage of time and the advancement of technology.

Ref	Contribution made	Comparative advantage
(36)	New training method for PQCs that can be used to solve Reinforcement learning tasks for discrete and continuous states spaces based on the deep Q-learning algorithm	Training method for discrete and continuous state spaces for quantum circuits
(11)	Demonstration the Out-of-Distribution generalization for the task of learning in QML where the training and testing data are drawn from different distributions	Ability to extrapolate from training data to unseen data with the potential of QML methods to outperform classical ML
(2)	New strategy for reducing the number of measurements with an adaptive optimizer to construct an improved optimizer called Rosalin that implements stochastic gradient descent while adapting the shot noise for each partial derivative and randomly assigning the shots according to a weighted distribution	Rosalin outperforms other optimizers in the task to find the ground states of molecules H ₂ , LiH, and BeH ₂ without and with quantum hardware noise
(20)	Generalization of quantum natural gradient to consider arbitrary quantum states via completely positive maps, thus the circuits can incorporate both imperfect unitary gates and fundamentally non-unitary operations such as measurements	Demonstration in numerical simulations of noisy quantum circuits the practicality of the new approach and confirm it can significantly outperform other variational techniques
(16)	An accessible introduction to quantum embedding kernels, a analysis of the practical issues arising when realizing them on a noisy near-term QC, and a strategy to mitigate these detrimental effects which is tailored to quantum embedding kernels	Improvement in classification accuracy after training, noise mitigation techniques and regularization methods for specific kernel matrices
(19)	Propose of AES algorithm for Quantum Computing with improved Security using QRW	Propose of Quantum version of AES algorithm with improvement against Quantum attacks
(37)	Explication of QKD and experiments with Quantum Noise	State of art about QKD and experiments with eavesdropper
(7)	Propose parameters and changes to RSA, on QC, to make feasible in actual	Proposes a GEECM, faster algorithm than Shor and experiments with eavesdropper
(39)	Give an overview of QC related to Cybersecurity presenting several Quantum solutions and show how can be used in future to make the area better than now	Proposes a state of art of Quantum attacks, and existing Quantumbased approaches for Cybersecurity

Table I. Comparative Table

3.5. State of the Art Timeline. - Table II shows a timeline of quantum computing major advances.

Date	Quantum Computing Major Advances
1970	James Park articulates the no-cloning theorem (28)
1973	Alexander Holevo articulates the Holevo's Theorem and Charles H. Bennet shows that computation can be done reversibly (6)
1980	Paul Beinoff describes the 1st quantum mechanical computer model (5), Tomasso Toffoli introduces the Toffoli Gate (38)
1985	David Deutsch describes the 1st universal QC
1992	David Deutsch and Richard Jozsa propose a computational problem that can be solved efficiently with the Deutsch–Jozsa algorithm on a QC
1993	Dan Simon invents an oracle problem, for which a QC would be exponentially faster than a conventional computer
1994	Peter Shor publishes the Shor's Algorithm
1995	Peter Shor proposes the 1st schemes for quantum error correction (35)
1996	Lov Grover invents the quantum DB search algorithm
2000	Arun K. Pati and Samuel L. Braunstein proved the quantum no-deleting theorem
2001	First execution of Shor's algorithm
2003	Implementation of the Deutsch–Jozsa algorithm on a QC
2006	First 12 qubit QC benchmarked
2007	D-Wave Systems demonstrates use of a 28-qubit annealing QC
2009	First electronic quantum processor created
2010	Single-electron qubit developed
2014	Scientists transfer data by quantum teleportation over a distance of 3 m with 0% error rate (30)
2017	IBM unveils 17-qubit QC
2018	Google announces the creation of a 72-qubit quantum chip
2019	IBM reveals its biggest QC yet, consisting of 53 qubits
2020	Google engineers report the largest chemical simulation on a QC
2021	IBM claims that it has created a new 127 quantum bit processor
2022	Researchers at Google Quantum AI Team Make Traversable Wormhole with a QC
2023	Researchers of Innsbruck have entangled two ions over a distance of 230 m

Table II. Timeline of Quantum Computing Major Advances

3.6. Expected or surprising results. - While we look for information for this survey, we read a diversity of articles, where some of them appears to be science fiction or coming out from a movie, but they are real scientific investigations like (18) in Nature. This article caused some controversy and what we least want is to get into controversy, but we must not forget that it is an amazing experiment and discovery.

Another point that caught the attention is the rapid advance of quantum computing. It is a subject that is not heard as much as AI or neural networks, but it is a field that is advancing by leaps and bounds. So we are happy to contribute with this survey.

4. Conclusions. - Quantum Computing is still in its early stages, and building a functional and efficient QC with enough qubits will take years.

QCs have the ability to simulate molecular behavior at a fundamental level, making them valuable for various industries. Automakers like Volkswagen and Daimler use QCs to analyze and improve the composition of electric vehicle batteries. Pharmaceutical companies also utilize QCs to study chemicals and explore new possibilities for medicine development. Quantum computing has the potential to revolutionize society, with its ability to solve optimization problems quickly by evaluating numerous solutions. Airbus employs QCs to determine fuel-efficient flight paths, while Volkswagen has developed a tool for optimizing bus and taxi routes to reduce traffic congestion. Some scientists believe that QCs could accelerate advancements in AI. However, the full extent of quantum computing's potential may take many years to realize.

The QML domain should also target designing new quantum learning models that will observe patterns under quantum mechanics schemes, not classical statistical theory. This will provide an opportunity to explore new model architectures that might overcome classical machine learning limitations.

The development of post-quantum cryptography is crucial to mitigate the cybersecurity risks posed by quantum computing. Post-quantum cryptography refers to algorithms that are resistant to attacks from QCs. It not only improves database search capabilities but also addresses optimization problems in various business domains such as data analytics, logistics, and medical research.

Discovering better algorithms to work with quantum computing is still an open area of research. Finally, this study gives an overview of QML, quantum cybersecurity and recent studies in quantum computations with its possible applications.

Referencias

- [1] Adachi S.H., Henderson M.P. (2015): Application of Quantum Annealing to Training of Deep Neural Networks. arXiv:1510.06356 <https://arxiv.org/abs/1510.06356>
- [2] Arrasmith, A., Cincio, L., Somma, R. D., Coles, P. J. (2020). Operator sampling for shot-frugal optimization in variational algorithms.
- [3] Bassoli R., Boche H., Deppe C., Ferrara R., Fitzek F.H.P., Janssen G., Saeedinaeeni S.(2021): Quantum Communication Networks. Foundations in Signal Processing, Communications and Networking. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62938-0>
- [4] Bausch, J. (2020). Recurrent Quantum Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems, (Eds.) H. Larochelle, M. Ranzato, R. Hadsell, M.F. Balcan, H. Lin, Vol. 33, pp. 1368–1379, Curran Associates, Inc., <https://proceedings.neurips.cc/papers/search?q=quantum>
- [5] Benioff, P. (1980, May). The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. Journal of Statistical Physics, 22(5), 563-591. doi:10.1007/BF01011339
- [6] Bennett, C. H. (1973). Logical reversibility of computation. IBM Journal of Research and Development, 17(6), 525-532. doi:10.1147/rd.176.0525
- [7] Bernstein, D. J., Heninger, N., Lou, P., Valenta, L. (2017). Post-quantum rsa. Cryptology ePrint Archive, Paper 2017/351. <https://eprint.iacr.org/2017/351>
- [8] Brooks, M. (2019, October). Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers. Nature, 574(7776), 19-21. doi:10.1038/d41586-019-02936-3
- [9] Buhrman H., Cleve R., Watrous J., de Wolf R.(2001). Quantum Fingerprinting. Physical Review Letters. 87 (16): 167902. doi:10.1103/PhysRevLett.87.167902
- [10] Cao, Yudong, Romero, Jonathan, Olson, Jonathan P., Degroote, Matthias, Johnson, Peter D., Kieferová, Mária, Kivlichan, Ian D., Menke, Tim, Peropadre, Borja, Sawaya, Nicolas P.D., Sim, Sukin, Veis, Libor, Aspuru-Guzik, Alán (2019): Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing. Chemical Reviews, Vol. 119, No. 19, pp. 10856–10915, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00803>
- [11] Caro, M. C., Huang, H.-Y., Ezzell, N., Gibbs, J., Sornborger, A. T., Cincio, L., Holmes, Z. (2022). Out-of-distribution generalization for learning quantum dynamics.
- [12] Cerezo, M., Arrasmith, A., Babbush, R., Benjamin, S. C., Endo, S., Fujii, K., Coles, P. J. (2021, aug). Variational quantum algorithms. Nature Reviews Physics, 3(9), 625–644. doi:10.1038/s42254-021-00348-9
- [13] Cong, I., Choi, S., Lukin, M. D. (2019, aug). Quantum convolutional neural networks. Nature Physics, 15(12), 1273–1278. doi:10.1038/s41567-019-0648-8
- [14] Díaz, A., Rodríguez, M., Piattini, M. (2024): Towards a set of metrics for hybrid (quantum/classical) systems maintainability. Journal of Universal Computer Science, vol. 30, no. 1, pp. 25-48
- [15] Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. Int. J. Theor. Phys. 21, 467–488 [16] Hubregtsen, T., Wierichs, D., Gil-Fuster, E., Derks, P.-J. H. S., Faehrmann, P. K., Meyer, J. J. (2022, oct). Training quantum embedding kernels on near-term quantum computers. Physical Review A, 106 (4). doi:10.1103/physreva.106.042431

- [16] Hubregtsen, T., Wierichs, D., Gil-Fuster, E., Derks, P.-J. H. S., Faehrmann, P. K., Meyer, J. J. (2022, oct). Training quantum embedding kernels on near-term quantum computers. *Physical Review A*, 106 (4). doi:10.1103/physreva.106.042431
- [17] Ilamaran S.. (2022): What is Quantum Control Theory?. AZoQuantum. Retrieved on June 29, 2024 from <https://www.azoquantum.com/Article.aspx?ArticleID=335>
- [18] Jafferis, D., Zlokapa, A., Lykken, J. D., Kolchmeyer, D. K., Davis, S. I., Lauk, N., Spiropulu, M. (2022, Dec 01). Traversable wormhole dynamics on a quantum processor. *Nature*, 612(7938), 51-55. doi:10.1038/s41586-022-05424-3
- [19] Ko, K.-K., Jung, E.-S. (2021). Development of cybersecurity technology and algorithm based on quantum computing. *Applied Sciences*, 11(19). doi:10.3390/app11199085
- [20] Koczor, B., Benjamin, S. C. (2022). Quantum natural gradient generalised to noisy and nonunitary circuits.
- [21] Kornjača, M., Samajdar, R., Macri, T. et al. (2023): Trimer quantum spin liquid in a honeycomb array of Rydberg atoms. *Commun Phys* 6, 358 (2023). <https://doi.org/10.1038/s42005-02301470-z>
- [22] Kwon S., Tomonaga A., Bhai G.L., Devitt S.J., Tsai J-S (2021): Gate-based superconducting quantum computing. *J. Appl. Phys.* 129(4): 041102. <https://doi.org/10.1063/5.0029735>
- [23] Lee J.S., Farmakidis N., Wright C.D. and Bhaskaran H. (2022): Polarization-selective reconfigurability in hybridized-active-dielectric nanowires. *Science Advances*, 8 eabn9459. DOI:10.1126/sciadv.abn9459
- [24] Len Y.L., Gefen T., Retzker A. et al. (2022): Quantum metrology with imperfect measurements. *Nat Commun* 13, 6971. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33563-8>
- [25] Ma H., Govoni M. Galli G. (2020): Quantum simulations of materials on near-term quantum computers. *npj Comput Mater* 6, 85. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00353-z>
- [26] Nandhini S., Harpreet Singh, Akash U.N. (2022) An extensive review on quantum computers, *Advances in Engineering Software*. Vol. 174, 2022, 103337, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103337>
- [27] Otterbach, J. S., Manenti, R., Alidoust, N., Bestwick, A., Block, M., Bloom, B., Rigetti, C. (2017). Unsupervised machine learning on a hybrid quantum computer.
- [28] Park, J. L. (1970). The concept of transition in quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 1, 23-33.
- [29] Peruzzo, A., McClean, J., Shadbolt, P., Yung, M.-H., Zhou, X.-Q., Love, P. J., O'Brien, J. L. (2014, jul). A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. *Nature Communications*, 5(1). doi:10.1038/ncomms5213
- [30] Pfaff, W., Hensen, B. J., Bernien, H., van Dam, S. B., Blok, M. S., Taminiau, T. H., Hanson, R. (2014, aug). Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits. *Science*, 345(6196), 532–535. doi:10.1126/science.1253512
- [31] Pogorelov, I. and Feldker, T. and Marciniak, Ch. D. and Postler, L. and Jacob, G. and Krieglsteiner, O. and Podlesnic, V. and Meth, M. and Negnevitsky, V. and Stadler, M. and Höfer, B. and Wächter, C. and Lakhmanskiy, K. and Blatt, R. and Schindler, P. and Monz, T. (2021): Compact Ion-Trap Quantum Computing Demonstrator. *PRX Quantum*, vol. 2, 2, pp. 020343, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PRXQuantum.2.020343>

- [32] Preskill, J. (2018, August). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. doi:10.22331/q-2018-08-06-79
- [33] Raussendorf, R. (2012). Key ideas in quantum error correction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370 (1975), 4541-4565. doi:10.1098/rsta.2011.0494
- [34] Schuld, M. (2021). Supervised quantum machine learning models are kernel methods.
- [35] Shor, P. W. (1995, October). Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory, 52(4), R2493-R2496. doi:10.1103/PhysRevA.52.R2493
- [36] Skolik, A., Jerbi, S., Dunjko, V. (2022, may). Quantum agents in the gym: a variational quantum algorithm for deep q-learning. *Quantum*, 6, 720. doi:10.22331/q-2022-05-24-720
- [37] Tianqi Zhou, X. L., Jian Shen. (2018). Quantum cryptography for the future internet and the security analysis. *Security and Communication Networks*. <https://doi.org/10.1155/2018/8214619>
- [38] Toffoli, T. (1980). Reversible computing. In J. de Bakker J. van Leeuwen (Eds.), *Automata, languages and programming* (pp. 632–644). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [39] Uttam Ghosh, P. C., Debashis Das. (2023). A comprehensive tutorial on cybersecurity in quantum computing paradigm. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.22277251.v1>
- [40] Wecker, D., Hastings, M. B., Troyer, M. (2015, oct). Progress towards practical quantum variational algorithms. *Physical Review A*, 92(4). doi:10.1103/physreva.92.042303
- [41] Whitfield, J. D., Yang, J., Wang, W., Heath, J. T., Harrison, B. (2022). *Quantum computing 2022*.
- [42] Wurtz, J. et al. (2023): Aquila: Quera's 256-qubit neutral-atom quantum computer. <https://arxiv.org/abs/2306.11727>.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

MS has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

FCA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

JPV has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

LD has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Detectando un Espía con Criptografía Cuántica

Detecting a Spy with Quantum Cryptography

Detectando um Espião com Criptografia Quântica

Mauricio Solar ^{1,*}, Jean-Pierre Villacura ², Felipe Cisternas Alvarez ³, Liuba Dombrovskaja ⁴

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Resumen. - Este artículo muestra una implementación de la criptografía cuántica. Se introduce los conceptos básicos de la computación cuántica para comprender los términos mencionados en la implementación relacionados con la ciberseguridad y la distribución de llaves cuánticas (QKD). Se muestra una aplicación de QKD, donde se ve cómo se detecta fácilmente un espía cuando se intercepta un mensaje.

Palabras clave: Computación Cuántica; Distribución de Llaves Cuánticas (QKD); Criptografía Cuántica.

(*) Autor de correspondencia

¹ Académico, Universidad Técnica Federico Santa María, mauricio.solar@usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4433-4622>

² Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, jean-pierre.rojas@sansano.usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-8611-1408>

³ Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, felipe.cisternasal@sansano.usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-7029-8736>

⁴ Académica, Universidad Técnica Federico Santa María, liuba@inf.utfsm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/00000001-6572-9765>

Summary. - *This article shows an implementation of quantum cryptography. We introduce the reader to the basic concepts of quantum computing so that they can easily understand the terms mentioned in the implementation related to cybersecurity and quantum key distribution (QKD). We show an application of QKD, where we can see how a spy is easily detected when a message is intercepted.*

Keywords: *Quantum Computing; Quantum Key Distribution (QKD); Quantum Cryptography.*

Resumo. - *Este artigo mostra uma implementação de criptografia quântica. Apresentamos ao leitor os conceitos básicos da computação quântica para que ele possa entender facilmente os termos mencionados na implementação relacionados à segurança cibernética e distribuição de chaves quânticas (QKD). Mostramos uma aplicação de QKD, onde podemos ver como um espião é facilmente detectado quando uma mensagem é interceptada.*

Palavras-chave: *Computação Quântica; Distribuição de Chaves Quânticas (QKD); Criptografia Quântica.*

1. Introducción. - Un computador cuántico (QC por las siglas en inglés de *Quantum Computing*) es un computador que explota fenómenos de la mecánica cuántica. A pequeña escala, la materia física exhibe propiedades tanto de partículas como de ondas, y la computación cuántica aprovecha este comportamiento utilizando hardware especializado. La física clásica no puede explicar el funcionamiento de estos dispositivos cuánticos, y un QC escalable podría realizar algunos cálculos exponencialmente más rápido que cualquier computador clásico moderno [1].

Nadie ha mostrado la mejor manera de construir un QC tolerante a fallas, y varias empresas y grupos de investigación están investigando diferentes tipos de bits cuánticos (qubits, por las siglas en inglés de *Quantum Bits*) [2]. Algunos ejemplos de estas tecnologías de qubits son procesadores de trampa de iones basados en puertas [3], procesadores superconductores basados en puertas [4], procesadores fotónicos [5], procesadores de átomos neutros [6], procesadores de átomos Rydberg [7], o recocidos cuánticos⁵. Sin embargo, el uso de este último se limita sólo a casos específicos [8].

Los datos cuánticos exhiben dos propiedades propias de la computación cuántica, la superposición y el entrelazamiento, lo que lleva a distribuciones de probabilidad conjuntas que podrían requerir una cantidad exponencial de recursos computacionales clásicos para representar o almacenar.

El qubit sirve como unidad básica de información cuántica. Representa un sistema de dos estados, como un bit clásico, excepto que puede existir en una superposición de sus dos estados. En cierto sentido, una superposición es como una distribución de probabilidad entre dos valores. Sin embargo, un cálculo cuántico puede verse influenciado por ambos valores a la vez, lo que es inexplicable por cualquiera de los estados individualmente. En este sentido, un qubit superpuesto almacena ambos valores simultáneamente. Al medir un qubit, el resultado es una salida probabilística de un bit clásico. Si un QC manipula el qubit de una manera particular, los efectos de interferencia de ondas pueden amplificar los resultados de medición deseados.

Ejemplos de datos cuánticos que pueden generarse o simularse en un dispositivo cuántico son la simulación química [9], la simulación de materia cuántica [10], el control cuántico [11], las redes de comunicación cuántica [12], o metrología cuántica [13].

La teoría de la computación cuántica señala que su velocidad de procesamiento puede ser mucho más rápida que incluso el supercomputador más rápido de la actualidad. Ejemplos como el algoritmo de Shor, con su capacidad potencial para factorizar grandes números primos en cuestión de segundos, a diferencia de los miles de años que podría tardar la computación clásica, se consideran signos de los avances y el desarrollo que vendrán con la computación cuántica [14], especialmente en criptografía.

La criptografía ha tenido un desarrollo importante desde 1975 con el establecimiento del algoritmo *Data Encryption Standard* (DES) para el cifrado de archivos mientras emergía la informática. Desde entonces se han desarrollado varios algoritmos para cumplir esta función criptográfica, siendo los más conocidos RSA (*Rivest-Shamir-Adleman*) y *Advanced Encryption Standard* (AES). La computación cuántica amenaza la seguridad de estos algoritmos al poder realizar cálculos mucho más rápido, pudiendo resolver operaciones que en el paradigma clásico llevarían unos 50 años utilizando supercomputadores en cuestión de segundos.

La Distribución de Llaves Cuánticas (QKD por sus siglas en inglés de *Quantum Key Distribution*) está estrechamente relacionada con la criptografía, ya que la seguridad de los datos depende de la transmisión de la llave previamente generada por un algoritmo criptográfico.

Este artículo muestra una implementación de la criptografía cuántica, destacando su potencial. La estructura de este artículo incluye una breve descripción de la computación cuántica seguida de una sección con el estado del arte que muestra los últimos avances en criptografía cuántica. En la sección IV se muestra una aplicación de la criptografía cuántica, donde se puede ver cómo se detecta fácilmente un espía cuando se intercepta un mensaje. La sección final

⁵ <https://www.dwavesys.com>

resume las conclusiones.

2. Una breve descripción general de la computación cuántica. –

2.1. Propiedades de la computación cuántica. - La computación cuántica se basa en propiedades de la mecánica cuántica para procesar problemas que estarían fuera del alcance de los computadores clásicos. Un QC utiliza qubits. Los qubits son como bits normales en un computador clásico, pero con la capacidad adicional de colocarse en un estado de superposición y compartir entrelazamiento entre sí [15].

La computación cuántica funciona utilizando principios cuánticos. Los principios cuánticos requieren un nuevo diccionario de términos para comprenderse completamente, términos que incluyen superposición, entrelazamiento y decoherencia. A continuación, se explican brevemente estos principios.

- **Superposición:** La superposición establece que, al igual que las ondas en la física clásica, se puede agregar dos o más estados cuánticos y el resultado será otro estado cuántico válido. Por el contrario, también se puede representar cada estado cuántico como una suma de dos o más estados distintos. Esta superposición de qubits da a los QC un paralelismo inherente, permitiéndoles procesar millones de operaciones simultáneamente.
- **Entrelazamiento:** El entrelazamiento cuántico ocurre cuando dos sistemas se vinculan tan estrechamente que el conocimiento sobre uno proporciona conocimiento inmediato sobre el otro, sin importar qué tan lejos estén. Los procesadores cuánticos pueden sacar conclusiones sobre una partícula midiendo otra; el entrelazamiento cuántico permite a los QC resolver problemas complejos más rápidamente. Cuando se mide un estado cuántico, la función de onda colapsa y el estado se mide como cero o uno. En este estado conocido o determinista, el qubit actúa como un bit clásico. El entrelazamiento es la capacidad de los qubits de correlacionar su estado con otros qubits.
- **Decoherencia:** La decoherencia es la pérdida del estado cuántico en un qubit. Los factores ambientales, como la radiación, pueden provocar el colapso del estado cuántico de los qubits. Un gran desafío de ingeniería en la construcción de un QC es diseñar diversas características que intenten retrasar la decoherencia del estado, como la construcción de estructuras especiales que protejan los qubits de campos externos.

El estado actual de la computación cuántica se conoce como la era de la cuántica ruidosa de escala intermedia (NISQ, por las siglas en inglés de Noisy Intermediate-Scale Quantum), caracterizada por procesadores cuánticos que contienen entre 50 y 100 qubits que aún no están lo suficientemente avanzados para la tolerancia a fallas ni lo suficientemente grandes como para alcanzar la supremacía cuántica. El término NISQ fue acuñado por [16]. Estos procesadores, que son sensibles a su entorno (ruidoso) y propensos a la decoherencia cuántica, aún no son capaces de realizar una corrección continua de errores cuánticos. Esta escala intermedia está definida por el volumen cuántico, que se basa en el número moderado de qubits y la fidelidad de la puerta.

Los computadores clásicos realizan operaciones clásicas deterministas o pueden emular procesos probabilísticos utilizando métodos de muestreo. Al aprovechar la superposición y el entrelazamiento, los QC pueden realizar operaciones cuánticas que son difíciles de emular a escala con los computadores clásicos. Las ideas para aprovechar la computación cuántica NISQ incluyen optimización, simulación cuántica, criptografía y aprendizaje automático (ML por sus siglas en inglés de *Machine Learning*).

En particular, se cree que los QC son capaces de resolver rápidamente muchos problemas que ningún computador clásico podría resolver en un período de tiempo factible, una característica conocida como *supremacía cuántica* [17].

2.2. Puertas cuánticas. - El estado de los qubits se puede manipular aplicando puertas lógicas cuánticas, de forma análoga a cómo se pueden manipular los bits clásicos con puertas lógicas clásicas. A diferencia de muchas puertas lógicas clásicas, las puertas lógicas cuánticas son reversibles [18]. Las puertas de lógica cuántica están representadas por matrices unitarias, una puerta que actúa sobre n qubits está representada por una matriz unitaria de $2^n \times 2^n$.

Los estados cuánticos generalmente se representan mediante *kets*, de una notación conocida como *bra-ket*, la representación vectorial de un solo qubit se muestra en la ecuación 1.

$$|a\rangle = v_0|0\rangle + v_1|1\rangle \rightarrow \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

v_0 y v_1 son las amplitudes de probabilidad complejas del qubit, estos valores determinan la probabilidad de medir un 0 o un 1, al medir el estado del qubit. El valor cero está representado por el *ket* en la ecuación 2, y el valor uno está representado por el *ket* en la ecuación 3.

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

El producto tensorial denotado por el símbolo \otimes se utiliza para combinar estados cuánticos. La acción de la puerta sobre un estado cuántico específico se encuentra multiplicando el vector $|\phi_1\rangle$ que representa el estado por la matriz U que representa la puerta, por lo que el resultado es un nuevo estado cuántico $|\phi_2\rangle$ mostrado en la ecuación 4.

$$U|\phi_1\rangle = |\phi_2\rangle \quad (4)$$

Existen muchas puertas cuánticas, a continuación, se revisan algunas de las más utilizadas en la literatura:

- **Puerta NOT:** Esta puerta es ampliamente conocida como puerta de Pauli-X, ya que esta puerta cuántica en particular transforma el estado existente del qubit para rotarlo alrededor del eje X. Como sugiere el nombre, la puerta NOT convertiría un qubit de su estado inicial a su estado complementario. Esta puerta cuántica está representada por la matriz en la ecuación 5 y opera como se muestra en la ecuación 6.

$$X := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$X|0\rangle = |1\rangle, \quad X|1\rangle = |0\rangle \quad (6)$$

- **Puerta Pauli-Y:** Las puertas Pauli-Y son capaces de rotar el qubit de entrada alrededor del eje Y. Esta puerta cuántica está representada por la matriz en la ecuación 7 y opera como se muestra en la ecuación 8.

$$Y := \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$Y|0\rangle = i|1\rangle, \quad Y|1\rangle = -i|0\rangle \quad (8)$$

- **Puerta Pauli-Z:** La puerta Pauli-Z o de fase flip es capaz de rotar el qubit de entrada alrededor del eje Z. Esta puerta cuántica está representada por la matriz en la ecuación ??.

$$Z := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Pauli-Z deja el estado de sesgo $|0\rangle$ sin cambios y asigna $|1\rangle$ a $-|1\rangle$ como se muestra en la ecuación 10.

$$Z|0\rangle = |0\rangle, \quad Z|1\rangle = -|1\rangle \quad (10)$$

- **Puerta NOT controlada:** la puerta NOT controlada (CNOT) actúa en 2 (o más) qubits y realiza la operación NOT en el segundo (o más) qubit solo cuando el primer qubit es $|1\rangle$. Esta puerta está representada por la matriz unitaria hermitiana (ecuación 11), y opera según la ecuación 12.

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} CNOT|00\rangle &= |00\rangle \\ CNOT|01\rangle &= |01\rangle \\ CNOT|10\rangle &= |11\rangle \\ CNOT|11\rangle &= |10\rangle \end{aligned} \tag{12}$$

- **Puerta Hadamard:** La puerta Hadamard actúa sobre un solo qubit y crea estados de superposición iguales dado un estado de sesgo. La puerta de Hadamard realiza una rotación de π sobre el eje $(x^{\wedge} + z^{\wedge})/2$ en la Esfera de Bloch (Figura I). Esta puerta está representada por la matriz de Hadamard (ecuación 13), y opera como en la ecuación 14.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \tag{13}$$

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}, \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \tag{14}$$

2.3. Ruido. - El ruido está presente en los QC modernos. Los qubits son susceptibles a interferencias del medioambiente, fabricación imperfecta, TLS y, a veces, incluso rayos gamma. Hasta que se alcance la corrección de errores a gran escala, los algoritmos actuales deben poder seguir funcionando en presencia de ruido. Esto hace que probar algoritmos bajo ruido sea un paso importante para validar algoritmos y modelos cuánticos.

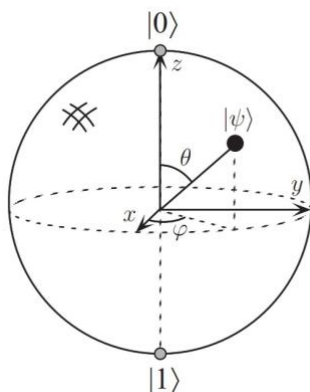


Figura I. Esfera de Bloch para representar un qubit.

2.4. Corrección de errores cuánticos (QEC). - La corrección de errores cuánticos (QEC por sus siglas en inglés de *Quantum Error Correction*) se utiliza en computación cuántica para proteger la información cuántica de errores debidos a la decoherencia y otros ruidos cuánticos. La corrección de errores tradicional emplea repetición excesiva. El código de repetición es la forma más sencilla pero ineficiente. La idea es almacenar la información varias veces y realizar una votación más amplia en caso de que luego se descubra que estas copias difieren. No es posible copiar

información cuántica debido al teorema de no-clonación. Este teorema parece presentar un obstáculo para formular una teoría de QEC; sin embargo, es concebible transferir la información lógica de un solo qubit a un estado altamente entrelazado de varios qubits físicos [16].

La evolución de la computación cuántica ha sido muy rápida. La Tabla I muestra una cronología de los principales avances en la computación cuántica.

3. Estado del Arte. - La Distribución de Llaves Cuánticas (QKD por sus siglas en inglés de *Quantum Key Distribution*) está estrechamente relacionada con la criptografía, ya que la seguridad de los datos depende de la transmisión de la llave previamente generada por un algoritmo criptográfico.

Existen peligros asociados a la transmisión de la llave que se solucionaron en parte con la introducción de la llave asimétrica (cuyo algoritmo más famoso es RSA).

La computación cuántica propone nuevas soluciones en este aspecto al poder transmitir la misma llave a dos destinatarios (Alice y Bob), con una altísima certeza de corroborar que no hay una tercera persona obteniendo esta llave. Esto es posible gracias a propiedades cuánticas como el entrelazamiento y la no-clonación. Con el entrelazamiento es posible conocer el estado de ambos fotones (es decir, dirección de giro) y la no-clonación permite detectar si hay algún intruso en el sistema, ya que arrojaría una llave común diferente a la de Alice y Bob (Figura II). Como Alice y Bob tienen la misma llave común, Alice puede cifrar su mensaje y enviárselo a Bob, quien tiene la llave para descifrarlo y, por lo tanto, leer el mensaje. Se asume un canal libre de ruido para esta situación.

La computación cuántica también puede contribuir al problema del "bloqueo de un solo uso" de la computación clásica al proporcionar llaves aleatorias debido al principio de incertidumbre de Heisenberg. Hay que tener en cuenta que en este tipo de problema la seguridad depende hasta cierto punto de la aleatoriedad de la llave.

En [17], los autores proponen un algoritmo AES modificado y utilizan computación cuántica para cifrar/descifrar archivos de imágenes AES utilizando IBM Qiskit para la evaluación del rendimiento. Ellos muestran que el algoritmo AES se puede implementar utilizando puertas cuánticas y sugieren que AES se implemente con generación de números aleatorios.

Fecha	Principales avances en computación cuántica
1970	James Park articula el teorema de no-clonación ?
1973	A. Holevo articula el teorema de Holevo y Ch. H. Bennet muestra que el cálculo se puede hacer de forma reversible ?
1980	Paul Beinoff describe el primer modelo de computador de mecánica cuántica ?, Tomasso Toffoli presenta la Puerta de Toffoli ?
1985	David Deutsch describe el primer QC universal
1992	D. Deutsch y R. Jozsa proponen un problema computacional que puede resolverse eficientemente con su algoritmo en un QC
1993	Dan Simon inventa un problema de oráculo, para el cual un QC sería exponencialmente más rápido que un computador clásico
1994	Peter Shor publica el algoritmo de Shor
1995	Shor propone los primeros esquemas para QEC ?
1996	Lov Grover inventa el algoritmo de búsqueda de BDs cuánticas
2000	Pati y Braunstein demostraron el teorema cuántico de no eliminación
2001	Primera ejecución del algoritmo de Shor
2003	Implementación del algoritmo Deutsch-Jozsa en un QC
2006	Primer QC de 12 qubits
2007	Sistema D-Wave muestra el uso de un QC de recocido de 28 qubits
2009	Creación del primer procesador cuántico electrónico

2010	Desarrollo del qubit de un solo electrón
2014	Los científicos transfieren datos mediante teletransportación cuántica a una distancia de 3 m con una tasa de error del 0% ?
2017	IBM presenta el QC de 17 qubits
2018	Google anuncia la creación de un chip cuántico de 72 qubits
2019	IBM revela su mayor QC hasta ese momento de 53 qubits
2020	Google informa la simulación química más grande en un QC
2021	IBM afirma que ha creado un procesador de 127 qubits
2022	El equipo de Google crea un agujero de gusano transitable con un QC
2023	Investigadores de Innsbruck entrelazaron dos iones a más de 230 m

Tabla I: Cronología de los principales avances de la computación cuántica

AES se combina con el uso de generación de números aleatorios en el proceso. En la implementación tradicional del algoritmo AES, la operación *Shift Row* mueve los datos para alinearlos en ciertos pasos de cifrado. Dado que el proceso de descifrado puede invertir el orden de estos pasos, se vuelve predecible. Para abordar esta vulnerabilidad, el autor sugiere modificar el rendimiento de la operación *Shift Row* para introducir movimientos aleatorios utilizando *Quantum Random Walk (QRW)*, dificultando la predicción del orden correcto durante el proceso de descifrado, logrando una mayor seguridad que el enfoque clásico.

En [18], los autores se centran en analizar las características de la criptografía cuántica y explorar sus ventajas en el futuro de Internet. Analizan el protocolo QKD en el canal libre de ruido realizando mediciones de diferentes variables, como la probabilidad de que se detecte al espía v/s número de fotones medidos en un canal libre de ruido y 30% de ruido. También analiza las probabilidades de errores en el receptor v/s probabilidad de que un espía escuche a escondidas el canal.

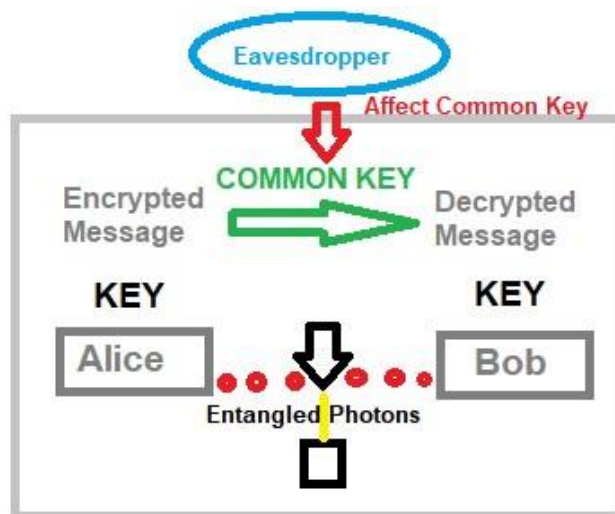


Figura II. Distribución de Llaves Cuánticas (QKD).

En [19], los autores hacen un aporte al estado del arte de la ciberseguridad desde amplias perspectivas. Ofrecen una visión general de la computación cuántica y cómo puede afectar a los problemas de ciberseguridad. También demuestra soluciones en computación cuántica a problemas del paradigma de computación clásica relacionado con la ciberseguridad y muestra cómo la computación cuántica podría usarse en el futuro para mejorar las soluciones de ciberseguridad.

En [20], los autores hacen una contribución proponiendo parámetros y cambios a RSA para hacer factibles la generación de llaves, el cifrado y descifrado, las firmas y la verificación en la computación actual y, al mismo tiempo, protegidos contra ataques de computación cuántica. Proponen un nuevo algoritmo cuántico para generar números de factores, conocido como Método de factorización de curvas elípticas de Grover más el uso de curvas de Edwards

(GEECM por sus siglas en inglés de *Grover plus Elliptic-Curve factorization Method using Edwards curves*) más rápido que Shor y algoritmos del paradigma clásico.

La Tabla II muestra la ventaja (columna “Ventaja comparativa”) de la contribución realizada (2da columna) por la referencia en la columna “Ref”.

4. Implementación de QKD. - En esta sección se usa la propiedad de los estados de superposición y se muestra su utilidad para compartir llaves cuánticas de forma segura. Esto se hace de una manera diferente al paradigma de computación clásica, donde no se puede estar seguro de si hay otras personas escuchando en el canal.

El principio de QKD consiste en encontrar una llave segura que pueda utilizarse para cifrar la comunicación entre dos interlocutores de forma segura, con una alta probabilidad de detectar un espía en el canal de comunicación.

Utiliza cuatro posibles estados cuánticos para representar los qubits de información, que se pueden representar en la esfera de Bloch (Figura III). Estos cuatro posibles estados cuánticos son:

- $|0i$ y $|1i$: Estados de polarización lineal de la luz alineados horizontal y verticalmente, respectivamente.
- $|+i$ y $|-i$: estados de polarización diagonal de la luz de $\pm 45^\circ$ alineados diagonalmente en $+45^\circ$ y -45° . Son una superposición de los estados $|0i$ y $|1i$.

Ref	Contribución realizada	Ventaja comparativa
[19]	Propuesta de algoritmo AES para Computación Cuántica con Seguridad mejorada usando QRW	Propuesta de versión Quantum del algoritmo AES con mejora contra ataques Quantum
[20]	Explicación de QKD y experimentos con Ruido Cuántico	Estado del arte sobre QKD y experimentos con espías
[21]	Ofrece una descripción general de QC relacionado con la ciberseguridad presentando varias soluciones Quantum y muestra cómo se pueden utilizar en el futuro.	Propone un estado del arte de los ataques Quantum y los enfoques existentes basados en Quantum para la ciberseguridad
[22]	Propone parámetros y cambios a RSA, en QC, para hacerlos factibles en la actualidad	Propone un GEECM, algoritmo más rápido que Shor y experimenta con escuchas de espías

Tabla II. Tabla comparativa.

Para fines prácticos, se supone que Alice quiere enviar el siguiente mensaje a Bob: 1 2 3 2 2 1 usando QKD.

Lo que se desea es enviar una cadena como mensaje a través del protocolo de comunicación cuántica, tomando en consideración los siguientes escenarios:

- Que el mensaje se transmita correctamente entre ambos interlocutores (Alice y Bob) sin la presencia de un espía.
- Detección del espía: Particularidad del paradigma de la computación cuántica basado en el principio de entrelazamiento y superposición.

En ambos casos se determina la ‘Llave Compartida’, que se utiliza para transmitir el mensaje de forma segura. Además del aspecto cuántico, la biblioteca *cryptography.fernet* se utiliza para cifrar el mensaje que Alice envía a Bob utilizando la llave obtenida con el uso de este protocolo de comunicación cuántica. Las bibliotecas requeridas son las siguientes:

```

1 #Importing Libraries
2 from qiskit import QuantumCircuit, Aer, transpile
3 from qiskit.visualization import plot_histogram, plot_bloch_multivector
4 from numpy.random import randint
5 import numpy as np
6 import hashlib
7 import os
8 import random
9 from cryptography.hazmat.primitives.ciphers import Cipher, algorithms, modes from
   cryptography.hazmat.backends import default_backend
10 from cryptography.hazmat.primitives import padding
11 np.random.seed(seed=0)

```

4.1. Transmisión entre interlocutores sin presencia de un Espía. - Esta sección presenta la transmisión de un mensaje entre dos interlocutores utilizando el protocolo de comunicación cuántica BB84 sin la presencia de un espía (llamémosla Eve). Se utilizan las siguientes funciones y se explican a medida que se utilizan:

```

1 def convertir_a_binario(valor, prefijo):
2     if isinstance(valor, str):
3         binario = ''.join(format(ord(c), '08b') for c in valor)
4     elif isinstance(valor, int):
5         binario = bin(valor)[2:]
6     if len(binario) < prefijo:
7         binario = "0" * (prefijo - len(binario)) + binario
8     return binario
9
10 def convertir_de_binario(cadena, prefijo):
11     if len(cadena) % prefijo != 0:
12         raise ValueError("La longitud de la cadena no es divisible por el prefijo")
13     lista = []
14     for i in range(0, len(cadena), prefijo):
15         subcadena = cadena[i:i+prefijo]
16         numero = int(subcadena, 2)
17         lista.append(numero)
18     return lista
19
20 def encode_message(bits, bases):
21     message = []
22     n=len(bases)
23     for i in range(n):
24         qc = QuantumCircuit(1,1)
25         if str(bases[i]) == '0':
26             if str(bits[i]) == '0':
27                 pass
28             elif str(bits[i]) == '1':
29                 qc.x(0)
30         else:
31             if str(bits[i]) == '0':
32                 qc.h(0)
33             elif str(bits[i]) == '1':
34                 qc.x(0)
35         qc.h(0) qc.barrier()
36         message.append(qc)
37     return message
38
39 def measure_message(message, bases):
40     backend = Aer.get_backend('aer_simulator')
41     measurements = []
42     n=len(bases)
43     for q in range(n):
44         if str(bases[q]) == '0': # base Z
45             message[q].measure(0,0)
46         if str(bases[q]) == '1': # base X
47             message[q].h(0)
48             message[q].measure(0,0)
49         aer_sim = Aer.get_backend('aer_simulator')
50         result = aer_sim.run(message[q], shots=1, memory=True).result()
51         measured_bit = int(result.get_memory()[0])
52         measurements.append(measured_bit)
53     return measurements
54
55 def remove_no_coincidences(a_bases, b_bases, bits):
56     good_bits = []
57     n=len(bits)
58     for q in range(n):
59         if str(a_bases[q]) == str(b_bases[q]):
60             good_bits.append(bits[q])
61     return good_bits
62
63 def sample_bits(bits, selection):

```

```

59 sample = []
60 for i in selection:
61     i = np.mod(i, len(bits))
62     sample.append(bits.pop(i))
63 return sample

```

La situación es la siguiente:

- Alice quiere enviar como mensaje la cadena: 1 2 3 2 2 1
- Alice quiere enviarle la cadena utilizando el protocolo de comunicación cuántica a Bob:
 - El cifrado binario que utiliza 2 bits para cada cifrado es: 0b011011101001
 - La ‘Llave Común’ se determina mediante el uso del protocolo cuántico para cifrar el mensaje y transmitirlo de forma segura.

Lo anterior se obtiene de la siguiente manera:

```

1 Mensaje_sin_encriptar=[1,2,3,2,2,1]
2 prefix=2
3 Mensaje_binario_sin_encriptar=''.join([convertir_a_binario(x,prefix) for x in
  Mensaje_si #print('Cadena en Binario que quiere enviar Alice a Bob: '+
  Mensaje_binario_sin_encriptar
4 n=30
5 Bits_a_mandar_testeo=randint(2, size=n)

```

Alice envía el mensaje (bits que se utilizarán para establecer la Llave Compartida) a Bob usando una base aleatoria que contiene información correspondiente a la base en la que se codificará cada qubit (Base-Z para 0 o Base-X para 1) de acuerdo a lo siguiente:

```

1 Base_Alice=randint(2, size=len(Bits_a_mandar_testeo))
2 print('Base Alice: '+str(Base_Alice))
3
4 Base Alice: [1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 0 0 1]

```

Para codificar el mensaje con esta base se utiliza la función *encode_message(bits, bases)*, que funciona de la siguiente manera:

- Cada elemento de la base corresponde a la base de codificación:
 - 0: Preparar la codificación del qubit en la base Z
 - 1: Preparar la codificación del qubit en la base X
- Por ejemplo, si se tiene un bit 1 en la base 0, implica que la codificación es "1" en la base Z.
- Esto es importante ya que dependiendo de la base sobre la que se realice la codificación se utilizan diferentes puertas cuánticas. Para codificar un 1 en la base X, se aplica la puerta Hadamard H para integrar la superposición de estados, junto con la puerta X para cambiar el estado del qubit de 0 a 1. En las simulaciones de Qiskit, todos los estados se inicializan en 0 y, por lo tanto, a veces se debe usar la negación con la puerta X para tener el estado 1.
- Para cada bit que se va a codificar, utilizando las reglas anteriores, se utiliza *qc.barrier()* para separar los estados.
- Aplicando la función *encode_message(bits, bases)* sobre el mensaje que Alice quiere enviar a Bob, con la base de Alice, se tiene: *mensaje=codificar_mensaje(Bits_para_enviar_prueba, Base_Alice)*

Se realiza una rápida verificación de que el primer elemento del mensaje codificado sea consistente en su circuito cuántico según su qubit y base, produciendo la salida de la Figura III:

```
1 print('Bit: '+str(Bits_a_mandar_testeo[0])+', Base: '+str(Base_Alice[0]))
2 # Se presenta el circuito cuántico del primer qubit.
3 mensaje[0].draw()
```

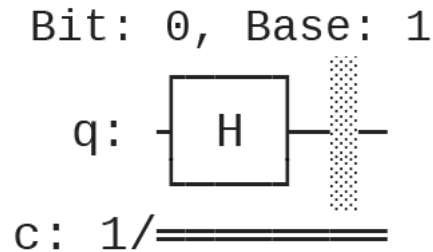


Figura III. Un circuito cuántico como salida.

Cuando la base es X y el bit es 1, se debe aplicar una puerta X y una puerta Hadamard (superposición de estados). Si la base es Z y el bit es 1, se debe aplicar una puerta X.

Determinando aleatoriamente la base de Bob y sumando la base obtenida por Alice anteriormente, se tiene:

```
1 print('Base Alice: '+str(Base_Alice))
2 Base_Bob=randint(2,size=len(Bits_a_mandar_testeo))
3 print('Base Bob: '+str(Base_Bob))
4
5 Base Alice: [1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1]
6 Base Bob: [1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0]
```

Se puede notar que las bases de ambos, generadas aleatoriamente, son diferentes entre sí. Bob codifica el mensaje enviado por Alice (relacionado con la configuración de la llave compartida, no del contenido) usando la función `medida_mensaje(mensaje, Base_Bob)` con su propia base:

```
1 print('Bob codifica mensaje(Shared Key) measure_message(mensaje, Base_Bob)')
2 Resultados_Bob=measure_message(mensaje, Base_Bob)
3 print('Resultados_Bob: '+str(Resultados_Bob))
4
5 Resultados_Bob: [0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1,
0, 0, 0, 1, 0, 1, 1]
```

Con ambas bases se utiliza la función `remove_no_coincidences(Base_Alice, Base_Bob, Bits_a_mandar_testeo)` para determinar el arreglo de bits cuya coincidencia en las bases es mutua, para lograr una llave mutua:

```
1 Alice_Key=list(map(int,remove_no_coincidences(Base_Alice, Base_Bob,
Bits_a_mandar_testeo)
2 Alice_Key_str=''.join(str(bit) for bit in Alice_Key) print('Alice_Key: '+
Alice_Key_str)
3 #print(Alice_Key_str)
4 Bob_Key=remove_no_coincidences(Base_Alice, Base_Bob, Resultados_Bob)
5 Bob_Key_str=''.join(str(bit) for bit in Bob_Key)
6 print('Bob_Key: '+Bob_Key_str)
7
8 Alice_Key: 0110111000001001
9 Bob_Key: 0110111000001001
```

Se ha podido obtener una llave para Alice y Bob mediante el protocolo de comunicación cuántica. Ambas llaves son idénticas y, por lo tanto, se puede crear una llave compartida que Alice y Bob pueden usar para enviar mensajes de forma segura mediante un algoritmo de cifrado, como AES.

Ahora Alice envía el mensaje cifrado utilizando la llave obtenida mediante el algoritmo de cifrado AES y la llave determinada previamente con el protocolo de comunicación cuántica. Si esta llave tiene menos de 16 bits, se incorpora una extensión utilizando los primeros 16 caracteres del Hash SHA256:

```

1 def expandir_llave_aes128(llave):
2     # Extension using HASH SHA256
3     llave_hash = hashlib.sha256(llave.encode()).digest()
4     return llave_hash[:16]
5 def encriptar_mensaje(llave, mensaje):
6     # Convert the key to bytes using a hash function
7     llave_bytes = hashlib.sha256(llave.encode()).digest()[:16]
8     iv = os.urandom(16)
9     cipher = Cipher(algorithms.AES(llave_bytes), modes.CBC(iv), backend=default_backend
10    ( encriptador = cipher.encryptor()
11    padder = padding.PKCS7(128).padder()
12    mensaje_rellenado = padder.update(mensaje.encode()) + padder.finalize()
13    mensaje_encriptado = encriptador.update(mensaje_rellenado) + encriptador.finalize()
14    mensaje_encriptado_con_iv = iv + mensaje_encriptado
15    return mensaje_encriptado_con_iv
16 def desencriptar_mensaje(llave, mensaje_encriptado):
17     iv = mensaje_encriptado[:16]
18     mensaje_encriptado_sin_iv = mensaje_encriptado[16:]
19     llave_bytes = hashlib.sha256(llave.encode()).digest()[:16]
20     cipher = Cipher(algorithms.AES(llave_bytes), modes.CBC(iv), backend=default_backend
21    ( desencriptador = cipher.decryptor()
22    mensaje_desencriptado = desencriptador.update(mensaje_encriptado_sin_iv) +
23    desencrip
24    unpadder = padding.PKCS7(128).unpadder()
25    mensaje_original = unpadder.update(mensaje_desencriptado) + unpadder.finalize()
26    return mensaje_original.decode()
27 def is_equal_Keys(Key1,Key2):
28     if Key1==Key2:
29         print('Llaves coinciden.')
30         return True
31     else:
32         print('Llaves no coinciden.')
33         return False

```

Luego, Alice envía la matriz de números 1 2 3 2 2 1, intentando cifrar el mensaje usando la llave obtenida, en este caso idéntica a la de Bob. Esto no siempre es así ya que la presencia de un espía muchas veces implica que la llave obtenida para ambos es diferente, por lo que se sospecha de la presencia de un espía, lo cual se presenta en la siguiente sección.

```

1 Mensaje_sin_encriptar=[1,2,3,2,2,1]
2 prefix=2
3 Mensaje_binario_sin_encriptar=''.join([convertir_a_binario(x,prefix) for x in
4     Mensaje_si
5 Mensaje_cifrado=encriptar_mensaje(Alice_Key_str,Mensaje_binario_sin_encriptar)

```

Por lo tanto, el mensaje cifrado que Alice envía a través del canal a Bob es el siguiente:

```

1 print(Mensaje_cifrado.hex())
2
3 8dca5bd861f9658f928cc5e421414441aa2c6788e2df5476 f0e7992e2c68df27

```

Bob recibe este mensaje y utiliza la llave obtenida con el protocolo de comunicación cuántica para descifrarlo. Se supone que no hay interferencia de ruido en el canal:

```

1 mensaje_cifrado_recibido_por_Bob=Mensaje_cifrado
2 try:
3     Mensaje_Descifrado_por_Bob=desencriptar_mensaje(Bob_Key_str ,
4         mensaje_cifrado_recibido
5     print('Mensaje descifrado por Bob con su llave: '+Mensaje_Descifrado_por_Bob)
6     mensaje_final=convertir_de_binario(Mensaje_Descifrado_por_Bob ,2)
7     print('')
8     print(  equivale    a: '+str(mensaje_final))
9 except:
10    print('ERROR. Llave usada no es correcta.')
```

El resultado es que Alice y Bob han podido establecer una llave común utilizando el protocolo de comunicación cuántica. Alice usa esta llave para cifrar su mensaje y enviárselo a Bob por el canal.

Bob recibe este mensaje, utiliza su llave (generada por el protocolo de comunicación cuántica) y lo descifra, obteniendo con total seguridad y sin errores el mensaje que Alice le envió antes de cifrar, obteniendo como resultado: Mensaje descifrado por Bob con su llave: 011011101001 equivale a [1, 2, 3, 2, 2, 1].

4.2. Transmisión entre interlocutores con Detección de Espías. - ¿Qué sucede si Alice envía el mensaje para establecer la llave de cifrado a Bob y en el camino Eve intercepta este mensaje?

Hay posibilidades de que las llaves generadas con el protocolo QKD de Alice y Bob sean diferentes. Esto ocurre porque Eve (Espía) intercepta la comunicación y realiza mediciones de los qubits. En ciertos casos, Eve no sabe con certeza cuál era la polarización del fotón que midió y podría enviarle a Bob la polarización equivocada.

La repetición de este error es lo que hace que Alice y Bob obtengan llaves diferentes, y así puedan darse cuenta de que fue porque posiblemente había un espía en el camino.

La Figura IV ejemplifica cómo puede suceder que Bob reciba por error cierta preparación de fotones enviada por Alice, y Eve intercepte el mensaje.

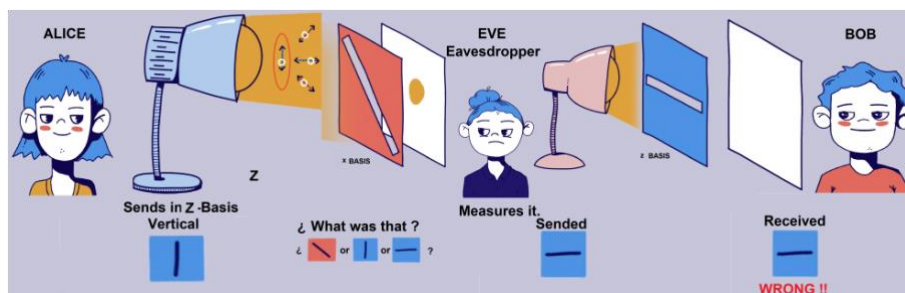


Figura IV: Mensaje interceptado por un espía (Eve)

Al recrear esta situación, se puede comprobar si las llaves generadas coinciden o no. Alice, al preparar los qubits a enviar, define su polarización de forma aleatoria:

```

1 np.random.seed(seed=5)
2 n=30
3 Alice_Bits=randint(2, size=n) Alice_Base=randint(2, size=n)
4 Mensaje_inicial_para_Key=encode_message(Alice_Bits, Alice_Base)
```

Eve define su propia base, intercepta *Initial_Message_for_Key* enviado por Alice a Bob y lo envía nuevamente. Cuando ella realiza una medición en el mensaje, debido a las propiedades cuánticas, el contenido cuando Bob lo lea

cambiará.

```
1 Eva_Base=randint(2, size=n)
2 mensaje_interceptado_por_Eva=measure_message(Mensaje_inicial_para_Key, Eva_Base)
```

Bob define su propia base y mide el mensaje:

```
1 Bob_Base=randint(2, size=n) resultado_Bob=measure_message(Mensaje_inicial_para_Key,
    Bob_Base) print('Bases')
2 print('Alice_Base: '+str(Alice_Base))
3 print('Eva_Base: '+str(Eva_Base))
4 print('Bob_Base: '+str(Bob_Base))
5
6 Bases
7 Alice_Base: [0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0]
8 Eva_Base:   [1 1 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0]
9 Bob_Base:   [0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1 0 1 0]
```

Con ambas bases (Alice y Bob) la función *remove_no_coincidencias* (*Base_Alice*, *Base_Bob*, *Message*) se utiliza para determinar el arreglo de bits cuya coincidencia en las bases es mutua:

```
1 Bob_Llave=list(map(int, remove_no_coincidencias(Alice_Base, Bob_Base, resultado_Bob)))
2 Bob_Llave_str=''.join(str(bit) for bit in Bob_Llave) Alice_Llave=list(map(int,
    remove_no_coincidencias(Alice_Base, Bob_Base, Alice_Bits)))
3 Alice_Llave_str=''.join(str(bit) for bit in Alice_Llave)
4 print(    Llave_Alice_con_intercepcion    : '+Alice_Llave_str)
5 print(    Llave_Bob_con_intercepcion     : '+Bob_Llave_str)
6
7 Llave_Alice_con_intercepcion: 11101001010001101110
8 Llave_Bob_con_intercepcion:  01111011100111110110
```

Se puede notar que las llaves no coinciden, porque Eve interfiere con la comunicación al realizar una medición. Esto tiene como consecuencia que, al cifrar el mensaje, al no tener la misma llave, no se pueda descifrar con éxito.

Para comprobar cómo se da esta situación:

```
1 Mensaje_sin_encriptar=[1,2,3,2,2,1]
2 prefix=2
3 Mensaje_binario_sin_encriptar=''.join([convertir_a_binario(x,prefix) for x in
    Mensaje_si
4 Mensaje_cifrado=encriptar_mensaje(Alice_Llave_str, Mensaje_binario_sin_encriptar)
```

Alice envía el siguiente mensaje cifrado 1 2 3 2 2 1 en forma binaria (0b011011101001) usando la llave obtenida (interceptada por Eve):

```
1 print(Mensaje\_cifrado.hex())
2 #generando la salida
3
4 c00d63ad44c4df7e0668b28f554060337b5afdf592f01cd6 ff73dc8597139496
```

Bob recibe este mensaje y utiliza la llave obtenida con el protocolo de comunicación cuántica para descifrar este mensaje. Su llave es diferente a la de Alice debido a la interferencia de Eve:

```
1 mensaje_cifrado_recibido_por_Bob=Mensaje_cifrado
2 try:
3     Mensaje_Descifrado_por_Bob=desencriptar_mensaje(Bob_Llave_str,
    mensaje_cifrado_recibi
4     print('Mensaje descifrado por Bob con su llave: '+Mensaje_Descifrado_por_Bob)
5     print(Mensaje_Descifrado_por_Bob)
6     mensaje_final=convertir_de_binario(Mensaje_Descifrado_por_Bob,2)
7     print('')
8     print('equivale a: '+str(mensaje_final))
9 except:
10    print('ERROR. Llave usada no es correcta.')
```

```

11 print('POSIBLE PRESENCIA DE UN ESPIA')
12 print(' Llave: '+Bob_Llave_str)
13
14 ERROR. Llave usada no es correcta.
15 POSIBLE PRESENCIA DE UN ESPIA
16 Llave: 01111011100111110110

```

Se puede notar que no es posible descifrar el mensaje ya que la llave obtenida por Bob no es correcta, y es diferente a la de Alice debido a la interferencia de Eve. Por este motivo, es válido sospechar la presencia de un espía ya que las llaves distribuidas no coinciden.

Veamos qué sucede al usar la llave de Alice:

```

1 Bob_Llave_str=Alice_Llave_str
2 try:
3     Mensaje_Descifrado_por_Bob=desencriptar_mensaje(Bob_Llave_str,
4     mensaje_cifrado_recibi
5     print('Mensaje descifrado por Bob si hubiera coincidido con la llave de Alice: '
6     mensaje_final=convertir_de_binario(Mensaje_Descifrado_por_Bob,2)
7     print('')
8     print('equivale a: '+str(mensaje_final))
9 except:
10 print('ERROR. Llave usada no es correcta. ')
11 print(' Llave: '+Bob_Llave_str)

```

Mensaje descifrado por Bob si hubiera coincidido con la llave de Alice: 011011101001 equivale a: [1,2,3,2,2,1].

Se concluye entonces que realmente existe la presencia de un espía en el canal que afecta la distribución de llaves cuánticas y hace que Alice y Bob obtengan llaves diferentes.

En esta situación, Alice y Bob deben sospechar de la presencia de un espía y tomar medidas en base a esa sospecha. Es aconsejable no comunicar en estas condiciones.

Se ha comprobado que la presencia de espías afecta la distribución de llaves entre Alice y Bob. Si no son idénticos, existe la posibilidad de que haya un espía en la comunicación. Esta característica de poder verificar si hay un espía en el canal es una de las ventajas de utilizar QKD, frente al paradigma clásico, que es mucho más complejo para detectar un espía.

5. Conclusiones. - La computación cuántica aún se encuentra en sus primeras etapas y construir un QC funcional y eficiente con suficientes qubits llevará años.

El desarrollo de la criptografía poscuántica es crucial para mitigar los riesgos de ciberseguridad que plantea la computación cuántica. La criptografía poscuántica se refiere a algoritmos que son resistentes a los ataques de los QC. No sólo mejora las capacidades de búsqueda en BDs, sino que también aborda problemas de optimización en diversos dominios comerciales, como análisis de datos, logística e investigación médica.

Se ha podido implementar QKD utilizando circuitos cuánticos con la biblioteca Qiskit Python. Se verifica la ocurrencia de dos situaciones:

- Generación de una llave cuántica entre dos interlocutores sin la presencia de un espía: Se obtuvo con éxito una llave compartida para Bob y Alice, el mensaje pudo cifrarse con AES utilizando la llave cuántica obtenida. Posteriormente, el descifrado se llevó a cabo con éxito utilizando la llave obtenida por Bob. El objetivo de comunicación se cumple en este escenario.
- Generación de llave cuántica entre dos interlocutores con presencia de un espía: Se comprueba que es posible detectar espías en el canal mediante QKD ya que la acción de espiar implica tomar una medición, que modifica el contenido del mensaje recibido por el receptor Bob. Esto ocurre principalmente por el principio

de superposición de estados. Esta situación se pudo verificar ya que Bob obtuvo una llave diferente a la de Alice debido a la interferencia de Eve. Debido a que las llaves obtenidas son diferentes, Alice y Bob pueden sospechar que hay un espía en el canal.

Mientras más larga sea la llave generada, mayores serán las posibilidades de detectar eficazmente un espía en la red.

Descubrir mejores algoritmos para trabajar con computación cuántica sigue siendo un área de investigación abierta. Finalmente, este estudio ofrece una visión general de la ciberseguridad cuántica y estudios en computación cuántica con sus posibles aplicaciones.

Referencias

- [1] R. P. Feynman (1982). Simulating physics with computers. *Int. J. Theor. Phys.* 21, 467–488
- [2] J.D. Whitfield, J. Yang, W. Wang, J.T. Heath and B. Harrison. Quantum computing 2022.
- [3] I. Pogorelov, T. Feldker, Ch.D. Marciniak, L. Postler, G. Jacob, O. Kriegelsteiner, V. Podlesnic, M. Meth, V. Negnevitsky, M. Stadler, B. Höfer, C. Wächter, K. Lakhmanskii, R. Blatt, P. Schindler and T. Monz. Compact Ion-Trap Quantum Computing Demonstrator. *PRX Quantum*, vol. 2, 2, pp. 020343, 2021. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PRXQuantum.2.020343>
- [4] S. Kwon, A. Tomonaga, G. L. Bhai, S. J. Devitt and J.-S. Tsai. Gate-based superconducting quantum computing. *J. Appl. Phys.* 129(4): 041102. 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0029735>
- [5] J. S. Lee, N. Farmakidis, C. D. Wright and H. Bhaskaran. Polarization-selective reconfigurability in hybridized-active-dielectric nanowires. *Science Advances*, 8eabn9459. 2022. DOI:10.1126/sciadv.abn9459
- [6] J. Wurtz et al. Aquila: Quera's 256-qubit neutral-atom quantum computer. 2023. <https://arxiv.org/abs/2306.11727>.
- [7] M. Kornjača, R. Samajdar, T. Macrì et al. Trimer quantum spin liquid in a honeycomb array of Rydberg atoms. *Commun Phys* 6, 358 (2023). <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01470-z>
- [8] S. H. Adachi and M. P. Henderson. Application of Quantum Annealing to Training of Deep Neural Networks. 2015. <https://arxiv.org/abs/1510.06356>
- [9] Y. Cao, J. Romero, J.P. Olson, M. Degroote, P.D. Johnson, M. Mária, I. D. Kivlichan, T. Menke, B. Peropadre, N.P.D. Sawaya, S. Sim, L. Veis and A. Aspuru-Guzik. Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing. *Chemical Reviews*, Vol. 119, No. 19, pp. 10856–10915, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00803>
- [10] Ma, M. Govoni and G. Galli. Quantum simulations of materials on near-term quantum computers. *npj Comput Mater* 6, 85, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00353-z>
- [11] Sivarajah. What is Quantum Control Theory? *AZoQuantum*. 2022. <https://www.azoquantum.com/Article.aspx?ArticleID=335>
- [12] R. Bassoli, H. Boche, C. Deppe, R. Ferrara, F. H. P. Fitzek, G. Janssen and S. Saeedinaeini. Quantum Communication Networks. *Foundations in Signal Processing, Communications and Networking*. 2021. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62938-0>
- [13] Y.L. Len, T. Gefen, A. Retzker et al. Quantum metrology with imperfect measurements. *Nat Commun* 13, 6971. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33563-8>
- [14] A. Díaz, M. Rodríguez and M. Piattini. Towards a set of metrics for hybrid (quantum/classical) systems maintainability. *Journal of Universal Computer Science*, vol. 30, no. 1, pp. 25-48, 2024.
- [15] S. N., Singh, H. and N.A.U. An extensive review on quantum computers. *Advances in Engineering Software*, 174, 103337. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103337>
- [16] J. Preskill, J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. 2018. doi:10.22331/q-2018-08-06-79

- [17] M. Brooks. Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers. *Nature*, 574(7776), 19-21. 2020. doi:10.1038/d41586-019-02936-3
- [18] C.H. Bennett. Logical reversibility of computation. *IBM Journal of Research and Development*, 17(6), 525-532. 1973. doi:10.1147/rd.176.0525
- [19] R. Raussendorf. Key ideas in quantum error correction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370 (1975), 4541-4565. 2012. doi:10.1098/rsta.2011.0494
- [20] J.L. Park. The concept of transition in quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 1, 23-33. 1970.
- [21] P. Benioff. The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *Journal of Statistical Physics*, 22(5), 563-591. 1980. doi:10.1007/BF01011339
- [22] T. Toffoli. Reversible computing. In J. de Bakker J. van Leeuwen (Eds.), *Automata, languages and programming* (pp. 632–644). 1980. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [23] P.W. Shor. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory, 52(4), R2493-R2496. 1995. doi:10.1103/PhysRevA.52.R2493
- [24] W. Pfaff, B.J. Hensen, H. Bernien, S.B. van Dam, M.S. Blok, T.H. Taminiu, R. Hanson. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits. *Science*, 345(6196), 532–535. 2014. doi:10.1126/science.1253512
- [25] K.K. Ko and E.S. Jung. Development of cybersecurity technology and algorithm based on quantum computing. *Applied Sciences*, 11(19). 2021. doi:10.3390/app11199085
- [26] X.L. Tianqi Zhou and J. Shen. Quantum cryptography for the future internet and the security analysis. *Security and Communication Networks*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8214619>
- [27] P.C. Uttam Ghosh and D. Das. A comprehensive tutorial on cybersecurity in quantum computing paradigm. *TechRxiv*. 2023. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.22277251.v1>
- [28] D.J. Bernstein, N. Heninger, P. Lou and L. Valenta. Post-quantum rsa. *Cryptology ePrint Archive*, Paper 2017/351. 2017. <https://eprint.iacr.org/2017/351>

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

MS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JPV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

FCA ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

LD ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Implementación Cuántica de un Algoritmo Genético

Quantum Implementation of a Genetic Algorithm

Implementação quântica de um algoritmo genético

Mauricio Solar ^{1,(*)}, Vicente Figueroa ², Francisco Manriquez ³,

Francisco Pizarro ⁴, Liuba Dombrovskaia ⁵

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Resumen. - Este trabajo proporciona una visión generalizada del estado actual de los algoritmos genéticos cuánticos (QGAs), mostrando los avances realizados en esta área de investigación los últimos 24 años. Los QGAs combinan conceptos de la computación cuántica y los algoritmos genéticos clásicos (CGAs), lo que les permite abordar problemas complejos de optimización y búsqueda de manera eficiente. Se presentan los principales hallazgos y contribuciones de estos algoritmos cuánticos destacando las tendencias y los enfoques más prometedores, así como los desafíos y limitaciones que deben superarse. Se presentan nuevos enfoques y técnicas de implementación de QGAs, incluyendo operadores genéticos cuánticos y esquemas de codificación eficientes que contribuyen a mejorar el rendimiento y la convergencia de los algoritmos. Se comparan los QGAs y otros enfoques similares, como los CGAs y los algoritmos cuánticos puros, destacando las ventajas y desventajas relativas de los QGAs en comparación a sus versiones clásicas. Se muestra también una implementación de QGA utilizando la biblioteca Qiskit. Se presentan la selección de los métodos usados para la generación de la población inicial, el cruzamiento y la mutación de las distintas poblaciones de los circuitos cuánticos simulados en los experimentos realizados, ejemplificando las ventajas significativas que estos pueden traer en comparación con los enfoques clásicos.

Palabras clave: Algoritmo Genético Cuántico; Computación Cuántica; Algoritmo Genético Cuántico Híbrido.

(*) Autor de correspondencia

¹ Académico, Universidad Técnica Federico Santa María, mauricio.solar@usm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4433-4622>

² Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, vicente.figueroa@usm.cl,

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-2391-8223>

³ Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, francisco.manriquezn@usm.cl,

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-7045-4258>

⁴ Estudiante postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María, francisco.pizarroj@usm.cl,

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-6317-6414>

⁵ Académica, Universidad Técnica Federico Santa María, liuba@inf.utfsm.cl, ORCID iD: <https://orcid.org/00000001-6572-9765>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 220-237

<https://doi.org/10.36561/ING.27.14>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Summary. - This work provides a generalized view of the current state of quantum genetic algorithms (QGAs), showing the advances made in this research field over the last 24 years. QGAs combine concepts from quantum computing and classical genetic algorithms (CGAs), allowing them to address complex search and optimization problems efficiently. The main findings and contributions of these quantum algorithms are presented, highlighting the most promising trends and approaches, as well as the challenges and limitations that need to be overcome. New approaches and implementation techniques for QGAs are presented, including quantum genetic operators and efficient coding schemes that contribute to improving the performance and convergence of the algorithms. QGAs and other similar approaches, such as CGAs and pure quantum algorithms, are compared, highlighting the relative advantages and disadvantages of QGAs compared to their classical versions. An implementation of QGA using the Qiskit library is also shown. The selection of the methods used for the generation of the initial population, the crossing and the mutation of the different populations of the quantum circuits simulated in the experiments carried out are presented, exemplifying the significant advantages that these can bring in comparison with classical approaches.

Keywords: Quantum Genetic Algorithm; Quantum Computing; Hybrid Quantum Genetic Algorithm.

Resumo. - Este trabalho fornece uma visão generalizada do estado atual dos algoritmos genéticos quânticos (QGAs), mostrando os avanços feitos neste campo de pesquisa nos últimos 24 anos. Os QGAs combinam conceitos da computação quântica e algoritmos genéticos clássicos (CGAs), permitindo que eles abordem problemas complexos de busca e otimização de forma eficiente. As principais descobertas e contribuições desses algoritmos quânticos são apresentadas, destacando as tendências e abordagens mais promissoras, bem como os desafios e limitações que precisam ser superados. Novas abordagens e técnicas de implementação para QGAs são apresentadas, incluindo operadores genéticos quânticos e esquemas de codificação eficientes que contribuem para melhorar o desempenho e a convergência dos algoritmos. QGAs e outras abordagens semelhantes, como CGAs e algoritmos quânticos puros, são comparados, destacando as vantagens e desvantagens relativas dos QGAs em comparação com suas versões clássicas. Uma implementação de QGA usando a biblioteca Qiskit também é mostrada. São apresentadas a seleção dos métodos utilizados para a geração da população inicial, o cruzamento e a mutação das diferentes populações dos circuitos quânticos simulados nos experimentos realizados, exemplificando as vantagens significativas que estes podem trazer em comparação com abordagens clássicas.

Palavras-chave: Algoritmo Genético Quântico; Computação Quântica; Algoritmo Genético Quântico Híbrido.

1. Introducción. - La computación cuántica y la programación genética son dos áreas de investigación fascinantes que han mostrado un gran potencial para transformar la forma en que se abordan los desafíos computacionales complejos. En (1) se exploran las aplicaciones de la programación genética en el campo de la computación cuántica desde la cual ha habido un crecimiento significativo en la investigación y los avances tecnológicos.

En este artículo se explora la resolución de problemas de búsqueda (2), la optimización cuántica, como también los nuevos enfoques que han mejorado la capacidad de encontrar soluciones óptimas para problemas complejos en ámbitos como la optimización de parámetros cuánticos y la exploración de espacios de soluciones cuánticas (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9). En estos trabajos se explora cómo la programación genética y los algoritmos genéticos (GA) han sido utilizados en la optimización de sistemas cuánticos, como la calibración de qubits y la reducción de errores en sistemas de computación cuántica, que son fundamentales para superar los desafíos actuales en la implementación práctica de la computación cuántica.

En este artículo se muestra los avances en el campo de la programación genética aplicada a la computación cuántica. Los avances en la optimización de circuitos, diseño de algoritmos, resolución de problemas, simulación, seguridad y optimización de sistemas cuánticos, han ampliado el espectro de aplicaciones prácticas y están acelerando el desarrollo de la computación cuántica. Entre las aplicaciones se encuentran imágenes médicas (10), visualización de datos (11), comunicaciones (14; 12; 13), arquitectura (15; 16), energía eólica (17), gestión de energía (18), control (19), diagnóstico de fallas (20), uso de criptografía cuántica en imágenes (21). La evolución de programas cuánticos ha llevado al desarrollo de algoritmos de criptografía más robustos y resistentes, impulsando la seguridad en el ámbito cuántico. En la sección 3 se presenta el estado del arte en esta materia.

A partir de los pseudo-códigos y diagramas presentados en (6), (8) y (23), se extrapola una versión con el funcionamiento de estos en las librerías de Qiskit, las cuales se implementan. En la sección 4 se muestra esta implementación usando Qiskit de un Algoritmo Genético Cuántico (QGA) basado en un Algoritmo Genético Cuántico Híbrido (HQGA) presentado en (8) y se presentan los métodos que permiten simular un entorno cuántico para el desarrollo de los mismos circuitos utilizando Python.

2. Definición de un Algoritmo Genético: Población, Cruzamiento, Mutación. - Una de las ramas que más prometen en la computación cuántica es la aplicación de algoritmos genéticos a estos mismos. Los GA son técnicas de optimización inspiradas en los principios de la evolución biológica, que han demostrado su eficacia en la resolución de problemas complejos en una amplia gama de áreas, desde la planificación de rutas hasta el diseño de estructuras.

La combinación de GA con computación cuántica, a través de herramientas como Qiskit, permite aprovechar las ventajas de ambas disciplinas. Los QGA tienen el potencial de superar las limitaciones de los CGA, ya que pueden explorar simultáneamente múltiples soluciones en paralelo gracias a los fenómenos cuánticos como la superposición y la interferencia cuántica, al menos para un buen número de casos específicos.

Los QGAs se basan en la codificación de qubits para el almacenamiento de la información. Para esto se puede ocupar cualquier representación conocida basada en bits, ocupando un qubit por cada bit, pero pueden surgir limitaciones evidentes. Si se quiere ocupar la representación de punto flotante de 32 bits, se agotan fácilmente los recursos disponibles, ya que actualmente no se logra soportar una gran cantidad de qubits en un computador cuántico. En un QGA, se codifica un cromosoma como m secuencias de k qubits, que representan m variables codificadas en k bits según la ecuación

1.

$$q_j^t = [\psi_{11}^t | \psi_{12}^t | \dots | \psi_{1k}^t | \psi_{21}^t | \psi_{22}^t | \dots | \psi_{mk}^t] \quad (1)$$

donde q_j^t representa el cromosoma j de la t -ésima generación. Para la codificación inicial, se codifican los (α, β) de cada ψ como $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$ (compuerta de Hadamard), de manera que, en un inicio, la probabilidad de cualquier estado del cromosoma sea el mismo.

2.1. Rotación. - En un algoritmo genético, es esencial actualizar los cromosomas de manera que se acerquen al valor esperado. En un QGA, las compuertas de rotación son las que se encargan de esta función. Se define la compuerta de rotación $U(\theta_i)$, aplicada a cada par (α_i, β_i) según la ecuación 2.

$$U(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Se puede notar que $U(\theta_i)$ es equivalente a una rotación en el eje Y en la esfera de Bloch. El ángulo θ_i es fijo y se define manualmente, según la estrategia de ajuste, pero normalmente toma valores entre 0.1π y 0.005π . El algoritmo de rotación depende de tablas de valores fijos, que determinan la dirección de la rotación a aplicar según el fitness del cromosoma actual en relación al mejor. Dependiendo de la tabla afecta a la rapidez de convergencia del algoritmo, por lo que se plantea el método de rotación auto-adaptada. Este último se basa en ir reduciendo el ángulo de rotación según el número de la actual iteración generacional, sin perder la dirección hacia el mejor cromosoma encontrado, según la ecuación 3.

$$\theta_i = \theta_{max} - \left(\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{it_{max}} \right) iter \quad (3)$$

donde θ_{max} y θ_{min} son valores fijos, it_{max} es la iteración maximal e $iter$ es la generación actual. Se puede notar que los valores de θ_i disminuyen según avanzan las iteraciones, lo que permite ir reduciendo la función de ajuste (Fitness).

2.2. Mutación. - La mutación permite que el algoritmo desarrolle nuevas posibilidades de valores, desviándose del resto de la población, lo que puede ayudar a evitar caer en óptimos locales. La compuerta de mutación invierte los valores de (α, β) en (β, α) , lo que equivale a una compuerta NOT (o bien, compuerta X).

2.3. Cruzamiento. - Teóricamente, no se puede hacer un equivalente del cruzamiento en su versión cuántica. Aun así, se puede ocupar en algoritmos basados en computación cuántica. Una forma de hacer cruzamiento es seleccionar una posición en 2 de los cromosomas e intercambiar las secciones posteriores a ese punto.

2.4. Diagrama del QGA. - De la literatura se selecciona la arquitectura híbrida HQGA de (8), para implementar elementos de la computación cuántica como elementos de la computación clásica. Específicamente, se orienta la arquitectura para la resolución del conocido problema de la mochila (*Knapsack Problem*), siendo los valores asociados a cada objeto generados aleatoriamente con una distribución uniforme entre 1 y 10. El diagrama de flujo de la Figura 1 describe el funcionamiento del mismo.

3. Estado del Arte. -

Metodología. - Para buscar trabajos relacionados con QGA en la literatura se usan distintas técnicas, siendo principalmente *Snow Ball* la más común. Se consideraron los trabajos que utilizan directamente como referencia el survey en (1), y una vez obtenidos los trabajos que lo citan se filtra la mayoría para reducir el número de trabajos que no se relacionan directamente con mejoras a los algoritmos genéticos cuánticos. Los trabajos de interés extraídos con este método son (24), (25), (22), (5), (1) y (26).

Para recabar más información se utiliza la búsqueda por palabras claves, tales como “*quantum genetic algorithm*” o “*quantum genetic programming*”, entre otros. Mediante esta técnica se encuentran trabajos donde se usa QGA que aportan a problemas en diversas áreas: (19), (16), (15), (7), (12), (2), (21), (27), (17), (28), (10), (4), (3), (29), (23), (6), (30), (31), (32), y (33).

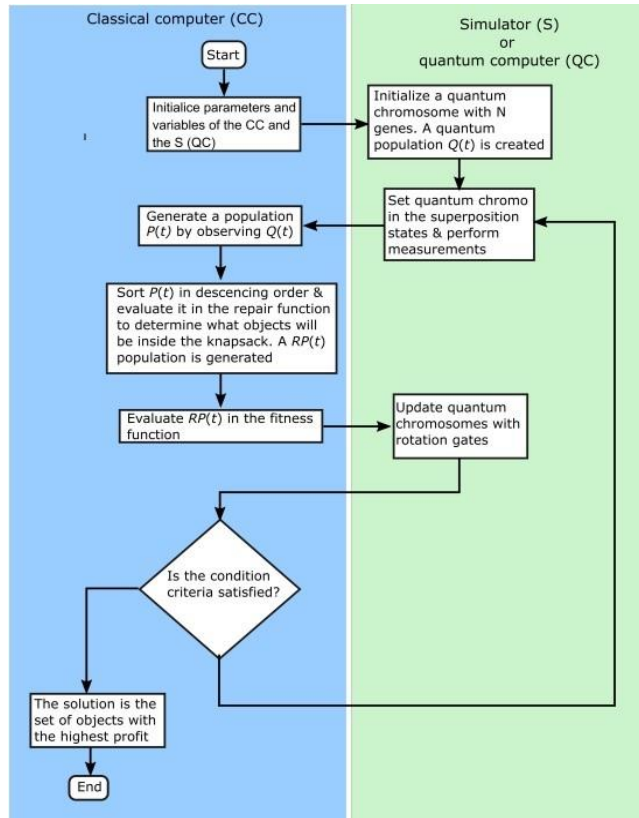


Figura 1. Diagrama de flujo de HQGA.

3.1. Descripción de trabajos con QGA. - En esta sección se presenta una breve y resumida descripción de la cobertura y las intenciones de los trabajos publicados, junto con las especificaciones del problema cuántico que aborda cada uno.

En el área de control se encuentra (19) que combina el modelo de nube con el QGA, aprovechando su eficiencia en cálculos complejos para aproximar los órdenes fraccionarios que optimizan el control de un vehículo autónomo submarino (AUV).

También en el área de control en (12) se utiliza una variante de QGA para resolver el problema de optimización, la cual utiliza el gradiente de la función para la rotación cuántica de los qubits, mejorando así su velocidad de convergencia.

En arquitectura se muestra en (16) como se optimizan las dimensiones y materiales de ventanas, techos y murallas de un edificio para disminuir su costo energético. Se utiliza la rotación cuántica como método de evolución genética de las soluciones, aprovechando la capacidad de almacenar información continua de los qubits. En el mismo ámbito, en (15) se aprovecha la capacidad del algoritmo cuántico para hacer cálculos multidimensionales de manera eficiente, para obtener un modelo óptimo al autocalibrar un sistema de medición por medio de imágenes.

En (17) se utiliza un QGA para minimizar costos en la producción de energía eólica. Se utilizan reglas simples sobre la rotación cuántica y una perturbación adicional para evitar que el algoritmo se estanque en un óptimo local. Luego, se compara contra otros algoritmos y se utiliza en un entorno real. En el mismo ámbito energético, en (18) se utiliza un QGA multi-objetivo mejorado para resolver los problemas de contaminación ambiental causados por los automóviles eléctricos en las autopistas de alta velocidad. Se propone una tasa de autoconsumo de energías limpias y estrategias de gestión de la eficiencia energética. Mejora la tasa de convergencia, aumenta la diversidad de la población, disminuye los costos de energía y las emisiones de carbono.

En (20) se propone un método de diagnóstico de fallas en maquinaria rotacional, basado en la máquina de soporte vectorial (SVM) optimizada con QGA. El método se aplica a la detección de fallos en maquinaria rotativa sobre un eje, obteniendo una mayor precisión que los tradicionales SVM y GA (i.e. CGA).

En búsqueda textual en (2) se propone una variante de los QGA (MTSQIGA), donde se calcula el ángulo para la compuerta de rotación comúnmente usada a partir de los resultados de la iteración, en caso de no cumplirse el criterio de longitud impuesto.

En (21) se utiliza un QGA para el proceso de encriptación y desencriptación de imágenes, a partir de la alteración al ángulo de rotación de la compuerta cuántica según reglas definidas en matrices de cada iteración.

También en el ámbito de las imágenes, en (10) se realiza una comparación entre CGA, QGA y PSO (*Particle Swarm Optimization*) para el procesamiento de imágenes médicas. Para QGA se utiliza un algoritmo de rotación simple. Se concluye que PSO obtiene mejores resultados y además converge más rápido a la solución. En segundo lugar, se encuentra QGA, y en último lugar queda CGA.

Una aplicación en comunicaciones se muestra en (13), donde se obtuvieron criterios, métricas y resultados experimentales, en los que se demuestra que el QGA es mejor que el CGA. Se proporciona una discusión detallada sobre la función objetivo, la convergencia al óptimo global y la necesidad de mejorar las soluciones obtenidas en una aplicación de comunicaciones. Similar al trabajo (13), en (14) se presenta un QGA que permite resolver un problema de datos ponderados en una cavidad con un sensor de 3 canales que detecta el ruido debido al impacto de partículas en suspensión. Los resultados se obtienen con una alta capacidad de procesamiento de datos, utilizando una métrica de varianza para la señal de entrada.

En los problemas de optimización aparecen una serie de trabajos.

En (3) se prueba y muestra la efectividad de usar QGA en problemas de optimización combinatoriales, específicamente el problema de la mochila, demostrando cómo este algoritmo logra un rendimiento superior a muchos otros GAs. (3) demuestra y simula el rendimiento de un QGA asistido. Se realiza la prueba haciendo uso de optimización binaria cuadrática sin restricciones (QUBO) durante 100 iteraciones y se compara con su contraparte clásica durante 2000 iteraciones, demostrando de esa manera que el algoritmo cuántico converge a la solución óptima mucho más rápido que el clásico.

(6) busca acelerar el proceso evolutivo y la probabilidad de encontrar una solución óptima en un QGA, determinando el ángulo de rotación, la capacidad adaptativa del mismo y agregando operaciones cuánticas de mutación, logrando así que la eficiencia del algoritmo propuesto sea mayor a un CGA tradicional para resolver problemas de optimización.

En (5) se realizan varias pruebas y se muestran resultados de aplicar algoritmos genéticos en diversos problemas de optimización en computación cuántica. Principalmente se estudia la desigualdad de Bell (Bell-CHSH) y la medida del entrelazamiento entre qubits.

En (7) se propone una implementación de QGA en problemas RCPSP (*Resource-Constrained Project-Scheduling Problem*). Para ello se utiliza cruzamiento cuántico (*quantum crossover*) y mutación cuántica, junto a operaciones de rotación. Además, se estudia su complejidad y se compara su velocidad y eficacia contra algoritmos clásicos encontrados en la literatura.

Ya en el ámbito mismo de los QGA se encuentra (27) que utiliza una mejora de un algoritmo GRS (*Greedy Random Sampling*) y un nuevo GA para solucionar el problema de compilación de circuitos cuánticos. Se concluye que GA es mejor que GRS para instancias de grandes proporciones.

En (28) se realiza una comparación sobre la versión clásica de un algoritmo genético (CGA) y su versión cuántica (QGA), utilizando el problema de la mochila para resultados experimentales. Los resultados muestran que QGA llega a mejores resultados cuando el tamaño del problema es mucho mayor. Además, se plantea una complejidad $O(N)$ para QGA y $O(N^2)$ para CGA.

En (25) se propone una versión mejorada del *Quantum Genetic Optimization Algorithm* (QGOA) con el objetivo de acelerar los distintos procesos de un GA. Esta propuesta requiere un número menor de operaciones para identificar la función de ajuste para una sub-población en cada generación, reemplazando los procesos tradicionales por un único proceso cuántico, reduciendo la complejidad a $O(1)$ en términos de llamadas en el proceso de selección.

Está demostrado que las puertas “adicionadoras” no están permitidas en la computación cuántica, al menos no tal y como se conocen en su versión clásica. En (25) se analizan propuestas tecnológicas para aproximar de forma cuántica las puertas mencionadas, y optimizar las mismas mediante el uso de GAs, llegando a nuevos niveles en términos de eficiencia y confiabilidad.

En (34) se muestra un algoritmo genético celular multi-objetivo con optimización multi-objetivo y un QGA para crear autómatas celulares. Se proporciona un modelado matemático y computacional discreto para el proceso con dos estados posibles. Se diferencia de otros algoritmos meta-heurísticos en que mejora el rendimiento y la próxima generación depende de la célula y su entorno.

En (35) se presenta un GA para la preparación de estados (GASP por sus siglas en inglés) que genera circuitos cuánticos de profundidad relativamente baja para inicializar un computador cuántico en un estado cuántico específico. El método utiliza un conjunto básico de puertas R_x, R_y, R_z y CNOT y un GA para generar sistemáticamente circuitos para sintetizar el estado objetivo con la fidelidad requerida. GASP puede producir circuitos más eficientes de una precisión determinada con menor profundidad y menor número de puertas que otros métodos.

En (1) se describe cómo simular un computador cuántico para determinar la idoneidad de un algoritmo cuántico en hardware clásico. Se describen tres enfoques diferentes de programación genética para impulsar el simulador para desarrollar nuevos algoritmos cuánticos. Los enfoques son la programación genética estándar basada en árboles, la programación genética del genoma lineal basada en pilas y la programación genética del genoma lineal sin pilas. Se prueban las técnicas en cuatro problemas diferentes: el problema de promesa temprana de 2 bits, el problema de escalamiento mayoritario, el problema de búsqueda en BDs de 4 elementos y el problema and/or de 2 bits. Para tres de estos problemas, los algoritmos descubiertos automáticamente son más eficientes que los algoritmos clásicos para los mismos problemas.

En (26) se propone una nueva representación de un conjunto de operadores genéticos con el objetivo de optimizar distintos circuitos cuánticos mediante programación y GAs, heredando la representación y propiedades de ambos. Considerando que los circuitos cuánticos son una colección de puertas, cada un operando en varias categorías de qubits, con sus respectivos parámetros, es que la representación propuesta puede buscar estos mismos de forma satisfactoria. En particular, se aplican estos circuitos en el problema de la producción del entrelazamiento entre qubits.

En el contexto de la computación cuántica evolutiva, en (29) se propone la implementación cuántica de uno de los procesos en los algoritmos evolutivos: el entrecruzamiento de los cromosomas, dando a entender que este no ha sido implementado de esta forma antes, sino que únicamente ha sido usado clásicamente. Además, propone que el entrecruzamiento se realice de forma paralela entre generaciones, logrando en resumen una aceleración del orden cuadrático por sobre su contraparte clásica.

En (23) se presenta una revisión de distintos GAs implementados en computación cuántica, orientada específicamente a carreras relacionadas con ciencias de la computación, obviando todos los aspectos físicos relacionados con la computación cuántica, con la intención de difundir estos mismos. Se analizan las ventajas y desventajas de cada uno de estos en comparación a sus hermanos clásicos.

En (22) se abarca la teoría y práctica de las bases de los algoritmos evolutivos cuánticos. En un principio se da una introducción a la cuántica (computacional y física), para más adelante hablar sobre los algoritmos evolutivos cuánticos, analizando los principales problemas que se tienen con la implementación de estos en diversos problemas, además de evaluar y mostrar el desempeño de alguno de estos algoritmos.

En (29) se presenta una aproximación simple a los QGAs, analizando los beneficios y las desventajas de estos al aplicar la paralelización cuántica a los CGA.

En (24) pretende lograr una optimización en los algoritmos de comunicación de sistemas cuánticos distribuidos, compuestos por unos cuantos circuitos cuánticos de baja capacidad. Comparando los resultados obtenidos de este algoritmo con otro algoritmo propuesto en un trabajo anterior, esta optimización logra una mejora notable en velocidad.

En (32) se hace uso de *reverse quantum annealing*, una variante de algoritmo de evolución cuántica, que hace uso de búsquedas semi-locales o semi-no locales desde un estado inicial. Este algoritmo permite que los GAs usen fluctuaciones cuánticas para las mutaciones en la evolución de los cromosomas, llamado *Quantum-Assisted Genetic Algorithms* (QAGAs). Este algoritmo es capaz de encontrar buenas soluciones del óptimo global a diferencia del *standard quantum annealing*.

3.2. Análisis Comparativo. - La Tabla I muestra las ventajas (columna “Ventaja Comparativa”) de la contribución realizada (segunda columna) por el trabajo de la referencia en la columna “Ref” en el ámbito indicado en la cuarta columna de la tabla.

Los artículos presentados abarcan distintos ámbitos tecnológicos, desde la medicina hasta la arquitectura. Por lo tanto, se considerará para la comparación el aporte o utilización que se le da al algoritmo cuántico y sus resultados comparativos. Los artículos (16) y (15) no se incluyen en la Tabla I porque ambos presentan un algoritmo simple para la convergencia.

La Tabla II muestra las ventajas (columna “Ventaja Comparativa”) de la contribución realizada (segunda columna) por el trabajo de la referencia en la columna “Ref” en el ámbito de los problemas de optimización.

3.3. Discusión bibliográfica. - En general, se espera que los QGA tengan un rendimiento mayor a los algoritmos cuánticos y a los CGA, debido a su capacidad de encontrar óptimos locales en pocas iteraciones. Esto al menos, para la mayoría de los problemas que pueden ser tratados cuánticamente.

De la literatura analizada acerca del problema y su contexto se ha logrado profundizar en la extensa aplicación que puede tener la combinación de algoritmos clásicos y cuánticos, permitiendo sacar lo mejor de cada uno para así, no solo sobrepasar a la parte clásica, sino que también a la parte cuántica, aunque esto no se cumple para una gran cantidad de casos de interés.

Muchos de los trabajos de la literatura analizados se centran en estudiar la aplicación de QGA en distintas áreas más que en la investigación de como optimizar el método para que escape de los óptimos locales o tenga una convergencia más rápida.

Por otra parte, existen 3 trabajos que buscan hacer cuántica la parte “clásica” del QGA, implementando en el mismo mutaciones y cruzamientos cuánticos.

Se debe destacar el trabajo de (1) que presenta hasta ese momento los CGA que se implementaron sobre circuitos cuánticos, conociéndose éstos como QGA.

Como parte de los resultados más esperanzadores en esta área se tienen (6), (29) y (32).

Ref	Área	Contribución realizada	Ventaja Comparativa
(19)	Control	Extrapolación de los GA aprovechando su paralelismo y los aplica en nuevo ámbito	Logra salir medianamente del problema de los óptimos locales de los CGA
(12)	Control	Aplica reglas del fitness para ajustar ángulo de convergencia en la rotación cuántica	Realiza análisis numérico y de sensibilidad. Extiende solución a distintos contextos
(2)	Búsqueda	Propone variante de QGA con parámetros del contexto para converger eficientemente	Realiza extenso desarrollo del funcionamiento del algoritmo. Se compara con otros en el estado del arte
(21)	Encriptación	Utiliza el algoritmo como proceso de encriptado	Uso innovador del algoritmo. Realiza análisis de seguridad
(17)	Energía	Usa perturbaciones para no caer en óptimo local	Explica paso a paso (simple) como funciona un QGA
(10)	Procesamiento de imagen	Compara los algoritmos respecto a diversas funciones de entropía	Realiza análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados

Tabla I. Contribuciones en diferentes ámbitos.

El año 2013, en (6) se sentaron las primeras bases para hacer cuántico el CGA, naciendo la duda de si se puede llevar a cuántico completamente el CGA, esperando tener en un futuro aplicar un algoritmo cuántico sobre circuitos cuánticos y no uno clásico sobre uno cuántico, tal y como se venía aplicando hace años.

El año 2014 en (29) se realizó la primera implementación cuántica al entrecruzamiento de un GA, siendo esto de total interés, dado que abre paso a un nuevo campo de estudio, permitiendo conocer cómo se comporta un “híbrido” de algoritmo clásico con cuántico.

En 2019, se publica una versión cuántica de las mutaciones clásicas de un GA (32).

4. Implementación de un Algoritmo Genético Cuántico (QGA). - El objetivo de esta sección es mostrar la implementación de un QGA utilizando Qiskit, en distintos circuitos cuánticos diseñados específicamente para esta tarea.

```

1 #!pip install qiskit pylatexenc
2 #!pip install more_itertools
3 import math
4 import numpy as np
5 from qiskit import QuantumRegister, QuantumCircuit, Aer, execute
6 from qiskit.quantum_info import Statevector
7 from qiskit.visualization import plot_histogram
8 import pylatexenc
9 import matplotlib.pyplot as plt
10 from more_itertools import locate
    
```

Se presenta a continuación la metodología usada paso a paso para diseñar y codificar los distintos elementos que componen un GA, tales como la inicialización de la población y los distintos métodos aplicados para el entrecruzamiento y la mutación de los genes en cada población.

Además, se evalúan los experimentos realizados en los circuitos cuánticos diseñados, demostrando como los QGA logran una optimización eficiente de estos mismos.

Ref	Contribución realizada	Ventaja Comparativa
(7)	Utiliza diversos métodos cuánticos para mejorar la convergencia y evitar el óptimo local	Realiza extenso análisis sobre parámetros utilizados. Se compara contra otros 23 algoritmos de la literatura
(27)	Propone nuevo GA para la compilación de hardware cuántico	Profundiza problema y solución. Buen apoyo a investigaciones futuras
(28)	Compara QGA con GA en el problema de la mochila	Analiza resultados respecto a diversos valores en los parámetros del problema
(26)	Presenta nuevo esquema de operadores genéticos para producción de algoritmos cuánticos	Se enfoca especialmente en la producción de entrelazamiento cuántico
(3)	Demuestra la efectividad de QGA para problemas de optimización combinatorios	Compara resultados de QGA con CGA en el problema de la mochila
(29)	Propone nuevo quantum crossover que explota paralelismo cuántico	Análisis teórico cuántico del procedimiento y su contraparte clásica
(23)	Plantea las bases de un real QGA para futuras investigaciones	Explica detalladamente distintos tipos de QGA desde el ámbito computacional
(6)	Propone mejoras a procesos de QGA para mejorar convergencia	Análisis comparativo de CGA y QGA mejorado
(22)	Presentan las bases de QGA y los distintos modelos	Comenta sobre las ventajas y desventajas de QGA
(24)	Plantea un GA para reducir costos en comunicación cuántica	Descripción teórica (simple) de teleportación cuántica y minimizar costos con GA
(32)	Propone QGA asistido con reverse quantum annealing	Análisis teórico del método, comparando con otros algoritmos
(5)	Usa GA para encontrar los máximos valores en la desigualdad de Bell	Compara resultados empíricos con los obtenidos analíticamente
(25)	Utiliza GA para encontrar los protocolos óptimos para una compuerta de adición	Demuestran los resultados de su implementación utilizando el simulador de IBM
(4)	Presenta un desarrollo matemático enfocado en la complejidad del algoritmo	Analiza matemáticamente como funciona un QGA y su complejidad
(30)	Propone QGA asistido con algoritmo de Grover	Compara los resultados entre QGA asistido y CGA
(31)	Presenta de manera simple funcionamiento de un QGA	Comenta ventajas de QGA y GA y dificultades de implementarlo

Tabla II. Contribuciones en el ámbito de la optimización.

4.1. Definición de la Población. - En un QGA se codifica un cromosoma como m secuencias de k qubits, que representan m variables codificadas en k bits que representan un individuo en la población. La población del QGA es inicializada de la siguiente forma:

```

1 def Init_population():
2     # Hadamard gate
3     r2=math.sqrt(2.0)

```

```

4 h=np.array([[1/r2,1/r2],[1/r2,-1/r2]])
5 # Rotation Q-gate
6 theta=0;
7 rot =np.empty([2,2])
8 # Initial popul array (individual x chromosome)
9 i=1; j=1;
10 for i in range(1,popSize):
11     for j in range(1,genomeLength):
12         theta=np.random.uniform(0,1)*90
13         theta=math.radians(theta)
14         rot[0,0]=math.cos(theta);
15         rot[0,1]=-math.sin(theta);
16         rot[1,0]=math.sin(theta);
17         rot[1,1]=math.cos(theta);
18         AlphaBeta[0]=rot[0,0]*(h[0][0]*QuBitZero[0])+rot[0,1]*(h[0][1]*QuBitZero[1])
19         AlphaBeta[1]=rot[1,0]*(h[1][0]*QuBitZero[0])+rot[1,1]*(h[1][1]*QuBitZero[1])
20         # alpha squared
21         qpv[i,j,0]=np.around(2*pow(AlphaBeta[0],2),2)
22         # beta squared
23         qpv[i,j,1]=np.around(2*pow(AlphaBeta[1],2),2)

```

4.2. Rotación. - En un QGA las compuertas de rotación son las que se encargan de realizar las rotaciones. Se aplica la compuerta de rotación $U(\theta_i)$ a cada par (α_i, β_i) según la ecuación 2. La función de ajuste (Fitness) se obtiene de la siguiente forma:

```

1 # Funcion de Ajuste
2 def fitness_function(x):
3     return sum(x)
4 def numpy_fitness_function(population):
5     return np.sum(population, axis=1)

```

4.3. Mutación. - La compuerta de mutación invierte los valores de (α, β) en (β, α) , lo que equivale a una compuerta NOT (o bien, compuerta X).

```

1 def random_mutation(population, gen_length):
2     for i in range(np.random.randint(len(population))):
3         if 0.1 > np.random.randint(100)/100:
4             mutation_index = np.random.randint(len(population))
5             population[mutation_index] = 1 - population[mutation_index]
6     return population

```

4.4. Cruzamiento. - Una forma de hacer cruzamiento es seleccionar una posición en 2 de los cromosomas e intercambiar las secciones posteriores a ese punto según lo siguiente:

```

1 def roulette_crossover(population, fitness, gen_length):
2     total_fit = sum(fitness)
3     probs = fitness/total_fit
4     parent_indices = []
5     for i in range(len(probs)):
6         if np.random.randint(0,100)/100 < probs[i]:
7             parent_indices.append(i)
8     for i in range(0, len(parent_indices), 2):
9         parent1 = population[i - 2]
10        parent2 = population[i - 1]
11        crossover_point = np.random.randint(1, gen_length - 1)
12        child1 = np.concatenate((parent1[:crossover_point], parent1[crossover_point
:]))
13
14        child2 = np.concatenate((parent2[:crossover_point], parent2[crossover_point
:]))
15        population[i-2] = child1
16        population[i-1] = child2
17    return population

```

4.5. Experimentos y Resultados. - Inicialmente, en el algoritmo de la Figura I se genera un circuito cuántico aprovechando las facilidades que provee Qiskit para simularlos, con tantos qubits según cuantos objetos se quieran en el problema. Luego, al iterar en cada generación se superponen los qubits usando compuertas de Hadamard, para luego colapsar estos y obtener una población clásica con distintos candidatos de soluciones, los cuales son “reparados” para que cumplan con las restricciones duras del problema de no sobrepasar el peso límite de la mochila, sacando objetos aleatoriamente de esta misma.

Finalizando con lo clásico, se evalúa esta población reparada para verificar como está “evolucionando” el algoritmo y de si se alcanzaron los criterios de convergencia de la parte genética. Si no es así, se vuelve a iterar sobre otra generación, pero esta vez con las compuertas rotadas en Y, por una variación de ángulo según qué tan bien se comporta cada individuo x con el mejor de su generación b , según se muestra en la Tabla III.

x_i	b_i	$f(x) \geq f(b)$	$\Delta\theta$
0	0	false	0
0	0	true	0
0	1	false	0
0	1	true	0.05
1	0	false	0.01
1	0	true	0.025
1	1	false	0.005
1	1	true	0.025

Tabla III. Criterio de variación del ángulo de rotación.

Considerando todo lo anterior, se ejecutó la simulación de esta arquitectura para 100 objetos posibles a llevar en la mochila, con pesos aleatorios en un rango de 1 a 10 y valores equivalentes a esos pesos, pero aumentados en 5 unidades. La población se compone de 10 circuitos cuánticos distintos y para una cantidad de generaciones variables se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla IV.

Se aprecia que, independientemente del número de generaciones el algoritmo converge muy rápido a valores cercanos de lo que podría considerarse como el óptimo del problema para los parámetros dados, siendo el peor valor de los mejores ajustes bastante cercano al mejor de todas estas.

Por otra parte, analizando el algoritmo para una instanciación de 10 objetos y 150 generaciones, con el fin de estudiar cómo se comporta el ajuste de forma individual a través de las generaciones, se obtuvo el gráfico de la Figura II que muestra la tendencia del mismo.

Denotando con esto que efectivamente funciona el algoritmo QGA, mejorando a lo largo de las iteraciones de las generaciones, aun pese a las claras variaciones que se tiene entre cada una de estas iteraciones.

5. Conclusiones y observaciones finales. - El presente trabajo sobre QGAs permite obtener conocimiento actualizado y generalizado de los avances en esta área de investigación. Considerando la revisión y análisis de la literatura se puede resumir específicamente que los QGAs son una poderosa herramienta para abordar una gran diversidad de problemas complejos, tales como optimización, búsqueda, comunicaciones, entre otros. Permitiendo explorar soluciones de forma eficiente y flexible, hallando soluciones óptimas locales y/o globales, siendo este uno de los problemas que aún existen con este método.

Ejecución	Generaciones	Mejor ajuste
1	5	5787.11
2	8	5858.85
3	14	5932.84
4	18	5929.94
5	25	5902.80
6	30	5906.81
7	35	5933.64
8	40	5922.10
9	50	5911.09

Tabla IV. Resultados de una ejecución de HQGA.

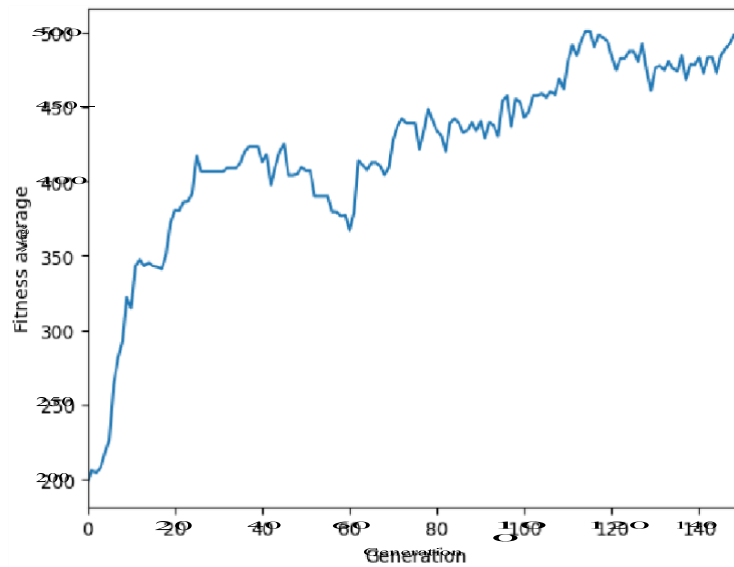


Figura II: Variación del ajuste a través de las generaciones

Los QGAs están presentes hoy en día en diversos tipos de problemas y áreas, partiendo por problemas de optimización combinatorial, planificación, optimización de funciones multimodales, etc; y en áreas tan diversas como arquitectura, medicina, economía, entre otros.

Si bien existen escenarios y dominios de aplicación específicos donde los CGAs o los enfoques cuánticos puros pueden ser más adecuados, los QGAs destacan por su capacidad de manejar problemas complejos y su flexibilidad para adaptarse a diferentes contextos.

Se han experimentado avances significativos, especialmente con respecto a nuevas técnicas, tales como la inclusión de operadores genéticos cuánticos y esquemas de codificación eficiente, ayudando a que los QGA converjan más rápido. De acuerdo a los experimentos realizados con QGAs, se puede decir que, dado que estos algoritmos se ejecutan en una simulación de un entorno cuántico, estos no alcanzan la optimización temporal que se debería obtener al ejecutarlos en un computador cuántico real, teniendo en algunos casos una demora de varios minutos para la generación de resultados. Los algoritmos genéticos convergen rápidamente en las iteraciones iniciales, variando distintos parámetros para ver si existe otro óptimo.

La representación cuántica utilizada en el cromosoma cuántico es crucial para el desempeño del QGA. Una elección adecuada de la codificación y el diseño de compuertas cuánticas optimizadas pueden mejorar la capacidad del algoritmo para encontrar soluciones óptimas. Al contrario, la mala selección de estas compuertas puede provocar variaciones enormes en el algoritmo, escapando de la búsqueda y convergencia hacia un óptimo.

Por último, se destaca la biblioteca Qiskit que proporciona una plataforma sólida y flexible para implementar QGAs. Su conjunto de herramientas y funcionalidades facilita la implementación de las operaciones genéticas y la evaluación de la aptitud en el contexto cuántico.

Referencias

- [1] Lee Spector, Howard Barnum, Herbert J. Bernstein, Nikhil Swamy. “7: Quantum Computing Applications of Genetic Programming”. The MIT Press. 1999. <https://doi.org/10.7551/mitpress/1110.003.0010>
- [2] Mohammad Mojrián y Seyed Abolghasem Mirroshandel. “A novel extractive multi-document text summarization system using quantum-inspired genetic algorithm: MTSQIGA”. *Expert Systems with Applications* 171 (2021), pp. 114555. issn: 0957-4174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114555>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417420311994>.
- [3] Kuk-Hyun Han y Jong-Hwan Kim. “Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem”. *Proc. of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)*. 2 (2000), pp. 1354-1360, vol. 2. doi: 10.1109/CEC.2000.870809.
- [4] Andrea Malossini, Enrico Blanzieri y Tommaso Calarco. “Quantum Genetic Optimization”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 12.2 (2008), pp. 231-241. doi: 10.1109/TEVC.2007.905006.
- [5] Y. Hardy y W.-H Steeb. “Genetic Algorithms and Optimization Problems in Quantum Computing”. *Int. Journal of Modern Physics C -IJMPC* 21 (2010), pp. 1359-1375. doi: 10.1142/S0129183110015890.
- [6] Huaixiao Wang et al. “The Improvement of Quantum Genetic Algorithm and Its Application on Function Optimization”. *Mathematical Problems in Engineering* (2013). doi: 10.1155/2013/730749.
- [7] Hatem M. H. Saad et al. “Quantum-Inspired Genetic Algorithm for Resource-Constrained Project-Scheduling”. *IEEE Access* 9 (2021), pp. 38488-38502. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3062790.
- [8] Enrique Ballinas y Oscar Montiel Ross. “Hybrid Quantum Genetic Algorithm for the 0-1 Knapsack Problem in the IBM Qiskit Simulator”. *Computacion y Sistemas* 26 (2022), pp. 725-742. doi: 10.13053/CyS-26-2-4253.
- [9] Arufe L, González MA, Oddi A, Rasconi R, Varela R. “Quantum circuit compilation by genetic algorithm for quantum approximate optimization algorithm applied to MaxCut problem”. *Swarm Evol Comput* 69:101030. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2022.101030>
- [10] In'és Hilali-Jaghdam et al. “Quantum and classical genetic algorithms for multilevel segmentation of medical images: A comparative study”. *Computer Communications* 162 (2020), pp. 83-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.08.010>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366420318892>.
- [11] Lensen A, Xue B, Zhang M (2021). “Genetic programming for evolving a front of interpretable models for data visualization”. *IEEE Trans Cybern* 51(11):5468–5482. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.2970198>
- [12] Zhaoyang Huang et al. “Optimal design of load frequency active disturbance rejection control via double-chains quantum genetic algorithm”. *Neural Computing and Applications* 33 (2021). doi: 10.1007/s00521-020-05199-6.
- [13] Durán, C., Carrasco, R., Soto, I. et al. “Quantum algorithms: applications, criteria and metrics. *Complex*”. *Intell. Syst.* 9, 6373–6392 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01073-9>
- [14] Qian X, Wang S, Li C, Wang G (2019). “Multi channels data fusion algorithm on quantum genetic algorithm for sealed relays”. *J Phys Conf Ser* 1237(2):22130. <https://doi.org/10.1088/17426596/1237/2/022130>
- [15] Xinjian Pan et al. “Self-calibration for linear structured light 3D measurement system based on quantum genetic algorithm and feature matching”. *Optik* 225

(2021), pp. 165749. issn: 0030-4026. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165749>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040262031576X>.

[16] Yuxing Wang y Chunyu Wei. “Design optimization of office building envelope based on quantum genetic algorithm for energy conservation”. *Journal of Building Engineering* 35 (2021), pp. 102048. issn: 2352-7102. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102048>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220336809>.

[17] Jia-Chu Lee et al. “Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system”. *Int. Journal of Electrical Power Energy Systems* 33 (2011), pp. 189-197. doi: 10.1016/j.ijepes.2010.08.014.

[18] Wang B, Zhao W, Lin S, Ke J, Wu H (2022). “Integrated energy management of highway service area based on improved multiobjective quantum genetic algorithm”. *Dianwang Jishu/Power Syst Technol* 46(5):1742–1751. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1610>

[19] Junhe Wan et al. “Fractional-Order PID Motion Control for AUV Using Cloud-Model-Based Quantum Genetic Algorithm”. *IEEE Access* 7 (2019), pp. 124828-124843. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937978.

[20] Zhu X, Xiong J, Liang Q (2018). “Fault diagnosis of rotation machinery based on support vector machine optimized by quantum genetic algorithm”. *IEEE Access* 6:33583–33588. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2789933>

[21] Guangfeng Cheng, Chunhua Wang y Cong Xu. “A novel hyper-chaotic image encryption scheme based on quantum genetic algorithm and compressive sensing”. *Multimedia Tools and Applications* 79 (2020). doi: 10.1007/s11042-020-09542-w.

[22] Susan Stepney y John A Clark. “Evolving quantum programs and protocols”. *Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology* 3 (2006), pp. 113-160.

[23] R. Lahoz-Beltra. “Quantum Genetic Algorithms for Computer Scientists”. *Computers* 5 (2016), pp. 24. doi: 10.3390/computers5040024.

[24] Mahboobeh Houshmand et al. “An Evolutionary Approach to Optimizing Teleportation Cost in Distributed Quantum Computation”. *Int. Journal of Theoretical Physics* 59 (2020). doi: 10.1007/s10773-020-04409-0.

[25] Rui Li et al. “Approximate Quantum Adders with Genetic Algorithms: An IBM Quantum Experience”. *Quantum Measurements and Quantum Metrology* 4 (2017), pp. 1. doi: 10.48550/arXiv.1611.07851.

[26] B. I. P. Rubinstein, “Evolving quantum circuits using genetic programming,” *Proc. of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*, Seoul, Korea (South), 2001, pp. 144-151 vol. 1, doi: 10.1109/CEC.2001.934383.

[27] Riccardo Rasconi y Angelo Oddi. “An Innovative Genetic Algorithm for the Quantum Circuit Compilation Problem”. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence* 33 (2019), pp. 77077714. doi: 10.1609/aaai.v33i01.33017707.

[28] Zakaria Laboudi y Salim Chikhi. “Comparison of Genetic Algorithm and Quantum Genetic Algorithm”. *Int. Arab Journal of Information Technology* 9, (2012).

[29] Akira SaiToh, Robabeh Rahimi y Mikio Nakahara. “A quantum genetic algorithm with quantum crossover and mutation operations”. *Quantum Information Processing* 13 (2014), pp. 737. doi: 10.1007/s11128-013-0686-6.

- [30] Jirayu Supasil, Poramet Pathumsoot y Sujin Suwanna. “Simulation of implementable quantumassisted genetic algorithm”. *Journal of Physics: Conference Series* 1719 (2021), pp. 012102. doi: 10.1088/1742-6596/1719/1/012102.
- [31] Bart Rylander, Terence Soule, James A. Foster, Jim Alves-Foss. “Quantum Genetic Algorithms.” *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '00)*, Las Vegas, Nevada, USA, July 8-12, 2000
- [32] James King, Masoud Mohseni, William Bernoudy, Alexandre Fréchet, Hossein Sadeghi, Sergei V. Isakov, Hartmut Neven, Mohammad H. Amin. “Quantum-Assisted Genetic Algorithm”. arXiv:1907.00707, 2019.
- [33] Ruben Ibarrondo, Giancarlo Gatti, Mikel Sanz. “Quantum vs classical genetic algorithms: A numerical comparison shows faster convergence”. *2022 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. <http://dx.doi.org/10.1109/SSCI51031.2022.10022159>, 10.1109/ssci51031.2022.10022159
- [34] Yu-Fang C, Hao X, Wen-Cong H, Liang Z (2018). “An improved multi-objective quantum genetic algorithm based on cellular automaton”. In: *2018 IEEE 9th Int. Conf. on Software Engineering and Service Sciences*. IEEE, Beijing, pp 342–345. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2018.8663840>
- [35] Creevey, F.M., Hill, C.D. Hollenberg, L.C.L. “GASP: a genetic algorithm for state preparation on quantum computers”. *Sci Rep* 13, 11956 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37767-w>

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

MS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

VF ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

FM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

FP ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

LD ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Desafíos en la integración de QPUs a sistemas HPC clásicos

Challenges in integrating QPUs into classical HPC systems

Desafios na integraçao de QPUs em sistemas HPC clássicos

Adrian Pousa ^{1,(*)}, Victoria Sanz ²

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Resumen. - El Cómputo de Altas Prestaciones (HPC) aplica diferentes técnicas a aplicaciones complejas o de gran volumen, apoyándose en el software y hardware paralelo, para reducir el tiempo de ejecución respecto a ejecutar las mismas sobre una computadora simple. Por otro lado, la Computación Cuántica (QC) surge como un nuevo paradigma que aprovecha propiedades de la mecánica cuántica en computación. La QC posee características inherentemente paralelas y se espera que resuelva algunos problemas de forma más rápida que la computación clásica. Varios autores coinciden que la QC deberá integrarse al cómputo clásico HPC. El propósito de este artículo es abordar los desafíos de esta integración.

Palabras clave: Computación de Altas Prestaciones; Computación Cuántica; Integración HPC-QC.

(*) Autor de correspondencia

¹ Docente e Investigador, III-LIDI, Facultad de Informática, UNLP, La Plata, Argentina, apousa@lidi.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8072-6626>

² Docente e Investigador, III-LIDI, Facultad de Informática, UNLP, La Plata, Argentina, CIC, Buenos Aires, Argentina, vsanz@lidi.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3487-406X>

Summary. - High Performance Computing (HPC) applies different techniques to complex or high-volume applications, relying on parallel software and hardware, to reduce the execution time compared to running them on a simple computer. On the other hand, Quantum Computing (QC) emerges as a new paradigm that takes advantage of properties of quantum mechanics in computing. QC has inherently parallel characteristics and is expected to solve some problems faster than classical computing. Several authors agree that QC should be integrated into classical HPC computing. The purpose of this article is to address the challenges of this integration.

Keywords: High Performance Computing; Quantum Computing; HPC-QC Integration.

Resumo. - A Computação de Alto Desempenho (HPC) aplica diferentes técnicas a aplicações complexas ou de grande volume, contando com software e hardware paralelos, para reduzir o tempo de execução em comparação com a execução em um computador simples. Por outro lado, a Computação Quântica (QC) surge como um novo paradigma que aproveita propriedades da mecânica quântica na computação. O QC tem características inerentemente paralelas e espera-se que resolva alguns problemas mais rapidamente do que a computação clássica. Vários autores concordam que o CQ deve ser integrado na computação HPC clássica. O objetivo deste artigo é abordar os desafios dessa integração.

Palavras-chave: Computação de Alto Desempenho; Computação Quântica; Integração HPC-QC.

1. Introducción. - El Cómputo de Altas Prestaciones (HPC ó High Performance Computing) es la práctica de sumar la potencia computacional de varios dispositivos con el fin de mejorar el rendimiento de aplicaciones de las ciencias, ingeniería o negocios. Para ello se aplican distintas técnicas de programación para crear algoritmos paralelos, que se ejecutarán sobre arquitecturas de cómputo paralelas, permitiendo así reducir el tiempo de ejecución de la aplicación respecto a ejecutarla en una única computadora. (1; 2; 3)

La Computación Cuántica (QC ó Quantum Computing) comenzó a desarrollarse en la década de 1980 a partir de las propuestas de Paul Benio, Richard Feynman y David Deutsch de aprovechar las leyes de la mecánica cuántica (QM ó Quantum Mechanics) en computación. Entre sus propuestas destacan la viabilidad de las computadoras cuánticas (es decir, computadoras que operen bajo las leyes de la QM) y la posibilidad de usar dichos sistemas para realizar cómputo que resulta difícil de resolver sobre computadoras clásicas (por ejemplo, simulación de sistemas cuánticos). (4)

En QC, la unidad de información es el quantum bit (qubit). A diferencia de un bit clásico, que sólo puede tomar los valores 0 ó 1, un qubit puede tomar el valor 0, 1 o ambos a la vez. Esto es, el qubit puede encontrarse en una superposición de dos estados cuánticos. Esta superposición cuántica posibilita un procesamiento paralelo a gran escala. Intuitivamente, aquellos cómputos que necesiten ser aplicados a ambos estados (0 y 1) podrán resolverse con una única operación usando un qubit en una computadora cuántica, en contraste a una computadora clásica que necesitará realizar dos operaciones sobre los dos estados por separado. (4; 5; 6)

Dada la naturaleza paralela de las computadoras cuánticas y la posibilidad de que puedan resolver problemas de forma más rápida que las computadoras clásicas, es inevitable establecer una relación entre HPC y QC. Varios autores plantean una integración de la QC en sistemas HPC clásicos. En este artículo analizamos los desafíos de esta integración.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe brevemente los sistemas HPC y su evolución. La sección 3 describe la QC y su estado actual. La sección 4 resume las propuestas de otros autores que relacionan HPC con QC. La sección 5 analiza los desafíos de dicha integración. Para analizar, la sección 6 presenta la conclusión y las líneas de trabajo futuro.

2. Evolución de sistemas HPC clásicos. - La idea de agregar la potencia computacional de varios procesadores y utilizarla para reducir el tiempo de resolución de problemas de gran complejidad se remonta a 1971. (7) Sin embargo, los primeros sistemas HPC tipo cluster se popularizaron recién a principios de 1990, cuando el hardware de cómputo y comunicación se volvió más asequible, y gracias a la consolidación del protocolo TCP/IP y al surgimiento de la biblioteca de desarrollo PVM (8) (posteriormente reemplazada por MPI (9)). Esta sección describe la evolución de los sistemas HPC, desde sus comienzos hasta la actualidad.

2.1. Clusters HPC. - Un cluster HPC es una arquitectura que conecta un conjunto de computadoras (nodos) mediante una red de comunicaciones (Figura 1a), permitiendo así sumar la potencia de cómputo de las mismas y utilizarla para resolver problemas en menor tiempo. La red de interconexión puede ser Ethernet o redes de alta velocidad tales como Infiniband o Myrinet. Las aplicaciones que corren sobre un cluster siguen el modelo de programación sobre memoria distribuida. En dicho modelo se generan procesos, uno por nodo del cluster, que interactúan entre sí intercambiando mensajes con el objetivo de resolver el problema en cuestión. La herramienta más usada para desarrollar aplicaciones bajo este modelo es MPI.

Un cluster es un recurso compartido por varios usuarios. Cada usuario puede utilizar todos los nodos del cluster o un subconjunto, pero siempre de forma exclusiva. Así, la aplicación de un usuario ejecuta sobre sus nodos sin ser interferida por aplicaciones de otros usuarios. Cuando un usuario utiliza un subconjunto de nodos del cluster, los nodos restantes pueden ser asignados a otros usuarios.

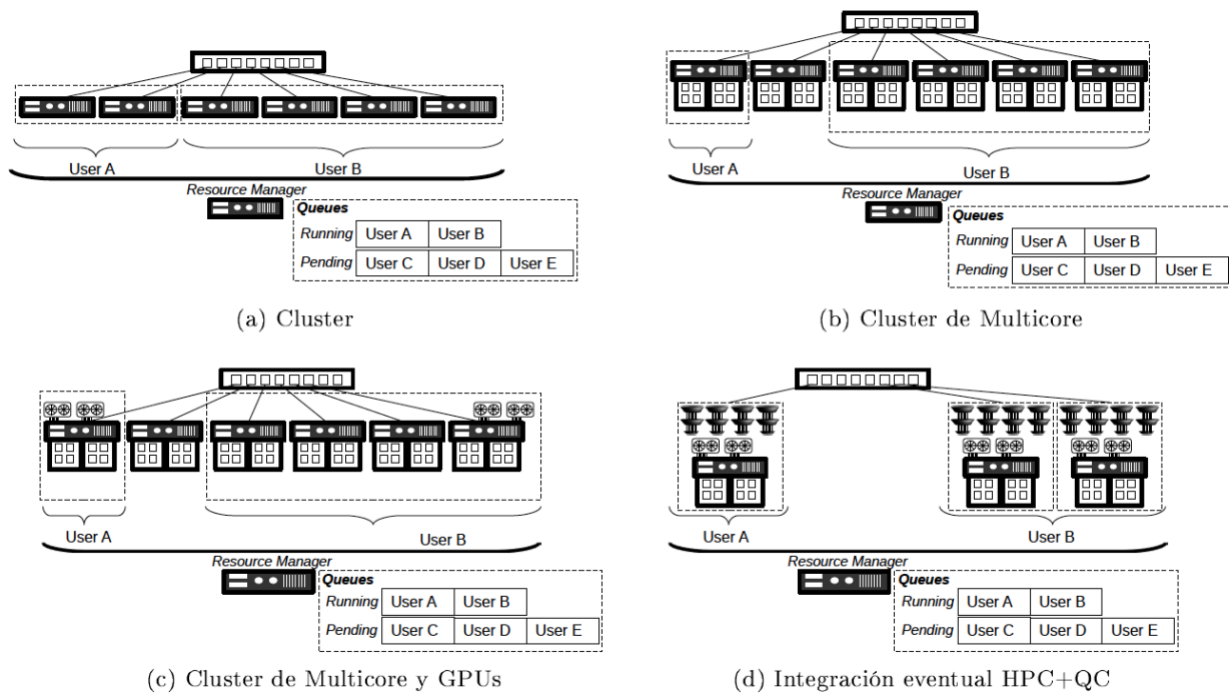


Figura 1. Sistemas HPC

Para gestionar los recursos del cluster se utilizan Resource Managers como OpenPBS (10), Torque (11), Slurm (12), entre otros. Los usuarios solicitan recursos al manager para ejecutar su aplicación. Si es posible satisfacer su pedido, el manager reserva los nodos y envía a ejecutar la aplicación del usuario. Por el contrario, encola el pedido y lo atenderá cuando los recursos estén disponibles.

2.2. Multicores y Clusters de multicore. - Hasta principios del 2000, la evolución de los procesadores se basaba en aumentar su frecuencia, y en consecuencia su potencia de cómputo, lo que mejoraba automáticamente el rendimiento de las aplicaciones. Sin embargo, llevar la frecuencia más allá de cierto límite provocaba que el procesador eleve su temperatura, siendo necesario consumir más energía para disipar el calor. Es por eso que, a principios del 2000, dicha tendencia llegó a su fin, dando lugar al surgimiento de los procesadores multicore. Los multicore incluyen varias unidades de procesamiento (cores) independientes, y permiten mejorar el rendimiento de las aplicaciones diseñadas para explotar el paralelismo a nivel de tarea.

Los clusters que conectan máquinas con procesadores multicore (Figura 1b) se benefician por contar con un mayor número de unidades de procesamiento. Para explotar el paralelismo del procesador multicore, la aplicación debe seguir el modelo de programación de memoria compartida. En dicho modelo se crean hilos, uno por core, que se comunican entre sí mediante la memoria compartida. Las herramientas más usadas para desarrollar aplicaciones bajo este modelo son Pthreads (13) y OpenMP (14). También es posible que la aplicación siga el modelo de programación de memoria distribuida, ubicando un proceso por core y comunicándolos mediante mensajes. Las aplicaciones que corren sobre un cluster de multicore pueden utilizar ambos modelos de programación (modelo híbrido) y combinar las distintas herramientas (Por ejemplo: MPI y OpenMP o MPI y Pthreads).

Cómo se mencionó anteriormente, en HPC no es habitual compartir un nodo entre varios usuarios. Los usuarios solicitan al *Resource Manager* nodos del cluster para uso exclusivo. Por lo tanto, si un usuario utiliza un subconjunto de cores del nodo solicitado, los cores ociosos no podrán ser utilizados por otros usuarios.

2.3. Cluster de multicore con GPUs como coprocesadores. - Las placas gráficas (GPUs) surgieron para liberar a la CPU del procesamiento gráfico. Las primeras GPUs estaban compuestas por procesadores no programables dedicados a tareas específicas (implementadas por hardware). En 2006, las GPUs comenzaron a incorporar procesadores

programables que permiten resolver problemas de propósito general (no solamente gráfico), surgiendo el concepto de GPGPU (General-Purpose Computing on GPUs).

Las GPUs mostraron ser más eficientes en rendimiento que los multicores y clusters para ciertas aplicaciones con alto grado de paralelismo (SIMD), de cómputo intensivo, que trabajan sobre datos de tipo regular. Sin embargo, las GPUs no reemplazaron a dichas arquitecturas, sino que se integraron como coprocesadores en los nodos del cluster (Figura 1c).

Las aplicaciones que corren sobre clusters que incorporan GPUs, pueden utilizar únicamente las GPUs del nodo o usarlas de manera colaborativa junto con los CPU cores. Algunos artículos (15; 16) muestran las ventajas de esta integración.

Respecto a la reserva de recursos, cuando un usuario necesita usar GPUs, el Resource Manager del cluster atiende la solicitud reservando nodos que las incorporan. Si el usuario utiliza sólo la/s GPU/s del nodo, los CPU cores no podrán ser utilizados por otro usuario. De igual manera, si el usuario utiliza sólo los CPU cores de un nodo, la/s GPU/s no podrán ser utilizadas por otro usuario.

3. Fundamentos de QC - Estado actual. - El qubit es la unidad de información de la QC. Un qubit puede estar en alguno de los estados básicos (0 ó 1) o en el estado de superposición (0 y 1). Un qubit en estado de superposición lleva asociadas dos probabilidades, que representan la probabilidad de valer 0 y 1 respectivamente. Asimismo, debe tenerse en cuenta que al observar o "medir" un qubit en estado de superposición este colapsa hacia el estado básico más probable (ya sea 0 ó 1). Por esta razón, para obtener los resultados de la ejecución de un algoritmo sobre una máquina cuántica deben realizarse múltiples ejecuciones (o shots). (4; 5; 6)

El principio de superposición dota a las computadoras cuánticas de un paralelismo inherente. En un sistema cuántico de N-qubits pueden encontrarse simultáneamente superpuestos 2^N estados, por tanto, el efecto de aplicar una operación a los N-qubits equivale a aplicarla a todos los estados en paralelo.

En la década de 1990 aparecieron las primeras computadoras cuánticas limitadas a 2 o 3 qubits. Actualmente, existen máquinas cuánticas individuales de decenas de qubits (17; 18; 19; 20). Estas computadoras operan sobre los qubits utilizando puertas cuánticas, que son equivalentes a las puertas lógicas utilizadas por las computadoras clásicas y permiten manipular el estado de los qubits para realizar cálculos (21).

En la misma década fueron propuestos los primeros algoritmos cuánticos (QAs ó Quantum Algorithms) (22; 23; 24). Un QA aplica operaciones sobre los qubits, con el objetivo de incrementar la probabilidad de los estados deseados y decrementar la de aquellos no deseados, y finaliza con la medición, la cual colapsa el estado del sistema a un estado básico con cierta probabilidad, obteniendo así la salida clásica (bits).

Las máquinas cuánticas deben estar en un ambiente controlado para evitar o mitigar la decoherencia, que surge por las interacciones de un qubit con su entorno y provocan perturbaciones que conducen a errores en la información cuántica. Por esta razón, requieren de temperaturas extremadamente bajas, cercanas al cero absoluto (-273 C), y estar blindadas ante señales externas (radio, luz, electromagnéticas) lo cual dificulta su comercialización. Es por ello que las máquinas cuánticas actuales son provistas por unas pocas instituciones y accedidas a través de servicios en la Nube (17; 18).

4. Integración HPC-QC: Trabajos relacionados. - Algunos autores plantean el reemplazo de los sistemas HPC por su equivalente cuántico (25; 26) al proponer clusters cuánticos sin ningún tipo de integración con arquitecturas HPC clásicas. Sin embargo, varios artículos sostienen que la QC no reemplazará al HPC tradicional, sino que serán herramientas complementarias (27; 28; 29; 30; 31; 32).

En (27) los autores proponen arquitecturas híbridas clásica-cuántica, que incluso pueden integrar múltiples Quantum Processing Units (QPUs) interconectadas.

Foster (28) plantea que la QC no será adecuada para todas las cargas de trabajo, sino que complementará a las arquitecturas HPC clásicas cuando sea necesario. Britt (27) plantea una idea similar y la posibilidad de usar máquinas cuánticas como coprocesadores, de la misma forma que sucede actualmente con las GPUs. Perelshtein (29) muestra la ventaja práctica de este enfoque al ejecutar algoritmos específicos sobre una arquitectura híbrida, que combina infraestructura clásica de alto rendimiento (CPUs, GPUs) y QPUs simuladas. Asimismo, Britt (27) pone de manifiesto que deben considerarse nuevas métricas, basadas en las puertas cuánticas y el número de shots, para evaluar el rendimiento de los algoritmos cuánticos.

En cuanto a la integración HPC-QC, los artículos (27; 30; 31; 32) realizan propuestas que abarcan: la integración de estas arquitecturas, el desarrollo de middlewares que faciliten el uso y administración de recursos clásicos-cuánticos, la integración de las herramientas de programación cuántica y aquellas usadas en HPC y el fácil acceso a la infraestructura como un todo.

Britt (30) expone algunos desafíos para alcanzar dicha integración: la incompatibilidad entre las tecnologías de computación cuántica y clásica, y el esfuerzo para gestionar las interacciones lógicas entre ambos tipos de sistemas y errores en la información cuántica.

5. Discusión. - Actualmente, las computadoras cuánticas necesitan de un ambiente controlado y no se encuentran integradas en sistemas HPC clásicos. Por esta razón, sólo pueden ser accedidas individualmente a través de servicios en la Nube.

Varios artículos proponen incorporar QPUs en sistemas HPC, cumpliendo el rol de coprocesador, al igual que sucede con las GPUs actualmente. Eventualmente, las QPUs podrían ser accedidas a través del nodo que las contiene. Por lo tanto, el nodo tendrá múltiples opciones de procesamiento (Figura Id): cores, GPU/s y QPU/s. El primer desafío es resolver la incompatibilidad tecnológica entre los sistemas clásicos HPC y las QPUs para lograr una correcta integración. Los sistemas clásicos están basados en silicio y este no es el caso de las computadoras cuánticas actuales. Aun cuando se consiga una integración adecuada, es necesario que la interacción entre ambos sistemas se encuentre libre de interferencias tal como se plantea en (31).

Otros de los desafíos plantean cómo se procesarán y distribuirán las cargas de trabajo en los sistemas integrados HPC-QC. En (28) los autores plantean que la QC, al igual que las GPUs en sistemas HPC actuales, podría no ser adecuada para todas las cargas de trabajo. En un sistema actual HPC clásico, compuesto por cores y GPUs, es común plantear tres tipos de estrategias de procesamiento: tipo pipeline, colaborativo o independiente. Estas mismas estrategias podrían emplearse al integrar las QPUs. Las aplicaciones que corran en este sistema híbrido HPC-QC deberán seleccionar las unidades de procesamiento (CPU cores, GPUs, QPUs) que mejor se adapten a la tarea específica a resolver.

Las aplicaciones tipo (pipeline), que atraviesan etapas donde la salida de una es la entrada de la siguiente, podrán resolver cada etapa sobre la unidad de procesamiento más adecuada. En algunos casos, podrá alcanzarse el máximo paralelismo, haciendo que todas las unidades de procesamiento trabajen simultáneamente, cada una cumpliendo una etapa.

Las aplicaciones cuyo cómputo sea factible de realizarse en todas las unidades de procesamiento podrán usar dichas unidades de forma colaborativa y en paralelo. En este caso, cada unidad de procesamiento hará el mismo trabajo sobre una parte de los datos de entrada. El desafío está en distribuir adecuadamente los datos entre las unidades en función de su potencia de cómputo, de manera que todas terminen la ejecución al mismo tiempo. En este caso, será necesario hacer un profiling, es decir ejecutar la aplicación sobre cada unidad de procesamiento para determinar su potencia de cómputo.

Otro tipo de aplicaciones podría beneficiarse al usar únicamente un tipo de unidad de manera independiente: sólo las QPUs, sólo los CPU cores, o sólo las GPUs. Un desafío no menos importante, y que dependerá de cómo se resuelva la tecnología de integración subyacente, está relacionado a cómo compartir datos entre el sistema clásico HPC y las QPUs. En un sistema HPC actual, los datos residen en la RAM de la CPU y se comparten con una GPU realizando copias

hacia y desde la memoria de la GPU a través del puerto PCI express. Algunas herramientas, como el manejo de memoria unificada en CUDA, hacen transparente al programador estas transferencias. De manera similar, será necesario contar con la tecnología adecuada que permita representar los datos en memoria de la CPU en los registros de las QPUs de manera transparente al programador.

Por lo tanto, los sistemas HPC-QC integrados plantean al menos dos desafíos importantes: la tecnología de integración y el correcto diseño de aplicaciones híbridas, que dependerá no sólo de la naturaleza de la aplicación, sino también del volumen de los datos de entrada. Esto es, si el volumen de los datos de entrada es pequeño, el overhead introducido para coordinar las unidades de procesamiento podría tener mayor impacto en el rendimiento final, pudiendo no resultar beneficioso utilizar una arquitectura integrada.

6. Conclusiones y trabajo futuro. - Varios autores coinciden que la QC no reemplazará a los sistemas HPC clásicos, sino que se complementarán. En particular, algunos plantean integrar las QPUs a los sistemas HPC existentes y usarlas como coprocesadores. Esto presenta dos desafíos. En primer lugar, se debe determinar cómo llevar a cabo la integración tecnológica HPC-QC. En segundo lugar, se debe estudiar para qué tipo de aplicaciones serán más adecuadas las QPUs respecto a otro tipo de arquitectura.

Como trabajo futuro, se pretende seleccionar problemas típicos de HPC que puedan ser resueltos en QC, comparar y analizar el rendimiento en ambos sistemas, y plantear soluciones que utilicen sistemas HPC-QC integrados con el fin de alcanzar mejoras significativas. Cabe destacar que la tecnología actual presenta ciertas limitaciones: las máquinas cuánticas cuentan con pocos qubits y no se encuentran integradas a sistemas HPC. Por esta razón, será de importancia contar con ambientes simulados adecuados para la experimentación.

Referencias

- [1] A. Grama, A. Gupta, G. Karypis, V. Kumar, *An Introduction to Parallel Computing*. 2da edn. Addison Wesley, 2003.
- [2] I. Foster, *Designing and Building Parallel Programs: Concepts and Tools for Parallel Software Engineering*. Pearson, 2023.
- [3] J. Dongarra, I. Foster, G. Fox, W. Gropp, K. Kennedy, L. Torczon, A. White, *Sourcebook of Parallel Computing*. Morgan Kaufmann, 2003.
- [4] S. Golestan, MR. Habibi, SY. Mousazadeh Mousavi, JM. Guerrero, JC. Vasquez, Quantum computation in power systems: An overview of recent advances. *Energy Reports*, Volume 9, Pages 584-596, 2023.
- [5] C. Hughes, J. Isaacson, A. Perry, RF. Sun, J. Turner, *What Is a Qubit? In: Quantum Computing for the Quantum Curious*. Springer, Cham, 2021.
- [6] SS. Gill, A. Kumar, H. Singh, et al. Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions. *Softw: Pract Exper*, 52(1), 66-114 2022.
- [7] G. Hager, G. Wellein, *Introduction to HPC for Scientists and Engineers 2011*
- [8] Parallel Virtual Machine (PVM) https://www.epm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html
- [9] Message Passing Interface (MPI) <https://www.mpi-forum.org/>
- [10] OpenPBS Resource Manager <https://www.openpbs.org/>
- [11] Torque Resource Manager <https://adaptivecomputing.com/cherry-services/torque-resourcemanager/>
- [12] Slurm Resource Manager <https://slurm.schedmd.com/>
- [13] Posix Threads (Pthreads) <https://posix.opengroup.org/>
- [14] Open Multi-Processing (OpenMP) <https://www.openmp.org/>
- [15] V. Sanz, A. Pousa, M. Naiouf, A. De Giusti, Accelerating pattern matching with CPU-GPU collaborative computing. *Algorithms and Architectures for Parallel Processing: 18th International Conference, ICA3PP 2018, Guangzhou, China, November 15-17, 2018, Proceedings, Part I* 18 310-322, Springer International Publishing, 2018.
- [16] V. Sanz, A. Pousa, M. Naiouf, A. De Giusti, Accelerating pattern matching with CPU-GPU collaborative computing. *Algorithms and Architectures for Parallel Processing: 19th International Conference, ICA3PP 2019, Melbourne, VIC, Australia, December 9 11, 2019, Proceedings, Part I* 19 391-403, Springer International Publishing, 2020.
- [17] Amazon Braket: Quantum Computers, QuEra. Accessed: Feb. 29, 2024.[Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/braket/quantum-computers/quera/>
- [18] Amazon Braket: Quantum Computers, Rigetti. Accessed: Feb. 29, 2024.[Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/braket/quantum-computers/rigetti/>
- [19] IBM: Quantum Computing Technology. Accessed: Feb. 29, 2024.[Online]. Available:

<https://www.ibm.com/quantum/technology>

[20] Google, Quantum AI.: Quantum Computer Datasheet. Accessed: Feb. 29, 2024.[Online]. Available: <https://quantumai.google/hardware/datasheet/weber.pdf>

[21] A. Barenco, CH. Bennett, R. Cleve, DP. DiVincenzo, N. Margolus, P. Shor, T. Sleator, J. Smolin, H. Weinfurter, Elementary gates for quantum computation. arXiv:quant-ph/9503016v1, 1995.

[22] PW. Shor, Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. arXiv:quant-ph/9508027v2, 1995.

[23] D. Deutsch, R. Jozsa, Rapid solution of problems by quantum computation. Proceedings of the Royal Society of London A439:553, 1992.

[24] LK. Grover, A fast quantum mechanical algorithm for database search. Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, 1996.

[25] SJ. Devitt, WJ. Munro, K. Nemoto, High Performance Quantum Computing. arXiv preprint arXiv:0810.2444, 2008.

[26] T. Haner, DS. Steiger, T. Hoefer, M. Troyer, Distributed Quantum Computing with QMPI. Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. SC 2021. Article No., 2021.

[27] KA. Britt, TS. Humble, High-Performance Computing with Quantum Processing Units. ACM. Journal on Emerging Technologies in Computing Systems, Volume 13 Issue 3 Article No.: 39, pp 1-13, 2015.

[28] S. Banerjee, I. Foster, W. Gropp, Infrastructure for Artificial Intelligence, Quantum and High-Performance Computing. 2020.

[29] M. Perelshtein, A. Sagingalieva, K. Pinto, V. Shete, A. Pakhomchik, A. Melnikov, F. Neukart, G. Gesek, A. Melnikov, V. Vinokur, Practical application-specific advantage through hybrid quantum computing. arXiv preprint arXiv:2205.04858 [quant-ph], 2022.

[30] KA. Britt, FA. Mohiyaddin, TS. Humble, Quantum Accelerators for High-Performance Computing Systems. arXiv preprint arXiv: 1712.01423, 2017.

[31] N. Saurabh, S. Jha, A. Luckow, A Conceptual Architecture for a Quantum-HPC Middleware. arXiv preprint arXiv:2308.06608v1, 2023.

[32] A. Elsharkawy, M. Xiao-Ting, P. Seitz, Y. Chen, Y. Stade, M. Geiger, Q. Huang, X. Guo, MA. Ansari, CB. Mendl, D. Kranzlmüller, M. Schulz, Integration of Quantum Accelerators with High Performance Computing – A Review of Quantum Programming Tools . arXiv preprint arXiv:2309.06167 [cs.ET], 2023.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

AP ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

VS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Supply and Demand in the Training of Quantum Software Engineering Workforce

Oferta y Demanda en la Formación de Personal para la Ingeniería de Software Cuántico

Oferta e Procura de Formação de Pessoal em Engenharia de Software Quântico

Álvaro M. Aparicio-Morales¹, Enrique Moguel², Jose Garcia-Alonso^{3,*},
Alejandro Fernandez⁴, Luis Mariano Bibbo⁵, Juan M. Murillo⁶

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Summary. - Quantum Technologies are experiencing significant growth due to substantial investments made by governments worldwide. These investments aim to enhance global competitiveness in this field and position countries as key players. However, facing the changes of this new paradigm requires an increment in the workforce with specialized expertise in Quantum Technologies, particularly in the area of Quantum Computing. In this paper, we present a concise overview of the current quantum computing education offers and an outline of the current job offer landscape. We highlight essential elements for individuals interested in building a career profile in quantum software engineering, including understanding the professional requirements that experts and companies have established. The main goal of this paper is to offer an overview of the current educational and professional landscape in the quantum software engineering field, empowering the next generation of software engineers to thrive in a quantum technology-driven future that will profoundly impact human lives.

Keywords: Quantum Computing; Quantum Software Engineering; Education and Training; Competence Framework.

(*) Corresponding Author.

¹ Researcher, University of Extremadura, amapamor@unex.es, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-5161-5498>

² Associate Professor, University of Extremadura, enrique@unex.es, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4096-1282>

³ Associate Professor, University of Extremadura, jgaralo@unex.es, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6819-0299>

⁴ Associate Professor, National University of La Plata, casco@lifia.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7968-6871>

⁵ Associate Professor, National University of La Plata, lmbibbo@lifia.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4950-3605>

⁶ Full Professor, University of Extremadura, juanmamu@unex.es, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4961-4030>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 248-256

<https://doi.org/10.36561/ING.27.16>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Resumen. - Las tecnologías cuánticas están experimentando un importante crecimiento gracias a las cuantiosas inversiones realizadas por los gobiernos de todo el mundo. El objetivo de estas inversiones es mejorar la competitividad global en este campo y posicionar a los países como actores clave. Sin embargo, afrontar los cambios de este nuevo paradigma, requiere de un incremento de personal con conocimientos especializados en Tecnologías Cuánticas, particularmente en el área de la Computación Cuántica. En este artículo, presentamos una visión concisa de las ofertas actuales de formación en computación cuántica y un esbozo del panorama actual de ofertas de empleo. Destacamos los elementos esenciales para las personas interesadas en construir un perfil profesional en ingeniería de software cuántico, incluida la comprensión de los requisitos profesionales que han establecido los expertos y las empresas. El objetivo principal de este artículo es ofrecer una visión general del panorama educativo y profesional actual en el campo de la ingeniería de software cuántica, capacitando a la próxima generación de ingenieros de software para prosperar en un futuro impulsado por la tecnología cuántica que tendrá un profundo impacto en la vida humana.

Palabras clave: Computación cuántica; Ingeniería de Software Cuántico; Educación y Formación; Marco de Competencias.

Resumo. - As tecnologias quânticas estão a registar um crescimento significativo graças a investimentos substanciais por parte dos governos de todo o mundo. O objetivo destes investimentos é melhorar a competitividade global neste domínio e posicionar os países como actores-chave. No entanto, para fazer face às mudanças deste novo paradigma, é necessário um aumento do número de pessoas com conhecimentos especializados em tecnologias quânticas, nomeadamente no domínio da computação quântica. Neste artigo, apresentamos uma visão concisa das actuais ofertas de formação em Computação Quântica e um esboço do atual panorama de ofertas de emprego. Destacamos os elementos essenciais para as pessoas interessadas em construir um perfil profissional em engenharia de software quântico, incluindo a compreensão dos requisitos profissionais estabelecidos por especialistas e empresas. O principal objetivo deste artigo é fornecer uma visão geral do atual panorama educativo e profissional no domínio da engenharia de software quântico, capacitando a próxima geração de engenheiros de software para prosperar num futuro orientado para o quantum que terá um impacto profundo na vida humana.

Palavras-chave: Computação Quântica; Engenharia de Software Quântico; Ensino e Formação; Quadro de Competências.

1. Introduction. - The principles of quantum mechanics were established in the early 1900s. Since then, quantum information theory and hardware advances have made quantum computing a reality. Quantum computers use quantum bits (qubits) as the minimum unit of information instead of the bits of classical computers. Qubits exhibit two important properties of quantum mechanics: superposition and entanglement. Superposition allows qubits to be in multiple states simultaneously until they are measured. Entanglement enables a qubit to be related to another qubit, so their states cannot be described independently. Due to these properties, quantum computers can resolve the problems considered hard for today's computers [1].

Given this advantage, it sounds logical to start using this kind of computer for computationally hard tasks. However, current quantum computers are noisy and susceptible to errors, limiting their practical utility for complex computations and requiring sophisticated error correction techniques to mitigate these problems. Big efforts in the scientific community and enterprises are being made in order to get reliable quantum computers. Globally, substantial funding rounds are underway for projects focused on quantum technology developments, with particular emphasis on the creation of trustworthy quantum computers.

Nevertheless, to use them in a practical manner, it is also needed the development of efficient quantum algorithms and processes (software) to be run on those quantum machines. Likewise, as software engineering has shown, developing those algorithms is not enough since modern software solutions are complex systems that are based on a multi-layered infrastructure, using tools and techniques that enable software engineers to create high-quality solutions. Most of these elements in the field of quantum computing are in their early stages [2].

Applying software engineering to this new type of software is an emerging topic, which consists of bringing the benefits of software engineering to quantum software development. This innovative area, Quantum Software Engineering (QSE), is beginning to emerge as a relevant topic in the worldwide academic and technological forums, such as the "International Workshop on Quantum Software Engineering" held as part of the ICSE conference, or the "IEEE International Conference on Quantum Software" held as part of the IEEE Services conference, or the "Quantum Software Engineering and Technology Workshop" organized as part of the IEEE Quantum Week, or the "Latin American Workshop on Quantum Software Engineering" (Taller Latinoamericano en Ingeniería de Software Cuántico - TLISC).

However, additional efforts are needed to make progress in this emerging field of quantum computing [3]. Today, there is still a low critical mass of researchers and therefore a need to train new researchers and students in the specific aspects of QSE. The amount of resources needed to develop and test quantum solutions is still significant, so there is a need to pool efforts between groups and institutions interested in this field. In addition, the inherently interdisciplinary nature of quantum development, with fundamental contributions from mathematicians and physicists, requires collaborative approaches. Therefore, it is interesting to understand what knowledge and requirements are necessary to train and guide the new generation of quantum software engineers.

This article provides a brief overview of some of the existing educational offerings for training personnel in the field of quantum computing, specifically in quantum software engineering, as well as outlining the knowledge and professional requirements that future quantum software engineers must possess to apply for jobs in the quantum computing industry.

The paper is structured as follows. Section 2 describes the background, presenting the current financial initiatives of countries regarding quantum technologies. Section 3 presents the educational offerings and principal key concepts for quantum software engineers. Finally, Section 4 details the conclusions of this work.

2. Background. - Quantum computing initiatives around the world are experiencing significant growth and investment as researchers, governments, and private companies recognize the potential of quantum technology to revolutionize various industries. These initiatives encompass a wide range of activities, including research and development efforts, investment in infrastructure, and the formation of strategic partnerships. This investment is managed by public-private collaborations to accelerate the development of this new area. By 2023, global investment in quantum technologies

was estimated at USD 38.6 billion [4].

One example of an investment actor is the European Union which, through its Commission, has carried out a project to achieve the implementation and development of Quantum Computing in Europe through public funds. These projects are encompassed under the Quantum Flagship initiative.

Quantum Flagship is a large-scale, long-term research initiative launched in 2018 by the European Commission. This initiative aims to bring quantum technologies closer to research institutions, industry, and investors. To achieve this, the Quantum Flagship initiative has a budget of e 1 billion [5].

Under this initiative, there are projects in various fields such as communications and computing. Among communication projects, can be highlighted the QIA (Quantum Internet Alliance) [6] and the OPENQKD (Open European Quantum Key Distribution Testbed) [7]. In the field of quantum computing, the OpenSuperQ (An Open Superconduction Quantum Computer) project, whose mission is to create an open, hybrid, high-performance quantum computer of up to 100 qubits, and the NEASQ - NExt ApplicationsS of Quantum Computing project, which aims to foster the development of quantum applications that take advantage of existing quantum computers (NISQ) to address real problems in areas such as energy, computing and medicine, stand out [8].

In addition, countries such as Spain are developing their own projects, as in the case of Quantum Spain, which is investing e 60M to promote a national quantum computing infrastructure [9] or Germany, investing e 3 billion action plan in 2023 to strengthen its leadership in quantum research by developing a universal quantum computer by 2026 [4].

As a result of these investments, Europe has become one of the key players in quantum computing start-up investment [10].

Considering this, it is reasonable to recognize that achieving the objectives of these ambitious investment projects, along with the growth of the quantum computing start-up ecosystem and other global initiatives, necessitates an immediate demand for a skilled workforce. This workforce should comprise competent graduates who can provide the industry with specialized expertise in various areas of Quantum Technologies. In order to accomplish this, it is essential to provide robust educational programs that can cultivate specialized professionals in various domains of Quantum Technologies, including Quantum Computing and the even more focused field of Quantum Software Engineering as well as identify the professional qualifications that these specialists should possess based on the role they play in the industry.

3. Supply and Demand in the Training Quantum Software Engineering Workforce. - The continuous advancement in the development of quantum computing must be accompanied by an expansion of the quantum computing talent pool capable of meeting the demands of academia and industry for a quantum-ready workforce. This requires initiatives to cultivate a skilled pool of professionals equipped with the knowledge and expertise necessary to drive progress in the field of quantum computing.

In this section, a brief review of the current educational offerings in quantum computing, as well as the expected requirements for future quantum software engineers, is presented.

3.1. Education. - Further research in the field of quantum computing is necessary if the aim is to achieve the implementation of this new technology in the productive sectors. To achieve this, it is necessary to increase the number of qualified people who can participate in projects related to the development of quantum computing, in particular by developing research projects in the field of quantum software engineering.

The main objective of the educational offer is to provide the necessary technical expertise to apply for a job in the current quantum computing industry. As shown in the work of Maninder Kaur and Araceli Venegas-Gomez [11], there are different ways to get a job in quantum technology, and not only technical skills are needed, but also the so-called soft skills. In the article by Maninder Kaur and Araceli Venegas-Gomez [11], the best way to achieve this goal is to

participate in post-bachelor training programs. Whether through a combination of traditional learning pathways (masters, PhDs) and shorter, hands-on training with participation in real-world projects.

Currently, the academic offer on the subject of quantum computing is growing. Various training platforms, such as EdX or Udemy, and universities and organizations such as IBM, Google, and Microsoft offer courses and master's degrees focused on this area. However, most of these offers are focused on general introductory aspects or deal with quantum computing from a low level. In a few cases, such as the University of Chicago course offered at EdX [12], or the courses offered by the University of Castilla-La Mancha [13] or the University of Extremadura [14], the focus is on the basic aspects of Software Engineering, such as algorithm development, use of development platforms and simulation tools, application of classical software techniques to quantum environments, among others.

Within the framework of the creation of training programs, the Quantum Flagship initiative, which has presented the Quantum Technology Education portal [15], is noteworthy. This ambitious initiative has the fundamental objective of establishing a solid learning ecosystem that is essential for the dissemination and education of society with regard to quantum technologies. Another goal of the Quantum Flagship initiative for the years 2023-2026, is to foster the creation of a pan-European ecosystem of academic institutions and create an incentive structure for cooperation [16].

According to the work of Zhao [17], there are several key elements that every future quantum software engineer must understand and learn. These elements are:

- A concise overview of the key principles that underpin quantum computation. This topic encompasses essential concepts such as superposition, entanglement, interference, and quantum measurement.
- A description of qubits and fundamental quantum gates and their operations. Special attention should be given to quantum parallelism, which enables quantum computers to execute multiple calculations concurrently.
- A representation of quantum circuits and algorithms.
- An introduction to quantum algorithms focuses on existing examples such as the Shor or Grover algorithms.
- An overview of quantum hardware technologies elucidating the current state of quantum hardware development.
- An introduction to quantum programming languages and current software development kits.
- An initiation to quantum error correction and fault-tolerant quantum computing, explaining noise and decoherence concepts and error correction algorithms.
- An overview of quantum software applications in real-world use cases.
- A hands-on experience by presenting challenges in Quantum Information Processing.
- Practical Labs, Simulations, and Applied Projects for students to assess comprehension and potentially refine teaching methods.

Against this background, we see that efforts in developing quantum software course initiatives are needed to address the relative scarcity in the educational offer in the aspects of Quantum Software Engineering.

3.2. Careers Profiles. - In order to boost the development of quantum technologies and, in particular, those related to the field of Quantum Software Engineering, there must be professionals with appropriate training. This aspect is important, and the training line must be aligned with the generation of these new specific profiles. There is a document, European Competence Framework for Quantum Technologies (ECFQT) [18] that forms part of the Quantum Flagship project. This document sets out a scenario of professional profiles with certain competencies and skills in quantum technologies. These profiles are intended to serve as examples of the competencies that a person should acquire through training programs in preparation for employment in the industry. Also, in this document provides a general description of a Quantum Hardware/Software specialist, “someone who knows the big picture of the technology, related applications, and has an advanced understanding of the underlying quantum concepts (physics/mathematics/information theory), a role that has different characteristics in ‘traditional’ roles depending on experience”.

According to the ECFQT document, future professionals in the field of quantum computing must possess a series of knowledge and skills in some areas of quantum technologies according to their professional roles. In the case of Quantum Hardware-Software Specialists, these core skills and knowledge are the following:

- Having a foundational theoretical understanding of quantum physics principles (fundamental concepts, mathematical frameworks, qubit dynamics) and the underlying physical principles of quantum technologies (atomic physics, quantum optics, solid-state physics serving as the groundwork for quantum technologies). This knowledge enables the description and analysis of real-world issues using mathematical models, the selection of appropriate quantum methods for problem-solving, and the assurance that quantum physical criteria are satisfied.
- Advanced expertise in a specific aspect of quantum technology and a keen understanding of the interrelationships among various facets of quantum technology and classical systems. Proficiency in integrating methods, including those for hybrid quantum systems, and the capability to enhance or expand systems, amalgamate a quantum core with diverse components into a (hybrid) system or application (both hardware and software), and oversee quantum technology manufacturing processes. Cutting-edge knowledge of a particular facet of quantum technology and its interconnections with diverse facets. Proficiency in innovating within the realm of quantum technology, whether it involves the core, system, or application, and the capacity to evaluate and appraise solutions while pushing the boundaries of current technology.
- Familiarity with diverse potential applications and methodologies, along with their respective advantages and disadvantages, as well as relevant providers and experts. Specialized expertise in a chosen quantum technology application or specific application domain. Proficiency in evaluating and selecting the most suitable application or approach for a given problem or scenario.

As outlined in the European Competence Framework for Quantum Technologies [18], the educational journey of Quantum Hardware-Software specialists should begin with advanced qualifications in the traditional/classical field, followed by self-directed learning and participation in master's programs that encompass Quantum Technology.

Upon examining current opportunities in Quantum Computing on platforms such as LinkedIn⁷ or The Quantum Consortium⁸, it becomes evident that the majority of positions are centered around the foundational aspects of Quantum Computing. However, there is a growing trend of job offerings that necessitate classical software knowledge and skills. Many of these positions require a master's degree, a minimum of two years of experience, and proficiency in the English language.

4. Conclusions. - Quantum computing is a disruptive computing paradigm that offers solutions to challenges beyond the reach of classical computers. To effectively harness the power of quantum computers, the development of quantum software is paramount. As the demand for skilled professionals in this field grows, there is an urgent need for individuals with the necessary knowledge and expertise to fill job vacancies in the coming years.

To address this need, a concise overview of current educational opportunities in quantum computing and quantum software engineering is provided. It also examines the competencies required to excel as a quantum software specialist, which cover a wide range of capabilities, from basic theoretical knowledge to specialized expertise in specific areas. The paper also highlights the importance of understanding the connections between quantum and classical systems, as well as the ability to assess and select appropriate applications for real-world scenarios, which the future quantum software engineers should possess.

Acknowledgment. - This work has been funded with the support of the Ministry of Science and Innovation under project PID2021-124054OB-C31, the Regional Ministry of Economy, Science and Digital Agenda, and the Department of Economy and Infrastructure of the Government of Extremadura under project GR21133, and the European Union through the Recovery, Transformation and Resilience Plan - NextGenerationEU in the framework of the Agenda España Digital 2026.

⁷ <https://www.linkedin.com/>

⁸ <https://quantumconsortium.org/quantum-jobs/>

References

- [1] M. Piattini, G. Peterssen, R. Pérez-Castillo, J. L. Hevia, M. A. Serrano, G. Hernández, I. G. R. D. Guzmán, C. A. Paradela, M. Polo, E. Murina, L. Jiménez, J. C. Marqueño, R. Gallego, J. Tura, F. Phillipson, J. M. Murillo, A. Niño, and M. Rodríguez, “The Talavera Manifesto for Quantum Software Engineering and Programming,” pp. 1–5, 2020. [Online]. Available: https://www.aquantum.es/wp-content/uploads/2020/03/Talavera_Manifesto.pdf
- [2] E. Moguel, J. Berrocal, J. M. García-Alonso, and J. M. Murillo, “A roadmap for quantum software engineering: Applying the lessons learned from the classics,” in Q-SET@QCE, 2020. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-2705/short1.pdf>
- [3] J. Rojo, D. Valencia, J. Berrocal, E. Moguel, J. M. García-Alonso, and J. M. M. Rodríguez, “Trials and tribulations of developing hybrid quantum-classical microservices systems,” in Q-SET@QCE, 2021. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3008/paper2.pdf>
- [4] M. Kaur, “Overview of quantum initiatives worldwide 2023 - qureca,” <https://qureca.com/overview-of-quantum-initiatives-worldwide-2023/>, 2023.
- [5] European Commission, “Quantum - digital-strategy.ec.europa.eu,” <https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum>, 2024.
- [6] European Commission, “QIA – Quantum Internet Alliance,” <https://qt.eu/projects/communication/qia>.
- [7] European Commission, “OPENQKD - Open European Quantum Key Distribution Testbed,” <https://qt.eu/projects/archive/communication/openqkd>.
- [8] European Commission, “Quantum flagship projects — qt.eu,” <https://qt.eu/projects/>.
- [9] Ministry for Digital Transformation and of Civil Service of the Spanish Government, “Quantum Spain,” <https://quantumspain-project.es/>.
- [10] Handelsblatt, “Why europe is so strong in quantum technology start-ups,” Handelsblatt, 2024. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/start-ups-darumist-europa-bei-der-quantentechnologie-so-stark/100033331.html>
- [11] M. Kaur and A. Venegas-Gomez, “Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives,” *Optical Engineering*, vol. 61, no. 8, p. 081806, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.8.081806>
- [12] University of Chicago, “UChicagoX: Quantum Computer Systems Design I: Intro to Quantum Computation and Programming - edx.org.” [Online]. Available: <https://www.edx.org/learn/quantum-computing/university-of-chicago-quantumcomputer-systems-design-i-intro-to-quantum-computation-and-programming>
- [13] Universidad de Castilla-La Mancha, “Curso de Programación de Software Cuántico - Escuela Superior de Informática de UCLM — esi.uclm.es,” <https://esi.uclm.es/index.php/2023/02/07/curso-de-programacion-de-software-cuantico/>.
- [14] Universidad de Extremadura, “Curso uex 2023 – introducción al desarrollo de software cuántico, qserv - qserv.spilab.es,” <https://qserv.spilab.es/curso-uex-2023-introduccion-al-desarrollode-software-cuantico/>, 2023.
- [15] European Commission, “QTEdu,” <https://qtedu.eu/>, 2021.

[16] European Commission, “Quantum Flagship publishes preliminary Strategic Research and Industry Agenda,” <https://qt.eu/news/2022/quantum-flagship-publishes-preliminary-strategicresearch-and-industry-agenda>, 2022.

[17] J. Zhao, “Quantum software engineering: Landscapes and horizons,” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.07047>

[18] F. Greinert and R. Müller, “European Competence Framework for Quantum Technologies,” Apr. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10976836>

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

AMAM has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

EM has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

JGA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

AF has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

LMB has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

JMM has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Gobertí.

What's Special about Requirements Engineering for Quantum-Classical Systems?

¿Qué tiene de especial la ingeniería de requisitos para los sistemas cuántico-clásicos?

¿O que há de especial na engenharia de requisitos para sistemas quânticos-clássicos?

Horacio Pendenti^{1,}, Libardo Pantoja Yopez², Ricardo Perez Castillo³,
Julio Ariel Hurtado Alegria⁴, Leandro Antonelli⁵, Alejandro Fernandez⁶*

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Summary. - Quantum computing will impact all software development life cycle phases to a greater or lesser extent. With support from current literature, we discuss its potential impact on requirements engineering. We identified four main trends. A feasibility study focusing on quantum aspects is required before or after requirements analysis. The early analysis of the availability and the choice of hardware plays a bigger role than in developing classical software. Requirements are split into the functional, non-functional, classical, and quantum dimensions. The potential speedup of a quantum solution should be estimated and considered up-front.

Keywords: Requirements elicitation; Hybrid Quantum-Classical Systems; Quantum Requirements Engineering.

(*) Corresponding Author.

¹ Researcher. Universidad Nacional de Tierra, del Fuego, Ushuaia, Argentina. hpendenti@untdf.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0007-4740-8109>

² Researcher. Universidad del Cauca, Popayan, Colombia. wpantoja@unicauca.edu.co, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7235-6036>

³ Researcher. Universidad de Castilla – La Mancha, Talavera de la Reina, España. Ricardo.PdelCastillo@uclm.es, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9271-3184>

⁴ Researcher. Universidad del Cauca, Popayan, Colombia. ahurtado@unicauca.edu.co, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2508-0962>

⁵ Researcher. LIFIA, F.I., Universidad Nacional de La Plata and CAETI, F.T.I., Universidad Abierta Interamericana, La Plata, Argentina. lanto2004@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1388-0337>

⁶ Researcher. LIFIA, F.I., CICIPBA and Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. alejandro.fernandez@lifia.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7968-68717>

Resumen. - La computación cuántica afectará en mayor o menor medida a todas las fases del ciclo de vida del desarrollo de software. Con el apoyo de la literatura actual, analizamos su posible impacto en la ingeniería de requisitos. Identificamos cuatro tendencias principales. Se requiere un estudio de viabilidad centrado en los aspectos cuánticos antes o después del análisis de requisitos. El análisis temprano de la disponibilidad y la elección del hardware desempeña un papel más importante que en el desarrollo de software clásico. Los requisitos se dividen en dimensiones funcionales, no funcionales, clásicas y cuánticas. La aceleración potencial de una solución cuántica debe estimarse y considerarse de antemano.

Palabras clave: Obtención de requisitos; Sistemas híbridos cuántico-clásicos; Ingeniería de requisitos cuánticos.

Resumo. - A computação quântica impactará todas as fases do ciclo de vida do desenvolvimento de software em maior ou menor grau. Com o suporte da literatura atual, discutimos seu impacto potencial na engenharia de requisitos. Identificamos quatro tendências principais. Um estudo de viabilidade com foco em aspectos quânticos é necessário antes ou depois da análise de requisitos. A análise inicial da disponibilidade e a escolha do hardware desempenham um papel maior do que no desenvolvimento de software clássico. Os requisitos são divididos nas dimensões funcional, não funcional, clássica e quântica. A aceleração potencial de uma solução quântica deve ser estimada e considerada antecipadamente.

Palavras-chave: Elicitação de requisitos; Sistemas híbridos quânticos-clássicos; Engenharia de requisitos quânticos.

1. Introduction. - Software Engineering (SE) emerged as a response to the software crisis, characterized by the challenges and difficulties of developing complex software systems. The initial concepts in this discipline began to be discussed in the late 1960s and early 1970s [1], coinciding with a high degree of maturity in hardware technology, the proliferation of programming languages, and the software ecosystem stratifying into layers. Since then, SE has evolved to consolidate processes for the different challenges in developing complex and high-quality software, always on the same underlying hardware but adapting to and adopting new technologies and environmental needs. In recent years, a new technological milestone has become a reality with the emergence of the first real quantum computers, a development that SE cannot ignore [2].

Quantum computing is still in its early stages, with hardware that is still not entirely reliable but showing steady advances. Efforts in research and development by governments, companies, and other entities have been the primary drives of these advances. While significant progress is expected in the near future, with a variety of technologies and languages available, it is already possible to develop quantum programs and run them on real quantum computers from different providers and architectures [3, 4]. So, as this evolution takes place, it is expected that more problems can be solved using quantum algorithms on quantum computers. The conditions are met for SE to begin adapting its processes, incorporating the implications of this new technological milestone [2, 5].

It is not foreseen that quantum computers will replace classical computers entirely [6, 7]. Instead, quantum and classical software will operate together [8]. At the moment, quantum software requires classical programs acting as drivers, from which they obtain inputs and other parameters that are sometimes used to build quantum software dynamically. These drivers run quantum software on specific quantum computers in the cloud. Classical software is also devoted to receiving the execution answers from quantum software and interpreting them to provide an output to the end-users. This interface between both paradigms, in which a classical program requires a quantum service, reinforces the idea of defining Quantum Software Engineering (QSE) as a classical SE encompassing the peculiarities of quantum software development.

Various studies argue that the impact of quantum development within SE occurs to a greater or lesser extent in all phases of the Software Development Life Cycle (SDLC) [9, 2, 4, 10, 11]. In this work, we focus on the impact of this new technological development on requirements engineering. Our goal is to understand how the potential inclusion of quantum components in our software could change how we conduct requirements analysis, specification, validation, and management. To contribute to this discussion, we identify and review some of the most relevant contributions currently in the literature.

2. Requirements Engineering. - Requirements engineering constitutes a critical phase in the software development life cycle, laying the foundation for all subsequent design and development activities. It ensures stakeholder alignment, enhances cost and time efficiency, mitigates risks, assures quality, and facilitates regulatory compliance. Proper management of this phase significantly influences the project's success by establishing clear, achievable goals guiding the development process. This is especially critical in quantum-classical software development, where hybrid systems and various technologies are involved, necessitating precise and comprehensive requirements to integrate diverse functionalities seamlessly.

There are three main philosophies of software development: classic, agile, and hybrid. Every strategy organizes the development process and deals with the requirements differently. In a classic life cycle, extensive documentation is produced and consumed. It consists, for example, of software requirement specifications with hundreds of use cases specified incrementally [12] or as a waterfall [13]. In agile development, the communication of the requirements relies on a specific role within the team, the product owner, and on a simple documentation artifact, the User Story. The hybrid approach mixes the above strategies for balancing documentation, discipline, and agility and achieving specific business goals [14]. Any attempt to study how quantum computing affects requirements engineering should consider all three of them.

Use Cases and User Stories capture functional requirements. They describe the functionality the system must provide (algorithms that transform input to output data). In addition to functional requirements, some requirements describe

how the algorithms must be implemented regarding speed (performance), readability (legibility), resource usage, etc. These requirements are called non-functional requirements and condition the implementation of the functional requirements. Since quantum computing introduces radically different concepts and paradigms from classical systems, non-functional requirements have become especially relevant.

3. Requirements Engineering for Quantum Software. - In their Quantum Development Life Cycle (QDLC) proposal, Dey et al. [15] include a preliminary phase (called Quantum Feasibility Study) in which a detailed study of technical, operational, and economic feasibility specifically focused on quantum aspects is made. This initial phase, preceding requirement specification, addresses key questions: Is quantum hardware capable of supporting the required computation? Are there efficient algorithms to enhance traditional solution speed? Do we have the necessary scientific expertise? Do the quantum project's benefits justify its higher costs? Then, in the requirements specification phase, the availability of a quantum programming language and an appropriate compiler for the problem to be solved and the target hardware are analyzed. The availability of other tools related to quantum development, such as Quantum Integrator Plugins, Logical Quantum Circuit Synthesizer for circuit optimizations, and Classical Validators, is also studied in this preliminary phase. Furthermore, the quantum hardware to be used is specified, where the *Quantum Volume* metric, which includes the number of qubits, error rates, and qubit connectivity, is an important part. In addition, the Physical Machine Description (PMD), which describes the quantum hardware technology, completes the specification of quantum requirements. Similarly, Hernández González et al. [16], while trying to approach quantum software development from an agile perspective, suggest adding an initial Inception phase to an agile methodology such as Scrum (which then becomes a hybrid methodology). In the Inception phase, all project participants become familiar with the project characteristics and technological requirements.

The above discussion includes several aspects and activities that current research considers in different phases and/or with different denominations, groupings, or intensities. Such is the case of the work by Weder et al. [9]. They propose a phase after the requirements analysis, called quantum-classical splitting, within a general model of QDLC that orchestrates quantum and classical developments through workflows. Perez Castillo et al. [11] propose a quantum life cycle, adapted from the Incremental Commitment Spiral Model (ICSM), with an exploration phase in which the requirements play an important role. This proposal to adapt the initial phase of the classical SDLC to quantum development shows that further study of classical SE processes, such as Requirements Engineering, is necessary.

Adapting requirements engineering processes is necessary to cope with the constraints of quantum computing and to establish solid foundations for effective Quantum Software Requirements Engineering (QSRE). However, how to accomplish this remains unclear. The initial studies in this field exhibit varied content, ranging from those suggesting a starting point for discussion to those proposing solutions to specific QSRE issues. Among those pursuing a solution, one suggestion involves dividing requirements for quantum software into two well-defined sets: domain requirements and quantum requirements [17]. The former requires knowledge of the problem domain similar to traditional development practices, while the latter necessitates familiarity with Quantum Computing (QC). This latter case poses a significant challenge for Software Engineers, as there is generally a lack of domain-specific knowledge in quantum mechanics [18]. In another surveyed study, a review of the impact of quantum computing on all phases of a classic waterfall SDLC is conducted, where the brief Requirements phase suggests that in the process of specifying requirements, it is crucial to define user acceptability early on and establish critical performance requirements to determine if the benefits (still not fully defined) of quantum technology are sufficient over classical computing [19].

When studying more deeply the possibilities of an improved QSRE proposal, some recent advancements are taken into account, which, among other characteristics, suggest a Quantum Development Life Cycle (QDLC) incorporating modifications derived from the effects of quantum computing, followed by specific suggestions for each phase. While some authors propose adding the majority of quantum aspects in a phase preceding QSRE [15], others choose to do so in a subsequent one (such as [9], in a phase called Quantum Split), others maintain it in the same QSRE phase [20], and others discuss requirements without specifying their location in the life cycle. These works are complemented by other contributions that enrich this discussion in scope and depth. Among these, the studies of Saraiva et al. [21] are analyzed, framing Non-Functional Requirements (NFR) derived from quantum hardware in ISO 25010 quality model, and the NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) Analyzer [22] that analyzes and selects an appropriate algorithm

implementation and a suitable quantum computer for a chosen quantum algorithm and specific input data.

Classifying requirements is a common proposal for several of the studied works. They propose identifying the functional and non-functional requirements, as in classical RE, and classifying them into classical, quantum, or hybrid categories. In the case of hybrid requirements, further disaggregation is necessary to accurately determine whether they belong to the classical or quantum domain. Regardless, whether a requirement should be fulfilled by a quantum or classical service is not a trivial decision. In addition to expert opinion, utilizing a framework such as the one proposed in [23] can provide additional assistance in decision-making.

Another crucial aspect of handling requirements is conducting a feasibility study for each requirement. With this goal in mind, a practical approach to this analysis focuses on three main aspects: Quantum Technical Feasibility, Quantum Operational Feasibility, and Economic Feasibility. The first aspect entails analyzing the existence of NISQ quantum hardware capable of supporting the algorithm. For this, the width (Qubit count) of the quantum algorithm is an essential metric, as well as the Quantum Volume (QV) [24], which encompasses factors such as depth (length of circuit layers). Depth plays a crucial role in determining the QV and consequently impacts the reliability of the software. At this stage, tools like the one described in [25] may be useful for estimating the necessary quantum hardware applicable to various quantum technologies and strategies for fault tolerant encoding. The Quantum Operational Feasibility involves assessing the extent to which the required software applies to solving the business problem and meeting user requirements. In this regard, it is necessary to address the availability of appropriate algorithms, assessing whether the less complex quantum part will result in a significant speedup and whether the more complex one will not entail an unreasonable cost increase. Furthermore, to complete this task, analyzing the availability of skills in quantum computing expertise within the development team is necessary. And finally, Economic Feasibility evaluates if the resulting software will represent a useful gain for the client.

When a requirement has been classified as “quantum” and “feasible,” it is advisable to record in its specification whether the algorithm implementing this solution can be improved with corrections or new implementations. Thus, it will be easier to leverage advancements made in associated algorithms, aiming to enhance the system’s reliability and efficiency.

Specifying all the classical and quantum software required for development throughout the project is necessary. Among the required software, various categories can be identified, such as Quantum Tools, which essentially refer to programming languages and compilers; Quantum Integrator Plugins, which are interfaces between the programming language and the simulator or quantum hardware; Logical Quantum Circuit Synthesizer, an optimizer of quantum circuits aimed at improving their efficiency and reducing error probabilities; Classical Validator, the classical software for verifying the solution provided by a quantum algorithm; and Classical Software Requirement Module, a classical software tool for systematically organizing all requirements in a Software Requirement Specification (SRS) document.

The Specifications section considers both quantum and classical hardware requirements for the project. Thus, it is necessary to specify at least the Qubit count, which is the number of qubits required by the quantum computer; the QV, a single-number metric that measures the largest random circuit of equal width and depth that the computer successfully implements; the Physical Machine Description (PMD) of the underlying quantum hardware technology, the physical arrangement of qubits, error rates of quantum operations, qubit connectivity, and other aspects related to the physical implementation of the quantum system; and the Classical Hardware Processor, which is the classical hardware specification, running a classical operating system and tools working synergistically with underlying quantum hardware.

4. Conclusions. - This article examined various studies in the field of QSRE, most of them focusing on requirements elicitation and specification. Little literature was found on requirements verification, validation, and management. Much remains to be done in this regard. However, by applying proven techniques from classical requirements engineering suitably adapted to quantum computing, consistent requirements and design models can be achieved. Such is the case developed by Yue et al. [20] for requirements or the UML extensions proposed by Pérez-Castillo et al. [26], where a design model can be achieved using a widely used tool in the software engineering community. A consistent

classical-quantum requirement and design model is an important starting point for verifying and validating requirements.

One converging aspect in the literature is the necessity to classify requirements into functional and non-functional categories, followed by further sub-classification into quantum, classical, or hybrid. This initial task is common across various approaches and precedes the analysis of the specific challenges posed by quantum software.

Another activity that should be included early in the software development process, even before requirements analysis, is a quantum feasibility study. This study determines quantum requirements' technical, operational, and economic feasibility.

Throughout this article, a highlighted aspect is the significant impact of hardware choice on the RE process. The type of computer to be used, whether gate-based, annealer-based, or both, and various hardware-dependent metrics are highly relevant factors that must be analyzed during this life cycle phase. However, significant advancements in quantum technology are expected to gradually alleviate the strong constraints of quantum hardware. Furthermore, the recent start of a transition towards Fault-Tolerant Quantum Computing (FTQC) [27] invites us to consider both QSRE and the entire QSE with that perspective in mind. Therefore, the discussion in this field remains wide open for ongoing impact assessment and the search for more suitable alternatives for QSRE tailored to the achieved hardware.

Although the feasibility study mentioned earlier includes the economic aspect, a more comprehensive investigation is required to evaluate the relative benefits of the speedup provided by the quantum solution compared to the increased associated costs. The involvement of a collaborative team of quantum experts and the utilization of quantum facilities, among other factors, may contribute to raising the project budget.

Finally, regarding the methodological approach used for the QRE process, the analyzed research does not thoroughly explore requirements specifically applied to agile, classical, or hybrid methodologies. However, according to the various proposed QDLC models, predominantly classical methodology practices are observed, with iteration as a prominent element. Nonetheless, some less thorough studies suggest that modified agile practices transformed into hybrids can be applied. Regardless of the methodology used, the key activities or discussions concluded in this work should be considered in a quantum software requirement engineering process.

References

- [1] I. Sommerville, *Software Engineering*, 10th ed. Pearson Education Limited, 2016.
- [2] M. Piattini, M. Serrano, R. Perez-Castillo, G. Petersen, and J. L. Hevia, “Toward a quantum software engineering,” *IT Professional*, vol. 23, no. 1, pp. 62–66, 2021.
- [3] M. A. Serrano, J. A. Cruz-Lemus, R. Perez-Castillo, and M. Piattini, “Quantum software components and platforms: Overview and quality assessment,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 8, dec 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3548679>
- [4] R. Pérez-Castillo, M. A. Serrano, and M. Piattini, “Software modernization to embrace quantum technology,” *Advances in Engineering Software*, vol. 151, p. 102933, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997820309790>
- [5] M. Piattini, G. Peterssen, R. Pérez-Castillo, J. L. Hevia, M. A. Serrano, G. Hernández, I. G. R. de Guzmán, C. A. Paradela, M. Polo, E. Murina, and others, “The talavera manifesto for quantum software engineering and programming,” in *QANSWER*, 2020, pp. 1–5. [Online]. Available: https://www.aquantum.es/wp-content/uploads/2020/03/Talavera_Manifesto.pdf
- [6] M. Piattini and J. M. Murillo, “Quantum software engineering landscape and challenges,” in *Quantum Software Engineering*. Springer, 2022, pp. 25–38.
- [7] F. Regazzoni, A. Fowler, and I. Polian, “Quantum era challenges for classical computers,” in *Proceedings of the 18th International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation*, ser. SAMOS '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, p. 173–178. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3229631.3264737>
- [8] A. D. Carleton, E. Harper, J. E. Robert, M. H. Klein, D. De Niz, E. Desautels, J. B. Goodenough, C. Holland, I. Ozkaya, and D. Schmidt, “Architecting the future of software engineering: A national agenda for software engineering research and development,” *Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Report*, November 2021 2021. [Online]. Available: <https://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=741193>
- [9] B. Weder, J. Barzen, F. Leymann, and D. Vietz, *Quantum Software Development Lifecycle*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 61–83.
- [10] M. A. Akbar, A. A. Khan, and S. Rafi, “A systematic decision-making framework for tackling quantum software engineering challenges,” *Automated Software Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 1–44, nov 2023.
- [11] R. Pérez-Castillo, M. A. Serrano, J. A. Cruz-Lemus, and M. Piattini, “Guidelines to use the incremental commitment spiral model for developing quantum-classical systems,” *Quantum Information and Computation*, vol. 24, no. 1&2, pp. 71–88, 2024. [Online]. Available: <https://www.rintonpress.com/xxqic24/qic-24-12/0071-0088.pdf>
- [12] L. Pareto, “Extended abstract: requirements modeling within iterative, incremental processes,” in *Proceedings. Second ACM and IEEE International Conference on Formal Methods and Models for Co-Design*, 2005. MEMOCODE '05., 2005, pp. 249–250.
- [13] U. S. Shah, D. C. Jinwala, and S. J. Patel, “An excursion to software development life cycle models: An old to ever-growing models,” *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 41, no. 1, p. 1–6, feb 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2853073.2853080>
- [14] J. Marin, J. Hurtado, M. Bastarrica, and L. Silvestre, “Tailoring hybrid software processes in a medium-size

software company,” in Proceedings of the 38th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing, ser. SAC '23. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, p. 1042–1050. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3555776.3577709>

[15] N. Dey, M. Ghosh, S. S. Kundu, and A. Chakrabarti, “Qdlc – the quantum development life cycle,” ArXiv e-prints, oct 2020.

[16] G. J. Hernández González and C. A. Paradela, “Quantum Agile Development Framework,” in Quality of Information and Communications Technology, M. Shepperd, F. Brito e Abreu, A. Rodrigues da Silva, and R. Pérez-Castillo, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 284–291.

[17] P. Spoletini, “Towards quantum requirements engineering,” in 2023 IEEE 31st International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). IEEE, 2023, pp. 04–05.

[18] M. R. El aoun, H. Li, F. Khomh, and M. Openja, “Understanding quantum software engineering challenges an empirical study on stack exchange forums and github issues,” in 2021 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME), 2021, pp. 343–354.

[19] J. Zhao, “Quantum software engineering: Landscapes and horizons,” arXiv, 2020, ISBN: 2007.07047v2.

[20] T. Yue, S. Ali, and P. Arcaini, “Towards quantum software requirements engineering,” in 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), vol. 02, 2023, pp. 161–164. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10313750>

[21] L. Saraiva, E. H. Haeusler, V. Costa, and M. Kalinowski, “Non-functional requirements for quantum programs,” in 2nd Quantum Software Engineering and Technology Workshop (QSET), colocated with IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE21), Virtual Conference, Oct 19, 2021.

[22] M. Salm, J. Barzen, U. Breitenbücher, F. Leymann, B. Weder, and K. Wild, “The nisq analyzer: Automating the selection of quantum computers for quantum algorithms,” in Service-Oriented Computing, S. Dustdar, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 66–85.

[23] N. Chancellor, R. Cumming, and T. Thomas, “Toward a standardized methodology for constructing quantum computing use cases,” 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.05846>

[24] A. W. Cross, L. S. Bishop, S. Sheldon, P. D. Nation, and J. M. Gambetta, “Validating quantum computers using randomized model circuits,” *Phys. Rev. A*, vol. 100, p. 032328, Sep 2019. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.100.032328>

[25] M. Suchara, J. Kubiatiowicz, A. Faruque, F. T. Chong, C.-Y. Lai, and G. Paz, “Qure: The quantum resource estimator toolbox,” in 2013 IEEE 31st International Conference on Computer Design (ICCD), 2013, pp. 419–426.

[26] R. Pérez-Castillo and M. Piattini, “Design of classical-quantum systems with uml,” *Computing*, vol. 104, no. 11, pp. 2375–2403, 2022.

[27] J. W. Z. Lau, K. H. Lim, H. Shrotriya, and L. C. Kwek, “Nisq computing: where are we and where do we go?” *AAPPS bulletin*, vol. 32, no. 1, p. 27, 2022.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

HP has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

LPY has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

RPC has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

JAHA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

LA has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

AF has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Gobertí.

Una adaptación del UML Testing Profile para el Testing de Software Cuántico

An Adaptation of the UML Testing Profile for Quantum Software Testing

Uma Adaptação do Perfil de Teste UML para Teste de Software Quântico

Ignacio García Rodríguez de Guzmán ^{1,*}, Moisés Rodríguez Monje ²,

Mario Piattini Velthuis ³, María Teresa Merchan Quintana ⁴

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Resumen. - Este estudio explora cómo la Ingeniería del Software Clásico, especialmente la ingeniería dirigida por modelos en testing, puede contribuir a la mejora de la Ingeniería del Software Cuántico (Quantum Software Engineering, QSE). Adoptando principios de "agnosticismo", se busca desarrollar procesos de ingeniería del software que sean independientes de cualquier lenguaje o plataforma específicos para software cuántico. Actualmente, el testing de software cuántico se considera un área emergente con múltiples propuestas focalizadas en lenguajes o plataformas particulares. Este trabajo propone una extensión del UML Testing Profile 2.0 para modelar pruebas de software cuántico, permitiendo (i) la exploración de nuevos conceptos necesarios para especificar estas pruebas, (ii) el modelado de diferentes tipos de pruebas durante el diseño del software cuántico, y (iii) la especificación de pruebas independiente del lenguaje o plataforma de ejecución. Esta aproximación busca establecer una base más flexible y extensible para el testing en QSE.

Palabras clave: Ingeniería de software cuántica; Pruebas de software cuánticas; Perfil de pruebas UML; Pruebas de software.

(*) Autor de correspondencia.

¹ Catedrático de Universidad, Universidad de Castilla-La Mancha. Ignacio.GRodriguez@uclm.es,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0038-0942>

² Profesor Titular de Universidad, Universidad de Castilla-La Mancha. Moises.Rodriguez@uclm.es,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2155-7409>

³ Profesor Titular de Universidad, Universidad de Castilla-La Mancha. Mario.Piattini@uclm.es,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7212-8279>

⁴ Estudiante de Máster, Universidad de Castilla-La Mancha. MTeresa.Merchan@alu.uclm.es,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-7162-8270>

Summary. - This study explores how Classical Software Engineering, especially model-driven engineering in testing, can contribute to the improvement of Quantum Software Engineering (QSE). Adopting principles of "agnosticism", it seeks to develop software engineering processes that are independent of any specific language or platform for quantum software. Currently, quantum software testing is considered an emerging area with multiple proposals focused on particular languages or platforms. This work proposes an extension of the UML Testing Profile 2.0 to model quantum software testing, allowing (i) the exploration of new concepts needed to specify these tests, (ii) the modelling of different types of tests during quantum software design, and (iii) the specification of tests independent of the execution language or platform. This approach aims to establish a more flexible and extensible basis for testing in QSE.

Keywords: Quantum Software Engineering; Quantum Software Testing; UML Testing Profile; Software Testing

Resumo. - Este estudo explora como a Engenharia de Software Clássica, especialmente a engenharia orientada por modelos em testes, pode contribuir para a melhoria da Engenharia de Software Quântica (QSE). Adoptando princípios de "agnosticismo", procura desenvolver processos de engenharia de software que sejam independentes de qualquer linguagem ou plataforma específica para software quântico. Atualmente, o teste de software quântico é considerado uma área emergente com múltiplas propostas centradas em linguagens ou plataformas específicas. Este trabalho propõe uma extensão do Perfil de Testes UML 2.0 para modelar testes de software quântico, permitindo (i) a exploração de novos conceitos necessários para a especificação destes testes, (ii) a modelação de diferentes tipos de testes durante a concepção de software quântico, e (iii) a especificação de testes independentes da linguagem ou plataforma de execução. Esta abordagem tem como objetivo estabelecer uma base mais flexível e extensível para os testes em QSE.

Palavras-chave: Engenharia de Software Quantum; Teste de Software Quantum; Perfil de Teste UML; Teste de Software.

1. Introduction. - Aunque la computación cuántica ha irrumpido con fuerza en el panorama actual con augurios de resolver problemas que, hasta el momento, se plantean como retos fuera del alcance de la tecnología “clásica”. Sin embargo, no debemos olvidar que nos encontramos en los albores de un paradigma tecnológico que de la misma forma que la computación clásica, comenzó con altos niveles de inmadurez.

En este momento, los principios de la Ingeniería del Software Cuántico (QSE) [12] establecen un *roadmap* a seguir mediante el cual, llegar a generar conocimiento, técnicas y herramientas mediante las cuales hacer sostenible el desarrollo de software cuántico, evitando así caer en potenciales crisis (del software cuántico) resultantes de la diferencia entre la expectativa generada por la computación cuántica y la capacidad real de la industria para suministrar soluciones.

Uno de los retos que están surgiendo irremediablemente, es la aparición de múltiples lenguajes y plataformas de ejecución de software cuántico (simuladores y computadores cuánticos de distintos proveedores) con sus propias características y particularidades. Las plataformas de ejecución plantean serias diferencias tecnológicas entre sí como, por ejemplo, algo tan básico como la topología de sus QPU (*Quantum Processor Unit*) o los juegos de instrucciones básicos (puertas cuánticas disponibles para ejecutar el software cuántico).

La heterogeneidad en los sistemas software no es un reto desconocido para la industria y la academia, que ya ha propuesto soluciones eficaces a la hora de tratar con esta situación. La ingeniería dirigida por modelos [6] establece una pila de niveles que van, desde vistas de muy alto nivel (totalmente agnósticas a la tecnología subyacente), hasta modelos muy cercanos a la plataforma para la cual se generará el código ejecutable. Este paradigma, resulta de especial interés para la QSE donde (i) el agnosticismo es uno de los principios básicos aplicables a todas sus áreas, y (ii) donde la heterogeneidad de sus actuales propuestas motiva la necesidad de mecanismos que permitan trabajar con software cuántico con independencia de los servicios de ejecución donde el software cuántico vaya a ser ejecutado (ya sea incluso un simulador cuántico, los cuales suelen ser más flexibles y desde donde es a veces difícil exportar el código directamente a un computador cuántico).

Uno de los aspectos de la QSE que tiene más impacto en la calidad del software cuántico (y que convendría abordar por su relevancia [11, 13]), donde el modelado podría resultar beneficioso, es el testing. En la actualidad, y aunque comienzan a surgir propuestas de testing orientadas a la QSE[14], el estado del testing cuántico es precario [3]. Por lo que resulta necesario comenzar a potenciar este proceso desde la base, considerando tanto la definición de conceptos básicos como estandarización de los principios. Así, el testing cuántico sería independiente de las tecnologías y las plataformas cuánticas.

El testing del software, como proceso clásico de la Ingeniería del Software, se organiza en base a un conjunto de conceptos, actividades y procesos comunes. Todos estos elementos vienen descritos en el estándar ISO 29119 [8], que constituyen (en sus partes I y II) unas guías de referencia para la identificación de los (i) conceptos relativos al proceso de testing y (ii) sus procesos principales.

A partir de la norma ISO 29119 podemos encontrar representaciones basadas en el paradigma de ingeniería dirigida de modelos (*Model Driven Engineering*, MDE), mediante las cuales, poder diseñar y generar los artefactos de prueba dentro de los ciclos de desarrollo del software, aportando (i) altos niveles de automatización e (ii) independencia del proceso de prueba con respecto a la tecnología bajo la que se desarrollan los SUT (*System Under Test*). Esta característica de la MDE, en el contexto del testing del software, aporta ese agnosticismo que se promueve para QSE.

En el ámbito del testing del software y la MDE, existe un metamodelo/perfil denominado UML Testing Profile 2.0 (UMLTP) [9], que tiene como objetivo establecer el conjunto de conceptos relativos al testing del software (con un gran paralelismo a los identificados por la ISO 29119), organizados en forma de metamodelo, y basado en el metamodelo UML 2.0 para la especificación de sistemas software.

Llegados a este punto, en este trabajo se propone partir de este artefacto, de aplicabilidad ya probada en el mundo de la industria, para su análisis y extensión de forma que, al igual que ocurre con el software clásico, el software cuántico

pueda beneficiarse del diseño, modelado y generación de los artefactos involucrados en el proceso de testing. Los beneficios de esta extensión garantizarían: (i) el agnosticismo del proceso de testing (en el marco de la QSE); (ii) una mejora en el estado del arte con respecto a herramientas y metodologías para el desarrollo de software cuántico y, (iii) una oportunidad para avanzar hacia el testing de sistemas híbridos (desarrollados por software cuántico y clásico), ya que esta extensión cubriría los artefactos de testing de ambos paradigmas).

Así, en este artículo se presenta:

- Estudio sobre los conceptos relativos el proceso de testing adicionales a los existentes en la ISO/IEC 29119. Dado que UMLTP está basado en este estándar para la definición de su conjunto de estereotipos, cualquier extensión del UMLTP debería por lo tanto basarse en una versión de la ISO/IEC 29119 que también considerara la computación cuántica. Al no existir dicha extensión o versión de la norma, se propone por lo tanto un conjunto de términos novedosos sobre los cuales, plantear la posterior extensión del UMLTP.
- Propuesta de un conjunto nuevo de estereotipos para el UMLTP basado en los nuevos conceptos definidos para la norma ISO/IEC 29119. Dicha propuesta, se realiza en base a las distintas vistas en las que se organiza el UMLTP.

Este artículo se organiza de la siguiente forma: la sección II presenta un breve estado del arte donde se dan algunas nociones sobre el UML Testing Profile, y se revisan algunas de las propuestas de taxonomía relacionadas con el testing del software clásico; la sección III realiza un breve análisis de la norma ISO 29119; la sección IV presenta la propuesta de extensión de UMLTP para incluir conceptos relativos al software cuántico necesarios para modelar pruebas en este paradigma; finalmente, la sección V presenta algunas conclusiones.

2. Estado del Arte. - Esta sección presenta, algunos aspectos relevantes al trabajo como son: (i) la descripción del UML Testing Profile 2.0, que se toma como perfil candidato a extender para poder modelar artefactos de prueba en el software cuántico; y (ii) distintas taxonomías del testing clásico, donde se proponen distintas clasificaciones para los elementos, técnicas y tecnologías relacionadas con el testing del software. El estado del arte, por lo tanto, se enfoca en revisar aquellos aspectos relativos a la clasificación de conceptos del testing y su extensión al paradigma del software cuántico.

2.1. UML Testing Profile.. - El "UML Testing Profile 2.0" (UMLTP) es una especificación desarrollada por el OMG que define cómo modelar pruebas de software dentro del entorno de la Lenguaje Unificado de Modelado (UML). El perfil se diseñó para integrar y adaptar los conceptos tradicionales de pruebas de software al modelado UML, con el objetivo de facilitar un enfoque más coherente y estandarizado para el diseño y ejecución de pruebas.

UTP 2.0 extiende UML para abordar necesidades específicas de las pruebas, proporcionando elementos de modelado que representan casos de prueba, suites de pruebas, estrategias de pruebas, y otros artefactos relacionados con las pruebas. Además, permite la descripción de la estructura de las pruebas, su comportamiento, y los resultados esperados de manera que puedan ser gestionados y comprendidos dentro del ciclo de vida del desarrollo de software.

Uno de los principales componentes de UTP 2.0 es su capacidad para modelar tanto pruebas estructurales como de comportamiento. Esto incluye la capacidad de definir pruebas a nivel de componente y a nivel de sistema, lo que permite a los ingenieros de prueba especificar cómo deben interactuar los componentes entre sí y cómo deben comportarse en el contexto de sistemas más amplios.

El perfil también se integra con otros perfiles de UML para proporcionar una vista más completa del desarrollo y pruebas de sistemas. Esto facilita una mejor colaboración entre los equipos de desarrollo y pruebas, asegurando que los modelos de pruebas estén alineados con los modelos de desarrollo y los requisitos del sistema.

UTP 2.0 es una herramienta valiosa para los desarrolladores y testers que utilizan UML para diseñar y documentar sistemas de software, ya que proporciona una metodología robusta para integrar las pruebas en el proceso de modelado, asegurando que las pruebas se consideren como parte integral del proceso de desarrollo de software desde las primeras etapas.

2.2. Taxonomías de Testing Clásico. - El desarrollo de una extensión para el modelado de artefactos de testing del software cuántico implica partir de una representación adecuada, donde los conceptos relevantes deben estar presentes. En la literatura se pueden encontrar varias clasificaciones y/o taxonomías que recogen dichos conceptos así como sus relaciones.

En [5], los autores proponen una taxonomía donde se identifican los elementos presentes en el testing desde 6 perspectivas: Tester, contexto, actividad, método, artefactos y entorno (ver Figura I). Aunque dicha taxonomía cubre muchos de los conceptos y técnicas presentes en el proceso de testing, no aborda los procesos que sí se consideran en la ISO 29119, así como otros conceptos relevantes.

Por otro lado, en [15] se presenta una taxonomía de herramientas para automatizar el testing del software. Dicho trabajo se centra en las herramientas de testing, donde a priori las clasifica en tres grandes categorías categorías: testing funcional, testing de gestión y loading testing (para cada una de las cuales distingue entre herramientas *open source* o comerciales). Posteriormente y en un intento por ayudar a clasificar las herramientas, este trabajo propone un conjunto de criterios para evaluar las herramientas y poder así clasificarlas: soportado por navegador web, requiere licencia, dispone de sitio web con información, precio, herramientas soportadas, lenguajes de programación que soporta. Aunque a priori, esta taxonomía permite clasificar herramientas, no sirve en tanto en cuanto no contribuye a estandarizar el proceso de testing. Sin embargo, en [2] se presenta una clasificación de los distintos tipos de testing, lo cual desde el punto de vista de la estandarización, sí que puede ser más representativo. En este trabajo, se identifican 7 grandes tipos (ver Figura II): el testing de modelos, el testing del software, el testing de centros de datos, el testing de entornos o herramientas, el testing del hardware, y el testing de sistemas.

En [16], se focaliza exclusivamente en el testing de proyectos software, para lo que se proponen 8 categorías: proyectos de escritorio, web, dispositivos móviles, servicios, procesos, control del tiempo, migración de sistemas, almacenamiento y protocolos. Aunque el trabajo despliega posteriormente esta primera clasificación en categorías concretas (ver ejemplo de ello en Figura III), no se tiene en cuenta otros conceptos más genéricos y básicos del proceso del testing, lo cual puede influir en gran medida en cómo se caracterizan dichos tipos proyecto.

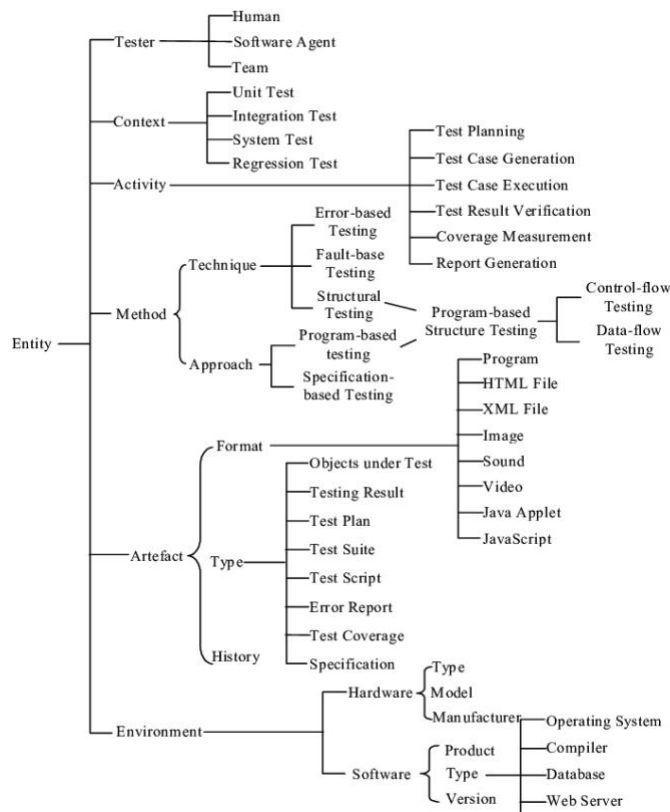


Figura I. Taxonomía del concepto del testing del software [5]

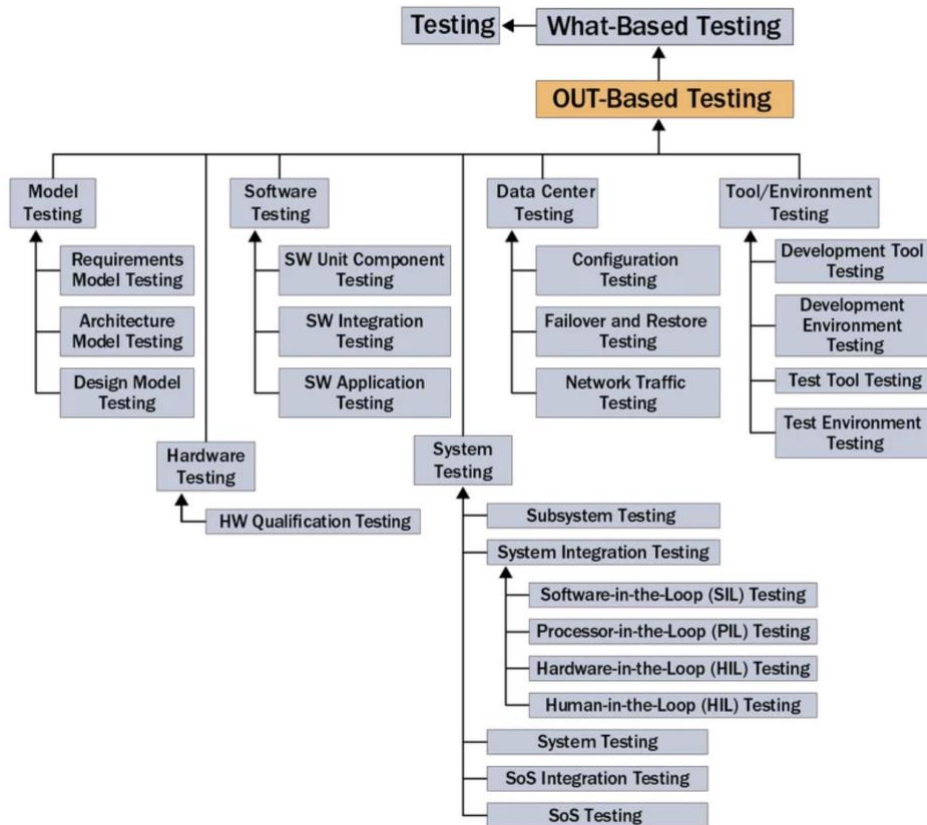


Figura II. Taxonomía de los tipos de testing [2]

Categoría	Sub-categoría
Web	Páginas o sitios web
	Webs tradicionales
	Rich Internet Applications (RIA)
	Web 2.0

Figura III. Taxonomía de los tipos de testing [16]

Tal y como se ha podido observar, las taxonomías o clasificaciones existentes se centran en aspectos concretos del testing del software que podrían incluso ser transversales al paradigma computacional en el que se desarrolle en software. Por este motivo, consideramos que el estándar ISO 29119 resulta ser la fuente más fiable para comenzar a replantear el conjunto de elementos del testing que, de cara al testing de software cuántico, deben ser mantenidos, redefinidos, o agregados para poder modelar los artefactos de prueba para este nuevo paradigma.

3. Análisis del estándar ISO 29119. - El metamodelo UML Testing Profile 2.0 representa, mediante una notación de modelo (y con propósito de modelado) los distintos conceptos relacionados con el testing de software. Dichos conceptos, están estandarizados y así se recogen la mayoría en la norma ISO/IEC 29119-1 [7], aunque sería más correcto decir que fruto de la estandarización del proceso de testing del software y de sus términos relacionados, se ha desarrollado el UMLTP, que permite llevar una gestión de los artefactos de prueba de un sistema bajo prueba a nivel de modelo.

Por este motivo, como primer paso para la extensión del UMLTP se ha llevado a cabo un estudio de la parte 1 del estándar ISO 29119, donde se establecen los conceptos entorno a los cuales se describen los distintos procesos del testing de software. De estos conceptos, posteriormente, se han propuesto especializaciones en el UMLTP, en base a la necesidad de incluirlos en los modelos según su relevancia o existencia en la literatura.

3.1. Nuevos conceptos en base al estándar. - A continuación, en la TABLE I se describen los nuevos conceptos propuestos para el estándar ISO/IEC 29119, indicando en su caso el concepto original del cual se derivan.

Concepto Original	Concepto Derivado	Definición
Actual results (3.6)	Quantum actual results	Conjunto de comportamientos o condiciones de un <i>Quantum Test Item</i> , o conjunto de condiciones de datos asociados o el entorno de prueba, observado como resultado de la ejecución de los tests, y que <u>se corresponderían con los datos de telemetría del simulador o computador cuántico.</u>
Simulator (3.154)	Quantum Simulator	Entorno de prueba, sobre el cual se debe tener en cuenta que no funciona como un sistema físico puro, y del cual es necesario conocer cualquier parámetro sobre su funcionamiento con respecto a la desviación que presenta con respecto a un computador cuántico.
-	Shot	Ejecución única de un sistema bajo prueba en el contexto de un caso de prueba.
-	Statistic testing	Técnica de prueba para sistemas cuánticos, mediante la cual se realiza un análisis del resultado del caso de prueba cuántico en base a un número de <i>shots</i> , para verificar el comportamiento esperado.
Test case (3.172)	Quantum Test Case	Caso de prueba específico para sistemas cuánticos, donde entre otros parámetros, hay que especificar el número de <i>shots</i> requeridos.
Test case (3.172)	Deterministic Test Case	Caso concreto de prueba para circuitos cuánticos deterministas, donde se espera un resultado concreto, un valor único derivado de un circuito sin comportamiento estocástico.
Test case (3.172)	Non-Deterministic Test Case	Caso concreto de prueba para circuitos cuánticos no deterministas, donde se espera un resultado expresado como una distribución de probabilidades. Un circuito estocástico, según su definición, podría incluso tener un comportamiento determinista.
Test coverage (3.177)	Quantum Test Coverage	Grado, expresado como un porcentaje, en el cual se han ejecutado los distintos <i>Quantum Test Coverage Item</i> del circuito cuántico por el efecto de un <i>Quantum Test Case</i> .
Test coverage item (3.178)	Quantum Test Coverage Item	Cualquiera de los artefactos que pueden emplearse para la definición de un circuito (puerta, oráculos, cúbits, etc.)
Test data (3.179)	Quantum Test Data	Definición de un conjunto de estados de los qubits requeridos para la ejecución del circuito cuántico bajo prueba.
Test environment (3.184)	Test quantum environment	Entorno o servicio de ejecución de software cuántico necesario para ejecutar un test cuántico. Incluirá un Quantum computer o un Quantum Simulator. Incluirá un entorno de ejecución clásico, desde el cual se conducirá la prueba del software cuántico.

Test environment item (3.185)	Quantum test environment item	Parte de un <i>test quantum environment</i> que tiene como fin exclusivo la ejecución de software cuántico. Puede ser un <i>Quantum Simulator</i> , ejecutado sobre un entorno clásico o un <i>Quantum computer</i> .
Test item (3.199)	Quantum test item	Producto de carácter cuántico que será testeado (circuito cuántico, código cuántico, software híbrido, etc.).
Test model (3.203)	Quantum test model	Representación de un <i>quantum test item</i> , que permite focalizar el proceso de testing en un circuito completo o una de sus partes integrantes.
Test Oracle problema (3.208)	Quantum test Oracle problema strategy	Mecanismo para determinar en qué medida un <i>Quantum Test Case</i> ha pasado o fallado en el contexto de sus condiciones de cumplimiento. Para <u>condiciones deterministas</u> las estrategias son (i) la prueba del SWAP y la prueba del NOT.
Test result (3.218)	Quantum test result	En el caso de software cuántico hay que comparar el resultado obtenido por el <i>quantum test case</i> con el resultado esperado. Esta comprobación variará según la naturaleza del circuito.

Tabla I. Conceptos de testing cuántico derivados de la ISO/IEC 29119

4. Definición de nuevas etiquetas para el UML Testing Profile 2.0. –

4.1. Estrategia de extensión. - La estrategia a seguir comienza con el estudio de la especificación de UML Testing Profile (UMLTP), extrayendo cada una de las vistas de las cuales se compone, y que serán analizadas para identificar (i) los elementos que deben ser extendidos o (ii) añadidos.

La eliminación de estereotipos existentes del UMLTP no se contempla, ya que, en un futuro, el testing de sistemas híbridos (software clásico y cuántico) requerirá de la cobertura necesaria para representar artefactos de prueba de ambos paradigmas.

Una vez que se seleccionen las vistas relevantes sobre las que se van a realizar las extensiones, se presentarán qué partes de las mismas son susceptibles de extender, generando una nueva versión con aquellas clases adicionales.

Las vistas seleccionadas para su extensión y adaptación para testing cuántico son:

- *Test Context Overview*: Esta vista es una representación que resume los aspectos esenciales del contexto de las pruebas de software. Incluye elementos como actores de prueba, casos de prueba, objetivos de prueba, artefactos de prueba, niveles de prueba y estrategias de prueba. Además, proporciona una visión general de cómo se estructuran y relacionan estos elementos en el proceso de prueba, lo que facilita la comprensión y comunicación de los diferentes aspectos involucrados en el diseño y ejecución de pruebas utilizando el UMLTP.
- *Test Architecture Overview*: La vista Test Architecture Overview, proporciona una descripción de la arquitectura de pruebas de software utilizando el perfil de prueba de UMLTP. Incluye elementos como componentes de prueba, interacciones entre los componentes, interfaces de prueba, relaciones de dependencia y estructuras de datos de prueba. Esta vista brinda una visión general de cómo se organizan y relacionan estos elementos en la arquitectura de pruebas, lo que facilita la comprensión y comunicación de la estructura y el diseño de las pruebas en el modelo UMLTP.
- *Test Case Overview*: La vista Test Case Overview proporciona una descripción de los casos de prueba en el proceso de prueba de software utilizando el perfil de prueba de UML. Incluye elementos como nombres de casos de prueba, descripciones, precondiciones, acciones, resultados esperados y datos de prueba. Ofrece una visión general de cómo se estructuran y organizan los casos de prueba, facilitando la comprensión y comunicación de los escenarios de prueba y sus objetivos dentro del modelo UMLTP.

- *Test Log Overview*: Esta vista consiste en una representación del registro de pruebas en el proceso de prueba de software utilizando el perfil de prueba de UML. En esta vista se incluyen elementos como registros de prueba, resultados obtenidos, fechas y horarios de ejecución, pasos de prueba realizados, errores detectados y acciones de seguimiento tomadas. Proporciona una visión general de cómo se registra y documenta el progreso y los resultados de las pruebas, lo que facilita la comprensión y comunicación de los resultados obtenidos, los problemas identificados y las acciones correctivas necesarias en el contexto del modelo UMLTP.
- *Arbitration and Verdict Overview*: Esta vista proporciona una descripción del proceso de arbitraje y veredicto en el contexto de las pruebas de software utilizando el perfil de pruebas de UML. Incluye elementos como la resolución de conflictos, la toma de decisiones y la evaluación de los resultados de las pruebas para determinar el veredicto final. Esta vista ofrece una visión general de cómo se maneja el proceso de toma de decisiones y se emite un veredicto basado en los resultados de las pruebas en el marco del UMLTP.

4.2. Extensión de la vista “Test Context OverView”. - En esta vista, se representan los casos de prueba, los elementos de prueba y los actores de prueba junto con sus correspondientes relaciones. También se pueden mostrar las dependencias entre los casos de prueba y los elementos del sistema que están siendo probados. Además, se pueden incluir restricciones y reglas de negocio que se aplican a los casos de prueba.

La vista “Test Context Overview” es útil para comprender rápidamente como se estructuran las pruebas en un sistema y cómo se relacionan con los otros componentes. Proporciona una representación visual clara y concisa del contexto de prueba, lo que facilita la comunicación entre los miembros del equipo de desarrollo y el equipo de pruebas.

A continuación, en la Figura IV, que se puede observar a alto nivel, las distintas partes en las que se divide la vista “Test Context Overview”.

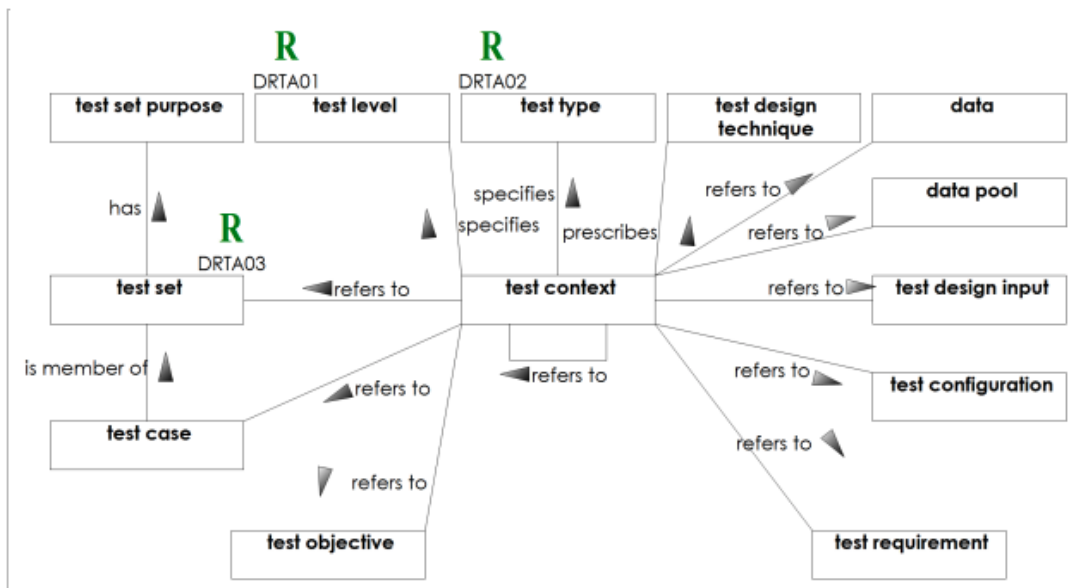


Figura IV. Representación de alto nivel de la vista “Test Context Overview”.

La vista presentada en la Figura IV muestra una vista de alto nivel. Los estereotipos (y clases) mediante las cuales se ha realizado la extensión de los estereotipos aplicables de la vista “*Test Context Overview*”, generando una nueva versión de la misma dando cobertura a los nuevos conceptos propios del testing de software cuántico basado en circuitos quedan reflejados en la en la Figura V.

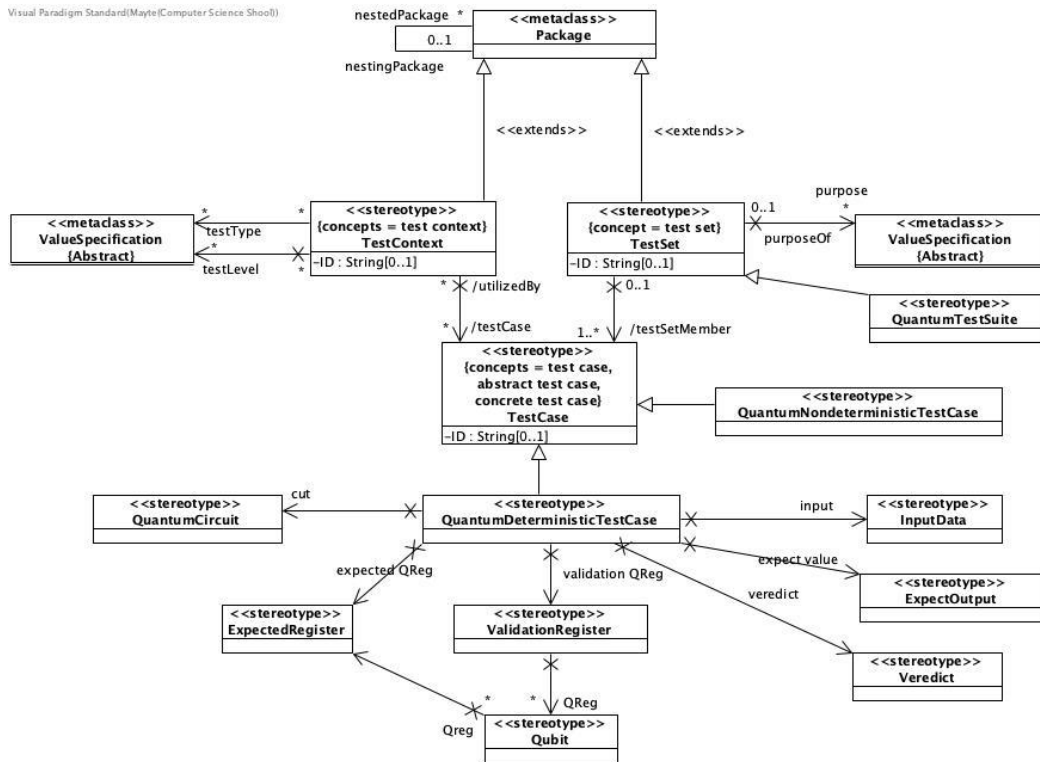


Figura V. Extensión de la vista "Test Context Overview"

El estereotipo *QuantumTestSuite* tiene como objetivo representar al concepto de Test Suite en el ámbito del testing cuántico. Es decir, este Estereotipo representa al contenedor del conjunto de casos de pruebas para el software cuántico. Su representación, a diferencia de un caso de prueba clásico puede variar en tanto en cuanto consideremos la representación del caso de prueba cuántico.

El concepto de caso de prueba cuántico es novedoso en el contexto del software cuántico, ya que la naturaleza disruptiva del software cuántico hace que se requieran artefactos distintos para su prueba. Incluso la formulación del mismo podría resultar muy distinta del propio concepto de prueba clásico. A esto, debemos sumar la propia naturaleza de los circuitos cuánticos, que podrían clasificarse en dos categorías según el comportamiento de los qubits que integran los circuitos: circuitos cuánticos deterministas y no deterministas. En esta sección, consideramos la posibilidad de tener que testear circuitos clásicos deterministas, es decir, aquellos en los que los qubits del mismo no se encuentran en superposición, y cuyo resultado no será una distribución de probabilidades.

Por ello, se añade el nuevo Estereotipo *QuantumDeterministicTestCase*, que representa al concepto de "Caso de prueba" para circuitos cuánticos deterministas.

En Figura VI (izda.) se puede observar un ejemplo de software cuántico, modelado en este caso como un circuito determinista. Por otro lado, la Figura VI (dcha.) representaría los casos de prueba que conforman una *QuantumTestSuite*, compuesta por un conjunto de casos de *QuantumDeterministicTestCase* para circuitos cuánticos de este tipo.

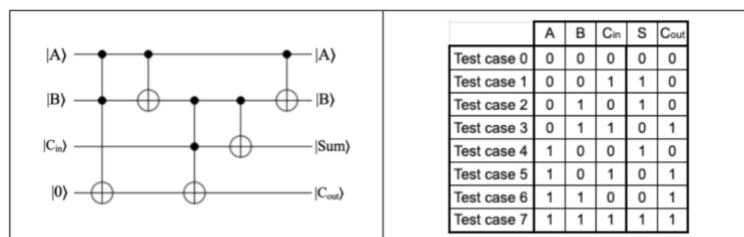


Figura VI. Sumador cuántico con acarreo(izquierda) y test suite del sumador(derecha)

Así mismo y de este modo, la Figura VII presenta los estereotipos que modelan el caso de prueba determinístico, ya que para este caso concreto, sí existen propuestas relativas a este tipo de casos de prueba cuánticos [1]. Los estereotipos que se proponen para describir este tipo de caso de prueba son los siguientes:

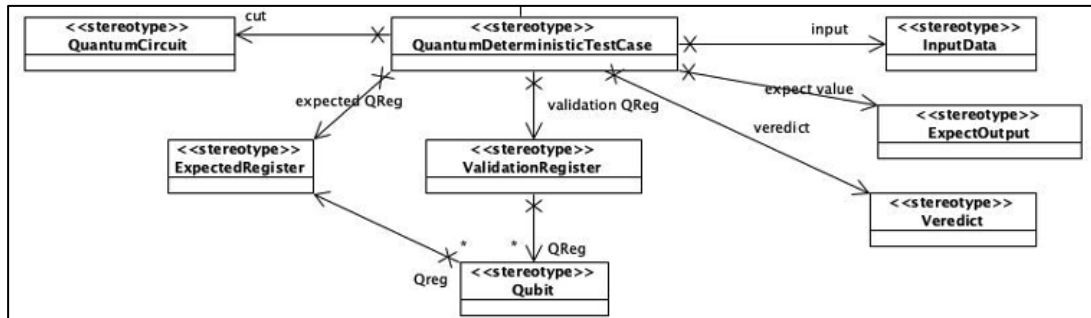


Figura VII. Estereotipos para describir un *QuantumDeterministicTestCase*.

- Estereotipo *ExpectedRegister*: El concepto de *ExpectedRegister* en un circuito cuántico se refiere al estado o resultado esperado del registro cuántico después de que se hayan aplicado un conjunto de operaciones cuánticas. En computación cuántica, un registro cuántico en una colección de cúbit. Por ello, se añade la clase *ExpectedRegister* que tiene como objetivo almacenar los valores de los cúbit tras la ejecución del circuito cuántico.
- Estereotipo *InputData*: La clase *InputData* se añade con el fin proporcionar los datos de entrada que van a ser utilizados como información inicial en un circuito cuántico, siendo esenciales para obtener resultados correctos o deseados en el mismo. Los valores de entrada representan los estados cuánticos de los qubits de entrada al circuito.
- Estereotipo *ExpectedOutput*: La clase *ExpectedOutput* tiene como fin almacenar los datos o resultados esperados después de que se haya completado la ejecución del circuito cuántico. Este registro se contratará con el registro *ExpectedRegister*, que almacena el valor real de la ejecución del caso de prueba.
- Estereotipo *ValidationRegister*: La clase *ValidationRegister* se utiliza para validar y verificar el resultado obtenido del circuito principal con el resultado esperado predefinido, es decir, albergar los valores resultantes del matching entre el *ExpectedOutput* y el *ExpectedRegister*.
- Estereotipo *Qubit*: La clase *Qubit* almacena la unidad fundamental de información cuántica, pudiendo tener valor de 0 o 1. Esta unidad representa la versión cuántica de un bit clásico y puede estar en múltiples estados simultáneos gracias a la superposición cuántica. Representa tanto un cúbit de entrada, como un valor resultado.
- Estereotipo *Verdict*: Se añade la clase *Verdict*, siendo ésta la que proporcionará el resultado devuelto tras la ejecución de las pruebas del circuito cuántico, pudiendo ser el resultado Fail o Pass.
- Estereotipo *QuantumCircuit*: La clase *QuantumCircuit* será la encargada de almacenar el circuito cuántico sobre el cual se aplican las pruebas, también conocido como CUT o *Circuit Under Test*. La representación de un circuito, vendrá dada por una estructura de clases independiente del UMLTP, por lo que esta Estereotipo constituirá el punto de anclaje entre el UMLTP y cualquier representación de un circuito cuántico basada en UML, como la que podemos encontrar en [10].

Tal y como se ha examinado previamente, un caso de prueba cuántico puede estar definido para circuitos deterministas (donde hay que realizar unas comprobaciones con respecto al resultado), o para circuitos de naturaleza estocástica (en los que habría que realizar comprobaciones probabilísticas que afectarían a cómo se representan los valores esperados y los mecanismos de comprobación del valor esperado con el obtenido).

Por ello, se añade el nuevo estereotipo (ver Figura V), *QuantumNondeterministicTestCase*, que representa al concepto de “Caso de prueba” para circuitos cuánticos no deterministas. Dada la escasez de propuestas en este sentido, esta clase queda de momento como un estereotipo representando el concepto, que más adelante habrá que especializar según las características de dicho tipo de prueba.

4.3. Extensión de la Vista “Test Architecture Overview”. - En esta vista, se representan los diferentes componentes y módulos de pruebas, incluyendo casos de prueba, acciones de prueba, resultados esperados y otros elementos relacionados con la prueba. Estos componentes se organizan de acuerdo con la estructura de la arquitectura del sistema o componente que se está probando.

Además, la vista “Test Architecture Overview” muestra las relaciones entre los componentes de prueba y los elementos del sistema, tal y como pueden ser los componentes funcionales o las clases de diseño. Estas relaciones pueden incluir dependencias, asociaciones o herencias que indican cómo los componentes de pruebas están relacionados con los elementos del sistema que se están probando.

Por otro lado, esta vista es necesaria para describir cómo se estructuran las pruebas en relación con la arquitectura del sistema. Proporciona una representación visual de alto nivel que facilita la comprensión de su organización (estructura del sistema bajo prueba) y relación entre los componentes de pruebas. Esta vista sirve de soporte a los equipos de desarrollo y pruebas para adquirir una visión clara de la arquitectura de las pruebas y de cómo se alinea con la arquitectura del sistema bajo pruebas.

A continuación, se muestra la Figura VIII en la que se pueden observar las partes en las que se organiza, a alto nivel, la vista “Test Architecture Overview”.

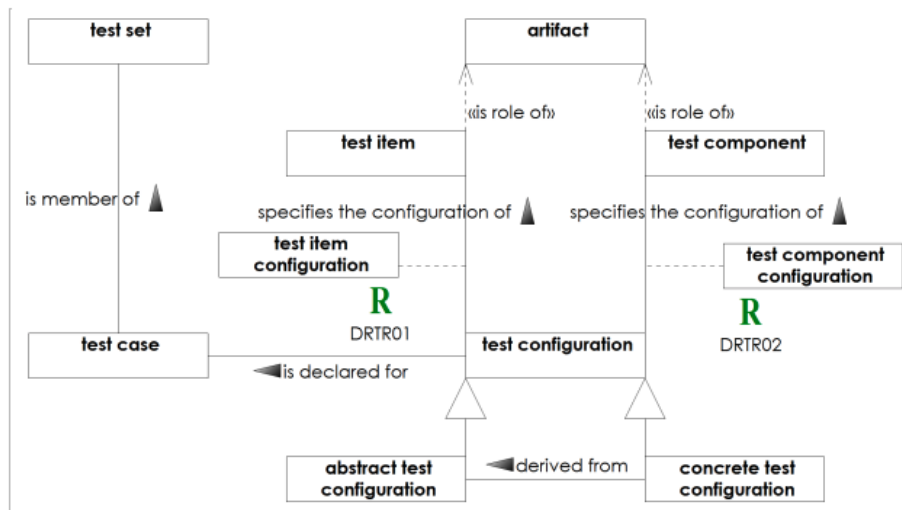


Figura VIII. Test Architecture Overview.

La extensión de la vista “Test Architecture Overview”, que incluye los nuevos estereotipos que permiten dar cobertura a los conceptos sobre testing de software cuántico, puede observar en la Figura IX.

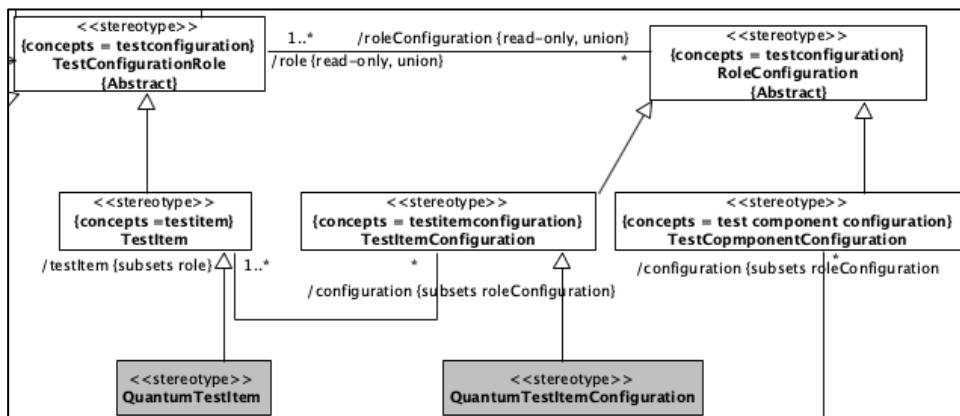


Figura IX. Fragmento del diagrama de clases de "Test Architecture Overview"

En el caso de esta vista, como se observa en la Figura IX, se observan dos nuevos estereotipos que se proponen para ser añadidos: *QuantumTestItem* y *QuantumTestItemConfiguration*.

El estereotipo *QuantumTestItem*, que hereda de *TestItem*, representa al artefacto bajo prueba que será objeto de la ejecución de los casos de prueba considerados dentro de la *TestConfiguration*. El *QuantumTestItem*, es lo que se conocería como *Circuit under Test* (o CUT). Puede considerarse como un circuito, una parte de un circuito cuántico, o un oráculo cuántico que va a ser sometido a prueba, y del que se espera obtener un veredicto en cuanto a su funcionamiento con respecto a unos casos de prueba cuánticos.

En el contexto de esta extensión, conviene mantener tanto el concepto general de *TestItem*, como el de *QuantumTestItem*, ya que los sistemas híbridos presentarán artefactos de ambos tipos, y esto implicará que, tanto en las pruebas funcionales como de integración, consideraremos artefactos de ambos tipos.

El estereotipo *TestItemConfiguration* representa al conjunto de restricciones que pueden ser aplicables al *TestItem* al que está asociado, y que constituye el sistema bajo prueba. Así pues, la extensión denotada por el estereotipo *QuantumTestItemConfiguration* (que hereda de *TestItemConfiguration*), haría referencia a restricciones específicas de un *QuantumTestItem*.

4.4. Extensión de la vista “Test Case Overview”. - La vista “*Test Case Overview*” tiene como objetivo poder representar los casos de prueba para un sistema o componente software bajo prueba. En la vista “*Test Case Overview*”, se identifican y organizan los casos de prueba, cada uno de los cuales se representa como un elemento individual en el modelo. Se puede incluir información como el nombre del caso de prueba, la descripción, los criterios de aceptación y los resultados esperados, sin incluir detalles de implementación del mismo.

Esta vista también muestra las relaciones y dependencias entre los casos de prueba y otros elementos del sistema, como los requisitos, las funcionalidades, los actores o los componentes específicos que están siendo probados. Estas relaciones permiten comprender cómo los casos de prueba se relacionan con los elementos del sistema y cómo se cubren los diferentes aspectos y escenarios de prueba.

Además, la vista “*Test Case Overview*” permite mostrar la agrupación de casos de prueba en “*test suites*” o grupos lógicos, organizando los casos de prueba en conjuntos coherentes y facilitando así la planificación y ejecución de las pruebas.

Por otro lado, esta vista proporciona una visión general de los casos de prueba, sus relaciones y su cobertura en el contexto del sistema o componente bajo prueba. Esto ayuda a los equipos de desarrollo y pruebas a comprender qué se está probando, cómo se están cubriendo diferentes aspectos y escenarios, y cómo se relacionan los casos de prueba con otros elementos del sistema.

En el contexto de esta vista, un *QuantumTestItem* podría tener asociadas distintas *TestItemConfiguration* siempre y cuando estas restricciones puedan ser aplicables a un software clásico. No obstante, si hubiera que añadir restricciones que sólo pudieran ser aplicables a un sistema cuántico, éstas deberían modelarse mediante el nuevo estereotipo *QuantumTestItemConfiguration*. Estas restricciones pueden hacer referencia a un lenguaje específico, un entorno de ejecución concreto, restricciones sobre qué tipo de servicio de ejecución puede ser válido (o no), etc.

A continuación, se muestra la Figura X en la que se puede observar las partes en las que se divide la vista “*Test Case Overview*” a alto nivel.

La extensión de la vista “*Test Case Overview*”, que incluye los nuevos estereotipos que permiten dar cobertura a los nuevos conceptos, se puede observar en la Figura XI.

A continuación, se describen los estereotipos que representan los nuevos conceptos a considerar dentro de la vista “*Test Case Overview*”.

El concepto de “caso de prueba cuántico” es tan novedoso que todavía no se ha establecido una definición aceptada y estandarizada para el mismo. Por este motivo, se decide considerar como nuevo estereotipo la clase *QuantumTestCase*, como especialización del concepto clásico “*TestCase*”, pero preparada para recoger las particularidades del concepto que se consensue como caso de prueba para software cuántico. Este nuevo estereotipo, aunque será susceptible de ser completado en el futuro, considera por el momento el que se espera que sea una variable tipo entero, necesaria a especificar en todos los casos de prueba para software cuántico: *shots*. Esta variable representa el número de veces que debe ejecutarse el *QuantumTestCase* para poder obtener un resultado fiable y representativo para el mismo. Este número variará en función del servicio de ejecución cuántico que se emplee para testear el sistema bajo prueba.

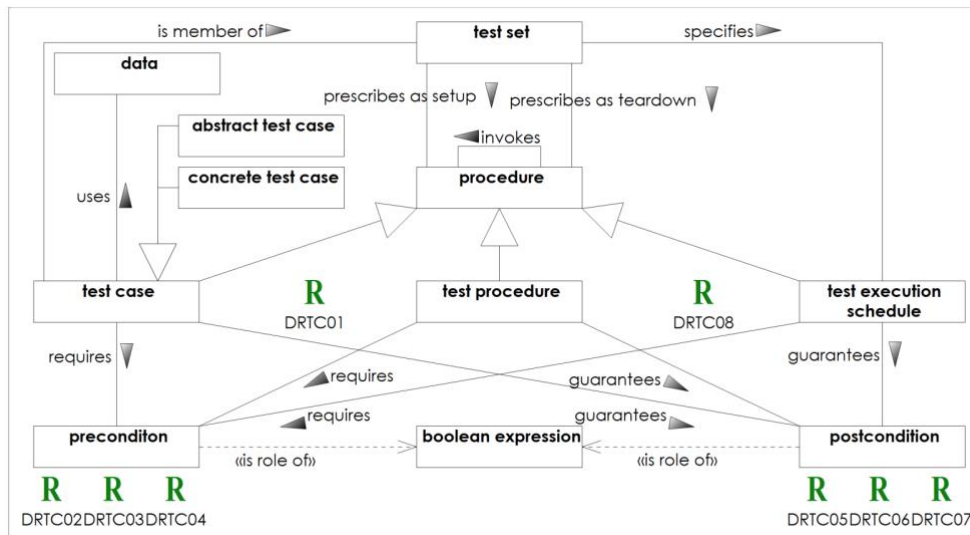


Figura X. Test Case Overview.

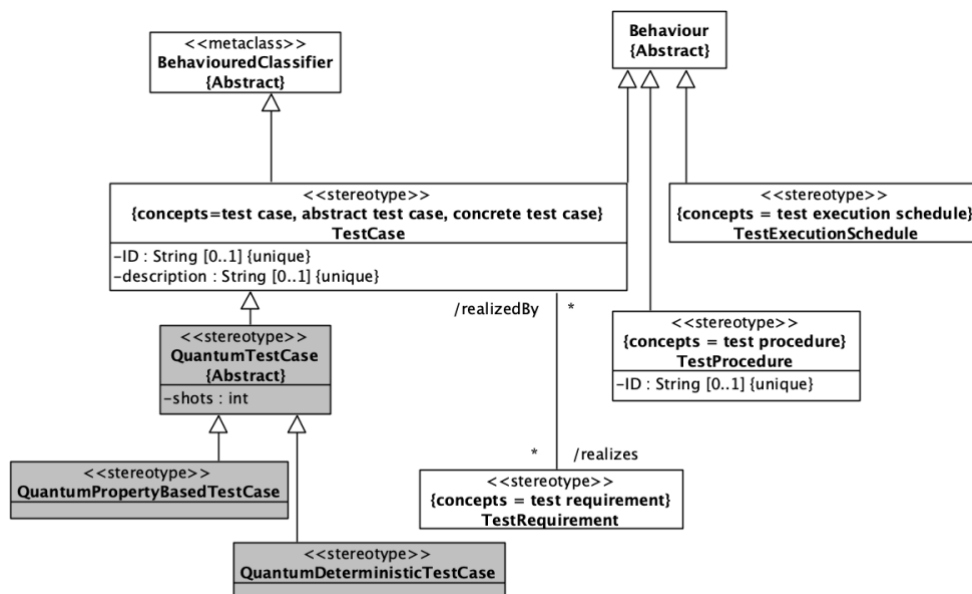


Figura XI. Diagrama de clases de “Test Case Overview”.

Los tipos de circuitos cuántico que revela por ahora la literatura, en base a la naturaleza del resultado esperado, son dos: circuitos de comportamiento determinista o circuitos de comportamiento estocástico. El testeo de cada uno de estos circuitos requiere de mecanismos distintos a considerar, por lo que resulta importante considerar este hecho a la hora de reflejar los distintos tipos de prueba que pueden ser aplicables. Esto se materializa en las especializaciones *QuantumDeterministicTestCase* (elemento de modelado para casos de prueba de circuitos deterministas) y *QuantumPropertyBasedTestCase* (elemento de modelado para casos de prueba de circuitos no deterministas).

Según la literatura, se van encontrando enfoques de testing orientados a la Ingeniería del Software Cuántico en los que se plantea el proceso de testing de software cuántico según la naturaleza del circuito. Uno de estos enfoques responde a los circuitos deterministas. Los circuitos deterministas son aquellos en los que se obtiene un estado concreto como resultado de la ejecución del algoritmo codificado en el circuito cuántico. El caso de prueba, por lo tanto, debe realizar las tareas apropiadas para (i) considerar un valor esperado, (ii) gestionar la ejecución del CuT, y (iii) realizar las comparaciones necesarias para determinar en qué medida el resultado obtenido es igual al esperado.

El concepto que nos permite modelar este concepto es el *QuantumDeterministicTestCase*, y representa a este tipo de casos de prueba. En [1] encontramos un caso de caso de prueba para circuitos deterministas donde se consideran como parte integrante los elementos básicos de un caso de prueba clásico, tal y como se observa en la Figura XII.

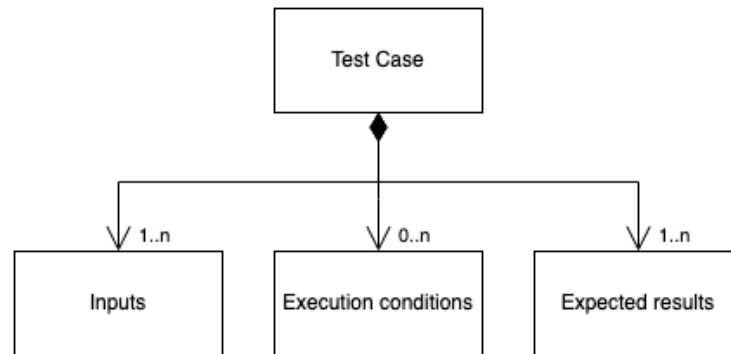


Figura XII. Partes de un caso de prueba [7].

Así, el caso de prueba cuántico en base a la propuesta de [4], se materializaría en un circuito de prueba (denominado *Quantum Test Circuit*, ver Figura XIII), que contemplaría no sólo los aspectos mencionados en la Figura XII, sino además, el propio CuT y los recursos necesarios para la evaluación del resultado. No obstante, esta definición tan precisa quedaría fuera de su definición en esta extensión, ya que podría considerarse como una implementación (aunque a nivel de modelo), concreta para un caso de prueba cuántico.

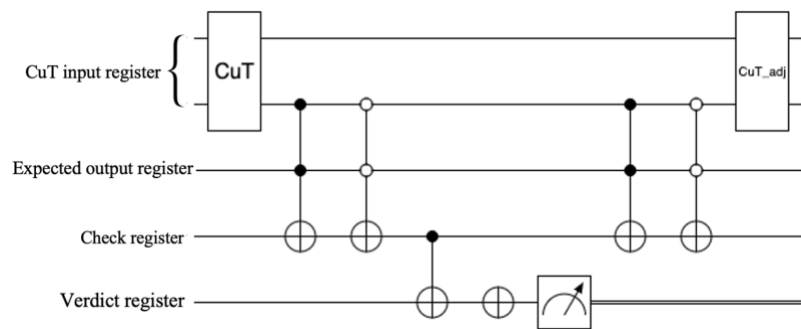


Figura XIII. Propuesta de *Quantum Test Circuit* para circuitos con comportamiento determinista.

Los circuitos cuánticos con un comportamiento no determinista requerirán de mecanismos adicionales para su prueba, teniendo en consideración que la evaluación del circuito puede conllevar analizar resultados que expresan distribuciones de probabilidades. Algunas propuestas recientes muestran cómo un circuito cuántico no determinista podría tener un comportamiento que debería evaluarse en base a propiedades del propio circuito. Las propiedades que podrían ser interesantes de evaluar en un punto concreto del circuito por ejemplo son: (i) Distribución de probabilidades; (ii) Valor determinista (clásico); o (iii) Estado de entrelazamiento.

Dichas propiedades, podrían modelarse tal y como se observa en la Figura XIV, sin embargo, podrían modelarse tantas como circunstancias o restricciones puedan identificarse en un circuito cuántico. Más allá de la propia propiedad con los datos básicos que se observan en la Figura XIV, el resto de información requerida para generar el caso de prueba sería relevante en tiempo de generación de código, por lo que no aplicaría como parte de la extensión del UMLTP.

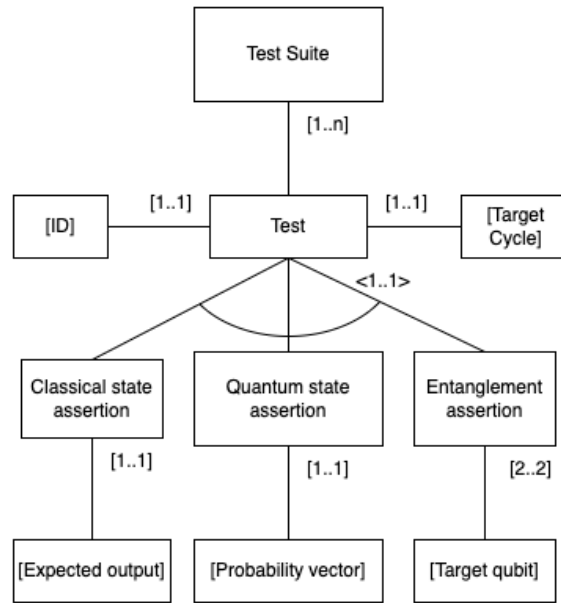


Figura XIV. Familia de tipos de prueba en base a las propiedades evaluables en un circuito.

4.5. Extensión de la vista “Arbitration and Verdict Overview”. - La vista “*Arbitration and Verdict Overview*” del UMLTP proporciona una visión general de cómo se lleva a cabo el proceso de arbitraje y toma de decisiones durante la ejecución del test suite. Estas clases, gestionan también cómo se lleva a cabo la emisión del veredicto final en el contexto de las pruebas de software. Esto ayuda a garantizar la calidad del software al validar y confirmar los resultados de las pruebas realizadas.

Esta vista abarca los siguientes aspectos relevantes:

1. Arbitraje: Se refiere al proceso de resolver conflictos o discrepancias que puedan surgir durante la ejecución de las pruebas. Puede involucrar la comparación de resultados esperados y obtenidos, la revisión de requisitos o criterios de aceptación, y la toma de decisiones sobre la validez de los resultados de las pruebas.
2. Veredicto: Es el resultado o conclusión final que se obtiene después de completar las pruebas. El veredicto se basa en la evaluación de los resultados de las pruebas y puede indicar si se cumplen los criterios de aceptación, si se han encontrados errores críticos, si el sistema cumple con los requisitos establecidos, entre otros aspectos relevantes. Dado que un caso de prueba cuántico realiza por sí mismo la comparación del resultado obtenido con respecto al esperado, siendo este *fail* o *pass*, los veredictos expresados por los estereotipos de este paquete provienen de la propia ejecución de los casos de prueba cuánticos.

La Figura XV muestra, a alto nivel, las partes en las que se divide la vista “*Arbitration and Verdict Overview*”.

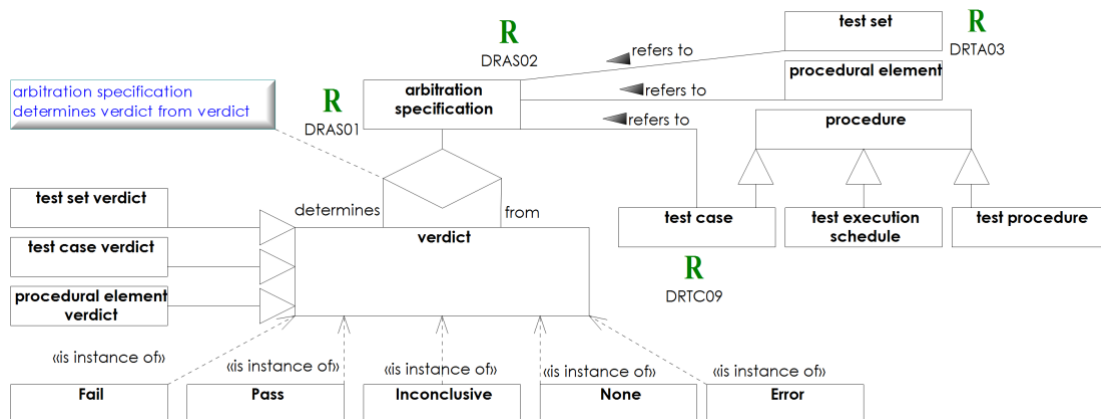


Figura XV. Arbitration & Verdict Overview

De acuerdo al análisis realizado sobre el estándar ISO/IEC 29119 y los estereotipos del UMLTP, no resulta necesario crear ninguna especialización de dichos estereotipos, pues los aspectos relativos al veredicto de la ejecución de la *test suite cuántica* (y con ello, sus *quantum test cases*), queda reflejado en la propia definición de los *quantum test cases*, siendo relevante únicamente si el veredicto ha sido uno de los establecidos como subclases del estereotipo *verdict* de la Figura XV.

5. Conclusiones. - La ingeniería dirigida por modelos presenta grandes ventajas a la hora de abordar la descripción agnóstica de sistemas complejos. Esta propiedad es de vital importancia para la QSE, dado que es uno de sus principios básicos y uno de los mecanismos mediante los cuales, se permitirá un desarrollo sostenible de software cuántico independiente de los lenguajes y plataformas que están apareciendo. Este principio debe aplicarse a todos los procesos de la QSE, siendo el testing de software cuántico el proceso en el que se enfoca este informe.

Otro aspecto crítico a la hora de abordar un enfoque agnóstico reside en que los artefactos que den soporte a la ejecución de un proceso de ingeniería del software puedan dar cobertura a la representación de todos los elementos relevantes en el modelado de dicho sistema cuántico (cúbits, puertas, oráculos, registros clásicos, etc.) en el contexto del proceso. Por ello, en el testing del software cuántico, la forma de asegurar esta cobertura de conceptos es la revisión de (i) el estándar por excelencia para el modelado de pruebas del software, es decir, UML Testing Profile, y (ii) la revisión del estándar ISO/IEC 29119, cuya definición de conceptos es la base para la creación del UML Testing Profile.

Partiendo de estos dos recursos, en este artículo se presenta un conjunto de estereotipos mediante los cuales, dar cobertura al modelado de pruebas para software cuántico. Dichos estereotipos, serán la base para la creación de entornos tecnológicos que permitan representar los artefactos de prueba para software cuántico de una forma independiente del lenguaje y la plataforma, dando así la oportunidad de definir las pruebas tan pronto como sea posible, y no sólo una vez que el software cuántico esté desarrollado. Seguiremos así las buenas prácticas que la comunidad industrial y académica han aprendido a lo largo de las últimas décadas, que se podrán aplicar al desarrollo de sistemas cuánticos especialmente críticos en cuanto a su calidad.

Agradecimientos. - Proyecto QSERV-UCLM (PID2021-124054OB-C32) financiado por el Ministerio español de Ciencia e Innovación (MICINN) y la Unión Europea. Ayudas para la realización de proyectos de investigación aplicada, en el marco del Plan Propio de Investigación, cofinanciadas en un 85% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Feder) UNION (2022-GRIN-34110).

Referencias

- [1] Amo, A., M. Serrano, I. Guzmán, M. Usaola, and M. Piattini, Automatic Generation of Testing Circuits for Deterministic Quantum Algorithms. 2023.
- [2] Firesmith, D. A Taxonomy of Testing. Software Engineering Institute's Insights (blog) 2015 Accessed at 02/04/2024]; Available from: <https://insights.sei.cmu.edu/blog/a-taxonomy-of-testing/>.
- [3] García de la Barrera, A., I. García-Rodríguez de Guzmán, M. Polo, and M. Piattini, Quantum software testing: State of the art. *Journal of Software: Evolution and Process*, 2023. 35(4): p. e2419.
- [4] García de la Barrera Amo, A., M.A. Serrano, I. García-Rodríguez Guzmán, M. Polo, and M. Piattini, Automatic generation of test circuits for the verification of Quantum deterministic algorithms. 2022. p. 1-6.
- [5] Huo, Q., H. Zhu, and S. Greenwood, A Multi-Agent Software Environment for Testing Web-Based Application, in *CMPSAC 2003*. 2003, IEEE.
- [6] Hutchinson, J., M. Rouncefield, and J. Whittle. Model-driven engineering practices in industry. in *2011 33rd International Conference on Software Engineering (ICSE)*. 2011.
- [7] ISO/IEC, Software and system engineering - Software Testing - Part 1: Concepts and definitions. 2021.
- [8] ISO/IEC, ISO/IEC/IEEE 29119-1:2022. Software and systems engineering. Software testing. 2022.
- [9] OMG, UML Testing Profile 2. 2019, Object Management Group.
- [10] Pérez-Castillo, R., L. Jiménez-Navajas, and M. Piattini, Modelling Quantum Circuits with UML. 2021. p. 7-12.
- [11] Piattini, M., G. Peterssen, and R. Pérez-Castillo, Quantum Computing: a new Software Engineering golden age. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2020. 45(3): p. 12-14.
- [12] Piattini, M., G. Peterssen Nodarse, R. Pérez-Castillo, J.L. Hevia Oliver, M. Serrano, G. Hernández González, I. Guzmán, C. Andrés Paradelo, M. Polo, E. Murina, L. Jiménez Navajas, J. Marqueño, R. Gallego, J. Tura, F. Phillipson, J. Murillo, A. Niño, and M. Rodríguez, The Talavera Manifesto for Quantum Software Engineering and Programming. 2020.
- [13] Piattini, M., M. Serrano, R. Perez-Castillo, G. Petersen, and J.L. Hevia, Toward a Quantum Software Engineering. *IT Professional*, 2021. 23(1): p. 62-66.
- [14] Polo, M., I. García-Rodríguez de Guzmán, A. García, M.Á. Serrano, M. Piattini, A. Martínez, and G. Peterssen, Chapter 7: Quantum Software Testing, in *Quantum Software Engineering & QuantumPath®*, G. Peterssen, J.L. Hevia, and M. Piattini, Editors. 2023, aQuantum. p. 372.
- [15] Shaukat Dar, K., U. Shaukat, F. Feroz, S. Kayani, and A. Akbar, Taxonomy of Automated Software Testing Tools. *International Journal of Computer Science and Innovation*, 2015. 1: p. 7-18.
- [16] Villalón, J.C.M., G.C. Agustin, T.S.F. Gilbert, and J.d.J.J. Puello. A taxonomy for software testing projects. in *2015 10th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. 2015.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

IGRG ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MRM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MPV ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

MTMQ ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Modelling Quantum Software: An Annotated Bibliography

Modelado de software cuántico: una bibliografía comentada

Modelagem de software quântico: uma bibliografia anotada

Luis Mariano Bibbo ^{1,(*)}, Alejandro Fernandez ²,

Jose Manuel Suarez ³, Oscar Pastor ⁴

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Summary. - This annotated bibliography delves into the field of quantum computing, focusing specifically on the resources used throughout the software life cycle. It examines several published works that analyze quantum software modelling in the context of the various phases of the life cycle, from analysis/requirements to testing and maintenance. Each annotation provides an analysis of software engineering resources applicable to quantum software development and their applicability to different phases of the software development process. By synthesizing these diverse perspectives, this bibliography illuminates the evolving landscape of quantum software development and underscores the critical role of modelling in the context of software engineering. The result provides a valuable starting point for researchers and practitioners who wish to deepen the interplay between quantum computing and software engineering, fostering innovation and advances in this evolving field.

Keywords: Quantum Software Engineering, Quantum Computing, Quantum Modelling, Quantum Design.

(*) Corresponding Author.

¹ Researcher. LIFIA, Facultad de Informatica, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. lmbibbo@lifia.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4950-3605>

² Researcher. LIFIA, Facultad de Informatica, Universidad Nacional de La Plata, CICBA - Provincia de Buenos Aires La Plata, Argentina. casco@lifia.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7968-6871>

³ Researcher. LIFIA, Facultad de Informatica, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. jsuarez@lifia.info.unlp.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-1115-6225>

⁴ Researcher. PROS Research Centre, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Espana. opastor@dsic.upv.es, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1320-8471>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 27 (2024). pp. 285-301

<https://doi.org/10.36561/ING.27.19>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Resumen. - Esta bibliografía anotada profundiza en el campo de la computación cuántica, centrándose específicamente en los recursos utilizados a lo largo del ciclo de vida del software. Examina varios trabajos publicados que analizan el modelado de software cuántico en el contexto de las diversas fases del ciclo de vida, desde el análisis/requisitos hasta las pruebas y el mantenimiento. Cada anotación proporciona un análisis de los recursos de ingeniería de software aplicables al desarrollo de software cuántico y su aplicabilidad a diferentes fases del proceso de desarrollo de software. Al sintetizar estas diversas perspectivas, esta bibliografía ilumina el panorama cambiante del desarrollo de software cuántico y subraya el papel fundamental del modelado en el contexto de la ingeniería de software. El resultado proporciona un valioso punto de partida para investigadores y profesionales que deseen profundizar en la interacción entre la computación cuántica y la ingeniería de software, fomentando la innovación y los avances en este campo en evolución.

Palabras clave: Ingeniería de software cuántico, Computación cuántica, Modelado cuántico, Diseño cuántico.

Resumo. - Esta bibliografia anotada se aprofunda no campo da computação quântica, focando especificamente nos recursos usados ao longo do ciclo de vida do software. Ela examina vários trabalhos publicados que analisam a modelagem quântica de software no contexto das várias fases do ciclo de vida, desde análise/requisitos até testes e manutenção. Cada anotação fornece uma análise dos recursos de engenharia de software aplicáveis ao desenvolvimento de software quântico e sua aplicabilidade a diferentes fases do processo de desenvolvimento de software. Ao sintetizar essas diversas perspectivas, esta bibliografia ilumina o cenário em evolução do desenvolvimento de software quântico e ressalta o papel crítico da modelagem no contexto da engenharia de software. O resultado fornece um ponto de partida valioso para pesquisadores e profissionais que desejam aprofundar a interação entre computação quântica e engenharia de software, promovendo inovação e avanços neste campo em evolução.

Palavras-chave: Engenharia de Software Quântico, Computação Quântica, Modelagem Quântica, Design Quântico.

1. Introduction. - Software engineering, according to Boehm [1], "is the practical application of scientific knowledge to the design, development of computer programs and the associated documentation required to develop, operate and maintain them". It is also known as Software Development or Software Production. Bauer [2], treats Software Engineering as the establishment of engineering principles and methods for obtaining cost-effective software that is reliable and works on real machines. Then in 1993, the IEEE synthesised it as the application of a systematic, disciplined and quantifiable approach to software development, operation and maintenance.

At its core, software engineering addresses the challenges associated with creating and maintaining complex and reliable software systems. This involves carrying out activities such as requirements specification, architectural design, code implementation, software testing, configuration management, project management and software quality assurance.

One of the main objectives of software engineering is to improve productivity and efficiency in software development, while minimizing errors and ensuring customer satisfaction. This is achieved through the application of software development practices and methodologies, such as Model Driven Development (MDD) [3], [4], Extreme Programming (XP), Agile methodology, among others [5].

1.1. Quantum Computing. - Quantum computing is an innovative field that relies on the principles of quantum mechanics to process information in a radically different way from classical computing [6]. Unlike classical bits, which can be in one of two states (0 or 1) at any time, quantum qubits can exist in multiple states simultaneously [7], thanks to a phenomenon known as quantum superposition. This allows quantum computing to explore a much wider range of possibilities in parallel, making it potentially much more powerful for certain types of problems.

One of the fundamental concepts in quantum computing is quantum entanglement, which allows two or more qubits to be intrinsically related so that the state of one is instantaneously correlated with the state of the other, regardless of the distance between them. This leads to a phenomenon known as quantum teleportation, where information can be transferred between distant qubits without requiring physical transmission of the information through space [8].

Quantum algorithms [9], such as Shor's famous algorithm for integer factorization and Grover's algorithm for unstructured search, offer enormous potential for solving problems that would be virtually impossible to tackle with classical computation in a reasonable amount of time. These algorithms take advantage of the unique properties of quantum mechanics to perform computations much more efficiently than their classical counterparts, which could have a significant impact in areas such as cryptography, optimization and molecular simulation.

Despite its potential, quantum computing is still in its early stages of development and faces numerous technical challenges, such as the need to build more robust and stable qubits, develop effective quantum error correction techniques and build scalable hardware architectures. However, recent advances in the field have generated great interest and optimism in the scientific and technological community, and quantum computing is expected to play a transformative role in solving some of the most complex challenges in computing and science in the decades to come [10].

Quantum computing represents an innovative way of processing information by exploiting the principles of quantum mechanics. These computing systems, based on units of information called qubits, operate in a superposition state, allowing them to perform calculations simultaneously in multiple states. *Quantum algorithms* are algorithms designed specifically to be run on quantum computers, taking advantage of the unique properties of quantum mechanics to solve problems more efficiently than their classical counterparts. *Quantum circuits*, on the other hand, are graphical representations of sequences of quantum operations that transform a set of input qubits into a desired result. These circuits are the basis for the implementation of quantum algorithms and are composed of *Quantum gates*, which represent the fundamental logical operations in quantum computation, such as the Hadamard gate, the CNOT gate and the phase gate. Each quantum gate performs a specific transformation on the states of qubits, allowing complex computations and efficient problem solving in a quantum environment.

1.2. Modelling and Quantum Computing. - Quantum computing has emerged as a fascinating field that promises to revolutionize the way we process information, and its potential impact extends to a wide range of fields, from cryptography and artificial intelligence to molecular simulation and process optimization. In this context, modelling plays a crucial role in providing tools and methodologies to represent and understand quantum systems more accurately and effectively. Through modelling, researchers and developers can capture the complex phenomena underlying quantum computation, explore new possibilities for quantum algorithms and circuits, and design more efficient and robust systems. In this paper, we will analyze in depth various initiatives that are exploring modelling techniques applied to Quantum Computing. This review is inspired by the work of Kitchenham [11] where we will focus on examining how different modelling approaches are being used to advance the field of quantum computing, identifying the challenges and opportunities they face and exploring their potential to drive the next generation of quantum technologies.

As quantum computing advances, the need to develop higher-level tools and programming languages to facilitate the development of quantum or mixed systems becomes evident. Currently, most of the tools available for quantum computing are expressed at a low level, similar to assembly language in classical computing. This means that programmers must have a deep understanding of the underlying architecture and the specific characteristics of qubits to write effective code, which can be a significant obstacle for those who are not experts in quantum physics.

To address this challenge, it is essential to develop higher-level software engineering resources that hide the underlying complexity and allow developers to focus on business logic and problem solving [12]. This includes creating more intuitive programming languages and software abstractions that simplify interaction with quantum systems. In addition, there is a need to develop libraries and frameworks that provide common functions and development tools for tasks such as simulation, debugging and optimization of quantum algorithms.

By favoring the development of quantum or mixed systems, where parts of the system are quantum and others are traditional [10], these software engineering resources can pave the way for the wider adoption of quantum computing in a variety of applications and industry sectors. By enabling a broader set of developers to harness the power of quantum computing without requiring a deep understanding of the underlying physics, these tools have the potential to accelerate innovation and bring quantum computing out of the lab and into the real world.

Building quantum software benefits greatly from the use of abstract models to guide the development process. These models provide a simplified but accurate representation of quantum systems, allowing developers to capture the essence of their operation and behavior without having to worry about implementation details at the code level. By focusing on creating these abstract models, developers can concentrate on properly understanding and specifying system requirements, facilitating clearer and more effective communication between team members and ensuring a shared understanding of the project.

The advantage of using abstract models in building quantum software lies in their ability to simplify the inherent complexity of quantum systems. By representing the essential aspects of the system in a clear and concise manner, abstract models allow developers to approach complex problems more systematically and effectively. Furthermore, by separating the specification of the system from its implementation, abstract models make it easier to adapt the software as requirements or technologies evolve, ensuring that the system is flexible and can be easily maintained over time.

In summary, the use of abstract models in building quantum software offers a number of significant benefits, including better understanding and specification of system requirements, clearer communication between team members, and greater flexibility and adaptability in software development [12]. By focusing on the creation and use of these abstract models, organizations can develop quantum software more efficiently and effectively, driving the adoption and advancement of quantum computing in a variety of applications and fields of study. Understanding "how" abstract models are used for building "what" type of quantum software is one of the goals of the work that we present here.

2. Papers Analyzed. - The following compilation features a curated selection of various software engineering resources within the domain of Quantum Software modelling. Each entry delves into the complexities of quantum

software modelling, elucidating the intricate interplay between quantum principles and established software engineering practices.

First, we will write a brief summary of each work, and then we will review the collection to identify a) which software engineering resources they contribute and b) at which stage of the software development lifecycle they are applied.

1. (2019) [13] *Towards a Pattern Language for Quantum Algorithms*:

The paper presents a set of Abstract Patterns for Quantum programming. These are the list of patterns proposed:

- Initialisation (State Preparation)
- Uniform Superposition
- Creating Entanglement
- Function Table
- Oracle (Black Box)
- Uncompute (Unentangling, Copy-Uncompute)
- Phase Shift
- Amplitude Amplification
- Speedup via Verifying
- Quantum-Classic Split

Patterns describe abstract solutions, independent of any concrete implementations. They intend to grow the proposed pattern language and make it available in the pattern repository PatternPedia. In parallel, concrete implementations of the patterns in quantum languages like QASM are considered, and these implementations will be linked to the corresponding patterns.

2. (2020) [14] *Towards a Quantum Software Modeling Language*, (2022) [15] *Design of classical-quantum systems with UML* also in [16] *Chapter 6: A quantum software modeling language*:

In these works, the authors introduce the concept of Quantum software modelling by expressing that Quantum Computing is based on the counter-intuitive principles of quantum mechanics [7], such as superposition and entanglement, among others. Thus, lessons learned from existing and classical design techniques cannot simply be applied [9], but new quantum foundations and features have to be devised. In this sense, quantum software is currently still coded manually and ad hoc. For example, although there are some well-known algorithms that are defined in the literature using mathematical formalism, these algorithms have been hand-coded in multiple ways for specific quantum programming languages without any prior design or modelling. They then introduce the concept of - Hybrid quantum information systems: The adoption of quantum information systems will not be a complete replacement of classical information systems. Both technologies will operate in parallel in what is known as "hybrid information systems". This is because it does not make sense to use quantum software to solve simple and simplistic problems, as these are already adequately performed by classical computers, and at lower cost. Thus, classical software will in the future act as a driver orchestrating requests to quantum software. Classical quantum information systems must therefore be analyzed and designed together, which in itself poses another major challenge.

The main contribution of this work is to provide a quantum UML profile that covers the main modelling aspects of the analysis and design of hybrid information systems. The quantum UML profile also covers structural and behavioral aspects. In particular, it addresses use cases, class, sequence, activity and deployment diagrams. As a result, both quantum and classical elements, as well as the relationships between them, can be modelled together in an integrated design.

It has a special section discussing Quantum Software Design, where different approaches are mentioned.

3. (2020) [17] *Software engineering for 'quantum advantage':*

This paper argues for the need for a proper quantum software engineering discipline benefiting from precise foundations and calculi, capable of supporting algorithm development and analysis.

They identify the following main issues around which any roadmap for a Software Engineering discipline should take into account: i) how (quantum) systems are *modelled*, ii) how models are *composed* (*architectures*), and finally, iii) how *properties* of their behaviors are anticipated, expressed and verified.

- *Models*: Different effects in computational models, for example partiality, non-determinism, probabilism, etc, are formally captured by monads (a structure that in functional programming combines program fragments "functions" and wraps their return values in a type with additional computation). In particular, this may be a way to bring quantum and cyber-physical programming together. Actually, recent developments on the semantics of (classical) hybrid components introduced a new monad capturing continuous evolution in a topological setting which caters for stability aspects.
- *Architectures*: A first challenge in this direction will aim at exploring what an algebra of mixed classical and quantum systems could be. In a sense the mathematical structure underlying 'categorical quantum mechanics' already possesses the basic ingredients for a calculus of quantum processes: composition (via tensor), measurements of entangled states (allowed by the compact closed structure), feedback (through dagger) and probabilistic branching (via biproducts), and last but not least, a formal diagrammatic notation.
- *Properties*: Three research challenges emerge: i) the characterization of a contract-based development discipline for assertional reasoning about quantum programs; ii) the proposal of a dynamic logic incorporating (classical) noise at the expression level to reason about probabilistically controlled fault tolerance in quantum programs; and, finally, iii) the identification of a semantic bridge between 'categorical quantum mechanics', which may be seen as a type theoretic form of quantum logic, and dynamic logics supporting assertional reasoning.

Their starting point, similar to classical computation, quantum algorithmics will significantly benefit from a mathematically based approach. This approach should be capable of conceptualizing and predicting behavior, as well as providing a rich, formal framework for specifying, developing, and verifying quantum algorithms. These foundational aspects emerge from the confluence of various mathematical disciplines and insights gleaned from software engineering practice.

4. (2020) [18] *Selection of quantum computing architecture using a decision tree approach:*

The motivation of this paper is to discuss various architecture examples from different industries and then to create a standard decision tree to choose the right software architecture depending on the nature of the quantum project.

The different types of projects are Quantum annealing, Quantum simulation and Universal quantum computing (Gate-based quantum algorithms). They developed a questionnaire to identify the type of project. The questions are simple but quite trivial.

5. (2020) [19] *Integrating quantum computing into workflow modelling and execution:*

They introduce a modelling extension for imperative workflow languages to enable the integration of quantum computations and ease the orchestration of classical applications and quantum circuits. They validate the practical feasibility of our approach by applying our proposed extension to BPMN and introduce Quantum4BPMN.

6. (2020) [20] *Modeling Quantum programs: Challenges, initial results, and research directions:*

The paper defines the concepts of high-level abstraction (platform independent) modeling language development. Proposes a quantum modeling approach at multiple levels of abstraction, class diagramming, flows and state machine. Presents an example of quantum entanglement modeling. It also proposes some lines of action and open issues involving Quantum Software Modeling Notations and Methodologies, Quantum Constraint Specification, Quantum Model-based Testing, Quantum Program Generation among others.

7. (2021) [21] *Towards Model-Driven Quantum Software Engineering:*

This work explores the use of Model Driven Engineering (MDE) on quantum technologies by means of an intermediate abstraction layer (with metamodels, transformations and automatic code generation) that allows the independence of current platforms (hardware + languages) and their interoperability. The solution is described in a very general and abstract way, proposing modelling tools pending development, which were later developed in a subsequent work by the same author [22].

8. (2021) [23] *Quantum Software Models: The Density Matrix for Classical and Quantum Software Systems Design:*

This paper claims that there should be just a single unified and rigorous design procedure for both classical and quantum software systems.

The main contribution of this paper is the unified linear algebra design approach to classical and quantum software systems, starting from their representation as design Density Matrices.

9. (2022) [22] *A Model-Driven Framework for Composition-Based Quantum Circuit Design:*

In this pre-print they propose a composition-oriented modelling language for creating quantum circuits together with a modelling framework which (i) allows for a flexible and convenient definition and application of composite operations including iterative patterns, and (ii) provides automated code generation. Besides that, the proposed approach also comes with a separation between the quantum circuit syntax and the definitions of the quantum operations which allows to build and use customized libraries.

The proposed approach comes with the separation of the quantum operation definitions, from the quantum circuit syntax.

- The meta-model for the quantum circuit design.
- A description of the quantum library which comprises the bespoke definitions of quantum operations.
- Information on certain implemented quantum operations.
- An extension for classical problem-specific inputs for operation definitions.
- Finally, the authors show how quantum circuits can be represented using the proposed framework with a simple example.

10. (2022) [24] *Software Architecture for Quantum Computing Systems – A Systematic Review:*

The objective of this review is to complement Software Engineering based studies and specifically focus on identification, classification, and synthesis of the published research on the role that software architecture plays in developing quantum computing systems. It also introduces the connector as a concept (to link components). This can be useful if we relate it to Quantum-Classical hybrid computing. This work has many good references and covers all stages of quantum software development and quantum architectures.

Although it is not a specific work on modeling, we include this paper because it is a very complete review and has a particular section that talks about modeling. It also has a section that discusses hybrid software architecture modeling (traditional and quantum programming) and software architecture design patterns.

It is important to mention that in modeling topics, the author Khan et al. refers to the same works that we analyze, which are: [18], [13] [14]. We identified in this work some definitions and concepts related to modeling. *Architectural process and activities*: An architecture design endeavour for the quantum software requires an architecting process to incorporate a number of architecting activities. Existing architectural process can be leveraged to support five architecting activities for quantum software namely (i) architectural requirements, (ii) architectural modelling, (iii) architectural implementation, (iv) architectural validation, and (v) architectural deployment.

Architectural modelling notations: Modelling notations to specify quantum software architectures primarily rely on box and arrow notations (having component diagrams) and graph-based models (having state graph) to represent the structures and behaviour of quantum software under design. Unlike conventional software architectures that mostly exploit UML notations (often considered as a defacto approach for software design), there is much less evidence on UML-based modelling quantum software architectures.

It appears that there is a need for architectural description languages and UML profiles that can be helpful to leverage existing tools, frameworks, and architectural knowledge to empower the role of designers and architects to model, develop, and evolve quantum software based on re-usability and (semi-) automation. *Architecture design patterns*: Layered and pipe and filter patterns are identified as the most recurring quantum software architecture patterns. However, these are generic or classical patterns that can be used to design any software system. To this end, further research efforts are required to explore and propose new patterns to particularly focus on quantum computing attributes (e.g., superposition and quantum entanglement) and facilitate the architecture of quantum software systems.

As said the paper is a good starting point to find references to other primary works that focus on different topics related to Quantum Software design and Quantum Architectures.

11. (2023) [25] *Model-Driven Optimization for Quantum Program Synthesis with MOMoT*:

This paper presents how MDO approaches, in particular MOMoT framework, can be applied to the problem of automated quantum program synthesis. They show how MOMoT can interact with quantum SDKs in order to provide the quantum-specific functionalities. Compared to tailor-made solutions for quantum program synthesis, this enables to use the features of existing MDO (Model Driven Optimization) frameworks.

12. (2023) [26] *A Graph-Based Approach for Modelling Quantum Circuits*:

This article proposes a unified metamodel for modelling quantum circuits, together with five strategies for its use and some examples of its application. The article also provides a set of constraints (OCL) for using the identified strategies, a set of procedures for transforming the models between the strategies, and an analysis of the suitability of each strategy for performing common tasks in a model-driven quantum software development environment.

The metamodel extends the well-known metamodel of graphs (direct-acyclic graphs) to combine all the approaches into a single modelling language.

This makes it possible to support different modelling strategies and the transformations that can be applied between them based on the Node concept. In short, the Node provides the developer with the necessary flexibility to decide whether she/he wants to model the quantum circuit using only the gates that operate on a qubit, or to group in a Node all the gates that model a controlled gate, or in the most extreme case, all the gates that appear in a particular vertical section of the circuit.

They also provide a deep study of the metamodel by (i) providing OCL constraints that check whether models are valid, (ii) providing OCL query functions to identify the modelling strategy employed by a model, (iii) outlining model-to-model transformations between the strategies, (iv) outlining a model transformation to reduce the number of modelling elements required to model a quantum circuit, and (v) providing an OCL query function to identify whether

said transformation has been applied to a model.

13. (2023) [27] *A Taxonomic View of the Fundamental Concepts of Quantum Computing—A Software Engineering Perspective:*

In the paper, the authors present a kind of taxonomical view of the fundamental concepts of quantum computing and the derived concepts that integrate the emerging discipline of quantum software engineering. The objective of this review only intends to detect the fundamental concepts of quantum computing and quantum software as an starting point to address the study of this discipline. The paper introduces the concepts of quantum computing and builds an interesting body of Knowledge (BOK).

It then discusses different related works with a special section on Teaching Quantum Computing.

The results of the quasi-systematic review are expressed in a set of informal taxonomies and relationships between concepts. However, as the authors indicate, the taxonomy is a useful starting point to see what is being done in software engineering and quantum computing.

14. (2023) [28] *Formalization of Quantum Intermediate Representations for Code Safety:*

This work proposes the formal definition of a generic reusable compilation tool (qIRs, intermediate representations) based on LLVM and applicable on different frontend languages and back-end hardware platforms. It formally defines syntax and semantics and an intermediate code conversion.

15. (2023) [29] *ScaffML: A Quantum Behavioral Interface Specification Language for Scaffold:*

This paper proposes the use of a behavioral interface specification language (BISL) called ScaffML for the quantum programming language Scaffold to specify behavior and interface of programs, modules, prepostconditions and assertions.

16. (2024) [30] *SimuQ: A Framework for Programming Quantum Hamiltonian Simulation with Analog Compilation:*

Development and implementation of a domain-specific language (SimuQ) for cross-platform quantum Hamiltonian simulation and compilation. Design and implement a Hamiltonian modelling language, an abstract instruction set and a compiler for quantum simulation with an intermediate representation and compilation phase. They apply ad-hoc optimization strategies for each specific platform based on the analysis of these Hamiltonians, which makes it possible to bring the simulated performance closer to the real performance on that platform. SimuQ generates executable pulse schedules for real devices to simulate the evolution of desired quantum systems, which is demonstrated on superconducting (IBMQ), neutral-atom (QuEra), and trapped-ion (IonQ) quantum devices.

3. Discussion. -

3.1. Quantum design efforts. - Within this section, we embark on a classification of the papers based on the design strategies they employ in the realm of quantum software modelling. By categorizing the papers according to their chosen design strategies, we aim to provide readers with a comprehensive overview of the diverse methodologies employed in the field, enabling them to glean insights and draw parallels across different research endeavors. This classification not only facilitates a deeper understanding of the landscape of quantum software modelling but also lays the groundwork for future exploration and innovation in this rapidly evolving domain.

- **Math Oriented:** [26] It represents the quantum circuit in a graph and through a metamodel transforms the graph into other analogous representations that may be more efficient.
In [23] propose to use Density Matrix to Map Classical and Quantum Computing
- **Mapping Techniques:** Bandic et al. [31] propose a mapping technique based on a structured design for space exploration strategy.

- Workflow Oriented: Weder et al. [19] propose QuantMe as a generic extension for imperative workflow modelling languages.
Ali and Yue [32] present guidelines for developing quantum software modelling languages and provide a conceptual model of quantum programs as well as an example of modelling based on state machines.
- Optimization, Transformation and Mappings: The work [28] formalizes the functionality of the Quantum Intermediate Representation while respecting the non-cloning theorem and avoid calls to released qubits and arrays.
The paper [29] presents ScaffoldML that provides an easy-to-use specification language for quantum programmers, supporting static analysis, run-time checking, and formal verification of Scaffold programs.
- Conceptual Models: Dave Wecker, Krysta M. Svore [33] LIQUi: A Software Design Architecture and Domain-Specific Language for Quantum Computing [17] proposes to deepen the study of three lines of quantum software engineering: Models, Architectures and Properties. [27] Introduces the main concepts of quantum computing and classifies them. Presents a useful taxonomy to introduce the subject.
Perez Delgado and Perez-Gonzalez in [14] extend UML class diagram to model quantum characteristics in a class design. Then Perez Castillo et. all in [15] Propose a QUML profile (UML extension) for modelling quantum elements together with classical elements.
The paper [22] is the result of previous papers [21] and [25] by the same author, which work with model-driven methods to produce quantum software. The papers propose modeling languages and transformers that allow the construction of quantum-specific functionalities. The work [20] propose on model-based engineering of quantum programs and assert that they must be platform independent.

3.2. Modelling and Lifecycle. - We will now analyze the works compiled in the previous sections and place them in the different stages identified by the work of Benjamin Weder, Johanna Barzen, Frank Leymann, and Daniel Vietz in chapter 4 of the book *Quantum Software Engineering. Software Engineering* by Manuel A. Serrano, Ricardo Perez-Castillo, and Mario Piattini. [34].

1. (2019) [13] *Towards a Pattern Language for Quantum Algorithms*:

This paper presents a pattern language that mainly addresses the *Modelling* stage of quantum applications. The work is very interesting in terms of teaching and explaining the concepts. It can also be the basis for a broader pattern language covering aspects of Error Mitigation and deployment. It opens up a wide spectrum of areas to be expressed in Patterns and Pattern Language format.

2. (2020) [14] *Towards a Quantum Software Modeling Language*, (2022) [15] *Design of classical-quantum systems with UML* also in [16] *Chapter 6; A quantum software modeling language* Perez-Delgado's work [14] presented in chapter 6 of the book [16]: All these works contribute mainly to the stages of "*Requirements Analysis*" and "*Architecture & Design*". Its major contribution is to propose a profile of UML which is the most widely used modelling language in traditional software development. The profile allows developers to build hybrid Quantum-Classical designs from different classical UML diagrams. For example, they extended not only static diagrams (Use Cases, Class Diagrams) but also dynamic diagrams such as (Activity and Sequence Diagrams).

They can also be considered as a contribution to the "*Quantum-Classical Splitting*" stage, as the link between classical and quantum circuit designs can be worked out. And they also support the "*Deployment*" stage by extending the UML deployment diagrams. On quantum circuit programming, they help to write what one already knows. They do not provide other perspectives on quantum programming. Other design alternatives may be required to model specific issues in quantum circuits.

A positive aspect is that developers can import the UML diagrams and continue with the design of quantum aspects in it. Many of the known tools for UML could be used to support working with the diagrams (visualization, printing, etc.). Among the possible tools are those that transform UML into code. This would allow to get implementations from the designs which gives many advantages to generate code from the designs. It definitely integrates aspects of classical computing with some quantum aspects.

3. (2020) [17] *Software engineering for 'quantum advantage'*:

It does not apply to any of the Perez-Delgado life cycle stages. It is an initial work that proposes the monads pattern to model the semantics of (classical-quantum) hybrid components that appear in the systems. This position paper argues for the need for a proper quantum software engineering discipline benefiting from precise foundations and calculi, capable of supporting algorithm development and analysis.

4. (2020) [18] *Selection of quantum computing architecture using a decision tree approach*:

This paper helps the decision-making process in choosing the right software architecture based on the type of the quantum project (Quantum annealing, Quantum Simulation and Universal Quantum Computing). It can be useful in the *Requirements Analysis* stage.

5. (2020) [19] *Integrating quantum computing into workflow modeling and execution*:

This work introduced the Quantum modelling Extension (QUANTME) to model quantum circuit invocations in workflows to ease their orchestration with classical applications and showed how to ensure the executability on different workflow engines. It is one of the few works that covers the *Observability* and *Analysis* stages. Another important aspect is that it has specific constructors to model the pre-processing and post-processing tasks (Readout Error Mitigation). It also proposes a "Quantum Software Lifecycle".

6. (2020) [20] *Modeling Quantum programs: Challenges, initial results, and research directions*:

The metamodel and the example is a bit simple compared to other analyzed works. It focuses on the stages of *Requirements Analysis*.

7. (2021) [21] *Towards Model-Driven Quantum Software Engineering*:

The approach of this work is applicable to several stages of the life cycle because it is based on MDE. Among them "*Requirements Analysis*", "*Architecture & Design*" since from the models it is possible to obtain designs or codes to be applied to other stages of the life cycle.

8. (2021) [23] *Quantum Software Models: The Density Matrix for Classical and Quantum Software Systems Design*:

The work proposes a design procedure that aligns classical and quantum software through Density Matrix. The main contribution is to have a mathematical model that covers both Classical Software Systems and Quantum Systems. This proposal contributes to the *Quantum-Classical Splitting* stage and to propose a mapping between the two models. Future research could apply this mathematical model to transform systems between Quantum and Classical.

9. (2022) [22] *A Model-Driven Framework for Composition-Based Quantum Circuit Design*:

The paper presents a metamodel of quantum circuits containing as main classes are *layer*, *Quantum-Circuit*, *Quantum-Operation* and *Composite-Quantum-Operation* that allows to compose elements in a layer. It also shows a Meta-model for quantum library, which describes how a quantum operation is defined, for an arbitrary or fixed number of qubits. This is very useful in terms of reusability because the defined operation is independent of the number of qubits it should act on. What is innovative about this approach is the composition-oriented modelling language capability that works at a high level of abstraction while hiding low-level implementation details. Another valuable addition is the generation of code from designs, which promises to reduce the development effort compared to existing tools. This applies to the stages of *Requirements Analysis* and *Quantum-Classical Splitting*, *Implementation* and even *Deployment*.

Finally, the application of MDE concepts also suggests the use of well-known model-based transformation tools for quantum circuit transformations to different representations.

10. (2022) [24] *Software Architecture for Quantum Computing Systems – A Systematic Review:*

This systematic review facilitates researchers and technologists to develop new hypotheses, find references and propose architecture-centric frameworks for a new generation of quantum software. It can be the basis for future research and classifies and orders many of the works analyzed in this review.

Another interesting aspect of the paper is that it provides an "Overview of quantum architecting process and its activities" map that can be useful when modelling the architecture of a quantum system. The paper takes a global view of quantum systems so it cannot be placed in one of the stages of Perez Delgado's work in particular. However, it has many references to very useful primary works to deepen in some of the topics of quantum software design and quantum architectures design. This paper contributes to the *Architecture & Design* and *Quantum-Classical Splitting* stages.

11. (2023) [25] *Model-Driven Optimization for Quantum Program Synthesis with MOMoT:*

In the same way as the previous works of the same authors, this can be used in several stages. In particular in this work that addresses the issue of model-driven optimization could be applied in the stages of *Implementation* and *Testing* to evaluate alternative quantum circuits.

12. (2023) [26] *A Graph-Based Approach for Modelling Quantum Circuits:*

This work mainly contributes to the *Implementation* stage as it presents different ways of conceptualizing a quantum circuit. The proposal allows a transformation between circuit representations. It can also contribute to the *Observability* stage as it points to the measurement-based quantum computation model, where the program is represented as a graph of entangled qubits and measurement operations. Having a Metamodel can also be the basis for possible Model-to-code transformations.

13. (2023) [27] *A Taxonomic View of the Fundamental Concepts of Quantum Computing—A Software Engineering Perspective:*

This work mainly provides a (BOK) body of knowledge on the main concepts involved in Quantum computing. This helps with the *Requirement and Analysis* stage of a project involving quantum programming. On the other hand, it is an interesting work for students and teachers to use as a starting point for understanding quantum computing.

14. (2023) [28] *Formalization of Quantum Intermediate Representations for Code Safety:*

This paper contributes to the formalism and portability of some QIR operations which detects insecure code in programs. This approach is applicable on *Requirements Analysis* (portability) and *Testing* (automatic verification) stages.

15. (2023) [29] *ScaffML: A Quantum Behavioral Interface Specification Language for Scaffold:*

The approach of this work applicable on specification stages *Requirements Analysis* and validation of software in debugging and *Testing*.

16. (2024) [30] *SimuQ: A Framework for Programming Quantum Hamiltonian Simulation with Analog Compilation:*

In this work, ad-hoc optimization strategies are applied for each specific platform. This is useful in the stages of *Observability* and *Analysis* of the results of the executions.

4. Conclusion. - Quantum systems are emerging as an innovative frontier in computing, promising to revolutionize the way we process information and tackle complex computational problems. As we move into an era where computing power is a critical resource, the application of quantum principles in software development becomes increasingly

crucial. These advances not only broaden our perspectives on what is possible in computing, but also pose exciting challenges in terms of quantum software design, implementation, and optimization. In particular, the design of such systems is a very new discipline and there are no consolidated techniques, tools or methodologies. In this work “An annotated bibliography” on the design of Quantum applications was carried out. For this purpose, different works that deal with this topic were reviewed. For each reference we made a brief commentary and tried to answer - what it tries to model (Design Effort) and - in which stage of the life cycle of the development of a quantum system. Most of the papers are oriented towards Math Oriented and Conceptual Models. Regarding the latter, the works of Perez Delgado (UML Profile) and Gemeinhardt, Felix et al. that aim to work with MDE techniques where they provide model-to-code transformations stand out. This type of initiatives seems to us relevant to deepen the research. It can also be noted that most of the work is focused on the stages of *Requirements Analysis*, *Quantum-Classical Splitting*, *Design* and *Implementation*. There is a deficit in the stages of *Analysis* of results and *Observability*. The latter are less common in traditional developments.

Continuing the current research trajectory opens two promising avenues. Firstly, conducting a Systematic Literature Review (SLR) would formalize research questions, survey relevant papers, and synthesize results, providing a comprehensive overview of the existing literature in quantum software modelling. Secondly, identifying and analyzing existing gaps within the discipline and proposing innovative solutions would involve a thorough examination of the current state-of-the-art, pinpointing areas lacking understanding, methodologies, or tools. This proactive approach would foster innovation and ensure that quantum software modelling remains at the forefront of scientific and technological advancements.

References

- [1] B. Boehm W., “Software Engineering,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-25, pp. 1226–1241, 12 1976.
- [2] W. F. Bauer and A. M. Rosenberg, “Software,” in *Proceedings of the December 5-7, 1972, fall joint computer conference, part II on - AFIPS '72 (Fall, part II)*, (New York, New York, USA), p. 993, ACM Press, 1972.
- [3] A. G. Kleppe, J. B. Warmer, and W. Bast, *MDA explained : the model driven architecture : practice and promise*. Addison-Wesley, 2003.
- [4] S. J. Mellor, *MDA distilled : principles of model-driven architecture*. Addison-Wesley, 2004.
- [5] O. Pastor and J. C. Molina, “Model-driven architecture in practice: A software production environment based on conceptual modeling,” *Model-Driven Architecture in Practice: A Software Production Environment Based on Conceptual Modeling*, pp. 1–302, 2007.
- [6] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, “Quantum Computation and Quantum Information 10th Anniversary Edition,” *Cambridge University Press*, 2010.
- [7] E. Rieffel and W. Polak, “Quantum computing : a gentle introduction,” p. 372, 2011.
- [8] M. J. Everitt, M. J. C. Henshaw, and V. M. Dwyer, “Quantum Systems Engineering: A structured approach to accelerating the development of a quantum technology industry,” in *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2016-August, 2016.
- [9] S. P. Wang and E. Sakk, “Quantum algorithms: Overviews, foundations, and speedups,” *2021 IEEE 5th International Conference on Cryptography, Security and Privacy, CSP 2021*, pp. 17–21, 1 2021.
- [10] M. Piattini, G. Peterssen, R. Perez-Castillo, J. L. Hevia, M. A. Serrano, G. Hernandez, I. G. R. de Guzmán, C. A. Paradela, M. Polo, E. Murina, L. Jimenez, J. C. Marqueño, R. Gallego, J. Tura, F. Phillipson, J. M. Murillo, A. Nino, and M. Rodríguez, “The Talavera manifesto for quantum software engineering and programming,” in *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2561, 2020.
- [11] B. Kitchenham and O. Brereton, “Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review,” *Elsevier*, 2009.
- [12] C. Pons, R. S. Giandini, and G. Perez, *Desarrollo de software dirigido por modelos*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP) / McGraw-Hill Educacion, 2010.
- [13] F. Leymann, “Towards a Pattern Language for Quantum Algorithms,” 6 2019.
- [14] C. A. Perez-Delgado and H. G. Perez-Gonzalez, “Towards a Quantum Software Modeling Language,” *Proceedings - 2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering Workshops, ICSEW 2020*, pp. 442–444, 6 2020.
- [15] R. Perez-Castillo and M. Piattini, “Design of classical-quantum systems with UML,” *Computing*, vol. 104, pp. 2375–2403, 11 2022.
- [16] M. A. Serrano, R. Perez-Castillo, and M. Piattini, *Quantum Software Engineering*. 2022.

- [17] L. S. Barbosa, “Software engineering for ‘quantum advantage’,” *Proceedings - 2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering Workshops, ICSEW 2020*, vol. 3, pp. 427–429, 6 2020.
- [18] L. Nallamothula, “Selection of quantum computing architecture using a decision tree approach,” *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems, ICISS 2020*, pp. 644–649, 12 2020.
- [19] B. Weder, U. Breitenbucher, F. Leymann, and K. Wild, “Integrating quantum computing into workflow modeling and execution,” *Proceedings - 2020 IEEE/ACM 13th International Conference on Utility and Cloud Computing, UCC 2020*, pp. 279–291, 12 2020.
- [20] S. Ali and T. Yue, “Modeling Quantum programs: Challenges, initial results, and research directions,” *APEQS 2020 - Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software, Co-located with ESEC/FSE 2020*, pp. 14–21, 11 2020.
- [21] F. Gemeinhardt, A. Garmendia, and M. Wimmer, “Towards ModelDriven Quantum Software Engineering,” in *Proceedings - 2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering, Q-SE 2021*, 2021.
- [22] F. Gemeinhardt, A. Garmendia, M. Wimmer, and R. Wille, “A ModelDriven Framework for Composition-Based Quantum Circuit Design,”
- [23] I. Exman and A. T. Shmilovich, “Quantum Software Models: The Density Matrix for Classical and Quantum Software Systems Design,” *Proceedings - 2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering, Q-SE 2021*, pp. 1–6, 3 2021.
- [24] A. A. Khan, A. Ahmad, M. Waseem, P. Liang, M. Fahmideh, T. Mikkonen, and P. Abrahamsson, “Software Architecture for Quantum Computing Systems – A Systematic Review,” *Journal of Systems and Software*, vol. 201, 2 2022.
- [25] F. Gemeinhardt, M. Eisenberg, S. Klikovits, and M. Wimmer, “ModelDriven Optimization for Quantum Program Synthesis with MOMoT,” in *Proceedings - 2023 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion, MODELS-C 2023*, 2023.
- [26] D. Alonso, P. Sanchez, and B. Alvarez, “A Graph-Based Approach for Modelling Quantum Circuits,” *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 11794*, vol. 13, p. 11794, 10 2023.
- [27] R. Juarez-Ramirez, C. X. Navarro, S. Jimenez, A. Ramirez, V. TapiaIbarra, C. Guerra-Garcia, H. G. Perez-Gonzalez, and C. Fernandez-y Fernandez, “A Taxonomic View of the Fundamental Concepts of Quantum Computing—A Software Engineering Perspective,” *Programming and Computer Software*, vol. 49, pp. 682–704, 12 2023.
- [28] J. Luo and J. Zhao, “Formalization of Quantum Intermediate Representations for Code Safety,” 2023.
- [29] T. Jin and J. Zhao, “ScaffML: A Quantum Behavioral Interface Specification Language for Scaffold,” in *Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Software, QSW 2023*, 2023.
- [30] Y. Peng, J. Young, P. Liu, and X. Wu, “SimuQ: A Framework for Programming Quantum Hamiltonian Simulation with Analog Compilation,” *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, vol. 8, 2024.
- [31] M. Bandic, H. Zarein, E. Alarcon, and C. G. Almudever, “On Structured Design Space Exploration for Mapping of Quantum Algorithms,” *2020 35th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems, DCIS 2020*, 11 2020.

- [32] X. Zhou, S. Li, and Y. Feng, “Quantum Circuit Transformation Based on Simulated Annealing and Heuristic Search,” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 39, pp. 4683–4694, 8 2019.
- [33] D. Wecker and K. M. Svore, “LIQUi—i: A Software Design Architecture and Domain-Specific Language for Quantum Computing,” 2014.
- [34] C. A. Perez-Delgado, “A quantum software modeling language,” *Quantum Software Engineering*, pp. 103–119, 10 2022.

Author contribution:

1. Conception and design of the study
2. Data acquisition
3. Data analysis
4. Discussion of the results
5. Writing of the manuscript
6. Approval of the last version of the manuscript

LMB has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

AF has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

JMS has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

OP has contributed to: 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Acceptance Note: This article was approved by the journal editors Dr. Rafael Sotelo and Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Integración de Webots y Qiskit para la experimentación con circuitos cuánticos como controladores robóticos

Integration of Webots and Qiskit for experimentation with quantum circuits as robotic controllers

Integração de Webots e Qiskit para experimentação com circuitos quânticos como controladores robóticos

Diego Carlos Luna-Márquez ^{1,(*)}

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Resumen. - En la actualidad, dos áreas de importancia tecnológica y económica han experimentado avances importantes y acelerados: la robótica y la computación. En este último caso, la investigación en torno al enfoque cuántico ha sido notable. En relación con la robótica, el simulador robótico Webots se ha utilizado en la investigación y la implementación de robots en entornos reales y permite manipular el sistema simulado mediante controladores escritos en el lenguaje de programación Python. Esto permite la interacción con otros entornos y sistemas programados en el mismo lenguaje. Dentro de esta premisa, se ha experimentado con la implementación de controladores robóticos mediante circuitos cuánticos desarrollados en la plataforma de programación Qiskit. Todo ello se ha llevado a cabo en el entorno de simulación Webots. Efectos como la generación ideal de números aleatorios a partir de eventos cuánticos, entrelazamiento y superposición brindan posibilidades de simulación, aprendizaje e investigación en ambas áreas. En este trabajo se muestra una aproximación a estos controladores cuánticos. Se presentan los avances alcanzados y algunas posibilidades de trabajo futuras.

Palabras clave: cibernética; computación cuántica; robótica cuántica.

(*) Corresponding Author.

¹ Doctorante, Departamento de Ciencias Computacionales, Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TecNM/CENIDET (México), diego.luna18ca@cenidet.edu.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-9746-8411>

Summary. - Currently, two areas of technological and economic importance have experienced significant and accelerated advances: robotics and computing. In the latter case, research into the quantum approach has been remarkable. In relation to robotics, the Webots robotic simulator has been used in the research and implementation of robots in real environments and allows the simulated system to be manipulated by controllers written in the Python programming language. This allows interaction with other environments and systems programmed in the same language. Within this premise, we have experimented with the implementation of robotic controllers using quantum circuits programmed in the Qiskit programming platform. All this has been carried out in the Webots simulation environment. Effects such as ideal random number generation from quantum events, entanglement and superposition provide possibilities for simulation, learning and research in both areas. In this paper we show an approach to these quantum controllers. The progress achieved and some possibilities for future work are presented.

Keywords: cibernetics; quantum computing; quantum robotics.

Resumo. - Atualmente, duas áreas de importância tecnológica e econômica têm experimentado avanços significativos e acelerados: robótica e computação. No último caso, a pesquisa sobre a abordagem quântica tem sido notável. Em relação à robótica, o simulador robótico Webots tem sido usado na pesquisa e implementação de robôs em ambientes reais e permite que o sistema simulado seja manipulado por controladores escritos na linguagem de programação Python. Isso permite a interação com outros ambientes e sistemas programados na mesma linguagem. Dentro dessa premissa, experimentamos a implementação de controladores robóticos usando circuitos quânticos programados na plataforma de programação Qiskit. Tudo isso foi realizado no ambiente de simulação Webots. Efeitos como geração de números aleatórios ideais a partir de eventos quânticos, emaranhamento e superposição fornecem possibilidades de simulação, aprendizado e pesquisa em ambas as áreas. Neste artigo, mostramos uma abordagem para esses controladores quânticos. Os progressos alcançados e algumas possibilidades para trabalhos futuros são apresentados.

Palavras-chave: cibernética; computação quântica; robótica quântica.

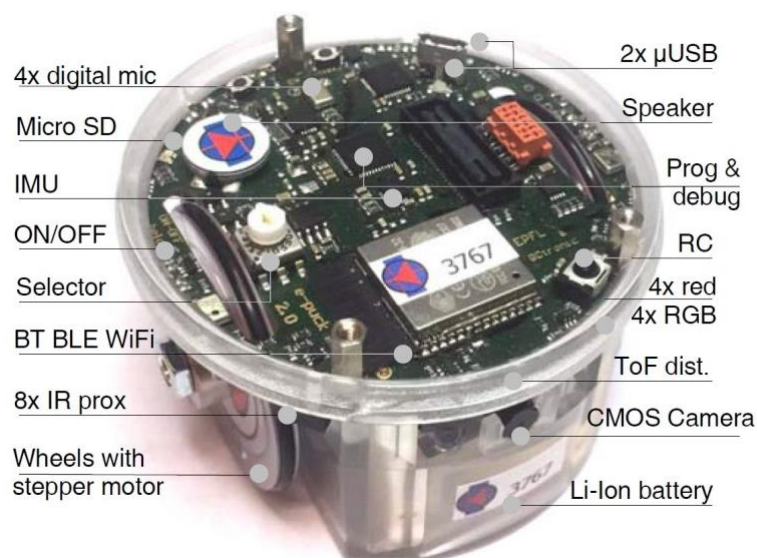


Figura I. Robot diferencial e-puck.

1. Introducción. - Existen diversas definiciones de la palabra *robot*. Algunas de ellas destacan el requerimiento de que un robot debe ser un sistema físico y actuar sobre sí mismo u otro sistema físico (1). No obstante, autores como Bräunl (2) consideran que el aspecto crítico en un sistema robótico es el software. Éste último es el acercamiento que se observa en el presente documento.

Webots es un simulador robótico con licencia Apache 2. Siendo un simulador basado en software, los elementos implementados y desarrollados dentro del mismo se considerarán siempre como simulados, con las implicaciones que ello representa, tales como la disponibilidad de un ambiente controlable y controlado, limitaciones prácticas y/o intrínsecas del motor de física, etc.

Existen varias categorías de robots descritas en la literatura (1)(3)(4). En este trabajo se considerarán únicamente los robots móviles terrestres desplazados por ruedas, particularmente se utilizará la simulación del robot-vehículo *e-puck*, incluido de manera predeterminada en Webots.

2. Simulador robótico Webots. - Webots es un simulador 3D multi sistema operativo de fuente abierta (licencia Apache 2) para robótica móvil. Fue creado originalmente por Olivier Michel en la *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) en 1996 y es utilizado en la industria, en entornos educativos y en la investigación (5). Webots contiene por defecto una amplia cantidad de robots, sensores, actuadores y muy diversos objetos, pudiendo incorporarse más elementos mediante su descripción en el lenguaje VRML. En Webots es posible utilizar diferentes lenguajes para la programación de controladores, se optó por utilizar Python, por la factibilidad de interacción con Qiskit.

En Webots, se llama *controlador* a un subsistema de control que permite modificar tanto el ambiente simulado con un *controlador supervisor*, así como el comportamiento del propio robot mediante un *controlador regular*.

2.1. Robot e-puck. - En este trabajo se ha utilizado el robot *e-puck*. La concepción original (física) de dicho robot también fue desarrollada por la EPFL. Entre otras características, es un robot con desplazamiento diferencial mediante ruedas e incluye 8 sensores de proximidad, acelerómetro, giroscopio, cámara, un encoder (sensor de posición) por rueda, 8 sensores de luz, etc. El hardware y el software a bordo son de fuente abierta². La simulación del robot *e-puck* encontrada en Webots fue realizada por Cyberbotics Ltd. Un diagrama con algunos de los componentes del robot se muestra en la figura I.

² https://en.wikipedia.org/wiki/E-puck_mobile_robot

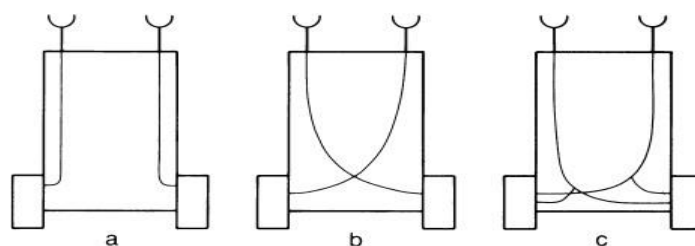


Figura II. Tres tipos simples de robots de Braitenberg con dos sensores y dos motores. a) los motores están conectados a su sensor respectivo, considerando la orientación; b) conexión cruzada ; c) ambos motores reciben datos de los dos sensores (6).

3. Vehículos de Braitenberg. - En 1984 el neurocientífico y ciberneta Valentino Braitenberg publicó el influyente libro *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology* (6). Allí describió sistemas de control robótico basados en controladores simples y que presentaban comportamientos sencillos y considerados naturales como miedo, agresión y amor. A estos mecanismos se les conoce como *vehículos de Braitenberg*. Se muestran tres de estos vehículos en la figura II y dos posibles comportamientos en la figura III.

La importancia de estos vehículos es la demostración de un sistema medianamente complejo de comportamiento mediante sensado y circuiterías muy simples. Estos comportamientos pueden ser simulados en el entorno Webots y controlados mediante circuitos cuánticos.

4. Computación cuántica. - Diversos autores han reconocido los límites de representación y cálculo de la computación clásica y han descrito modelos de computación basados en mecánica cuántica (7; 8; 9; 10; 11; 12). Anterior a ello, Von Neumann realizó una descripción rigurosa de la mecánica cuántica utilizando espacios de Hilbert (13). Esta formulación ha sido heredada hacia la computación cuántica y se encuentra resumida en las siguientes ideas.

Un estado cuántico es un vector complejo d -dimensional en un espacio de Hilbert H . La computación cuántica basada en circuitos y qubits emplea un espacio de Hilbert de dimensión 2. No obstante que existe un infinito número de dicho par vectorial, en el presente documento utilizaremos únicamente los que conforman la llamada *base computacional* $\{|0\rangle$ y $|1\rangle\}$.

En dicho modelo de circuitos, la unidad mínima de información es llamada *qubit*. Un factor clave de los estados cuánticos es su capacidad de encontrarse en una superposición cuántica, matemáticamente expresada como una combinación lineal de estados base. En el caso de la base computacional, estos vectores ortonormales son:

$$|0\rangle = [1 \ 0]^T, \quad |1\rangle = [0 \ 1]^T, \quad (1)$$

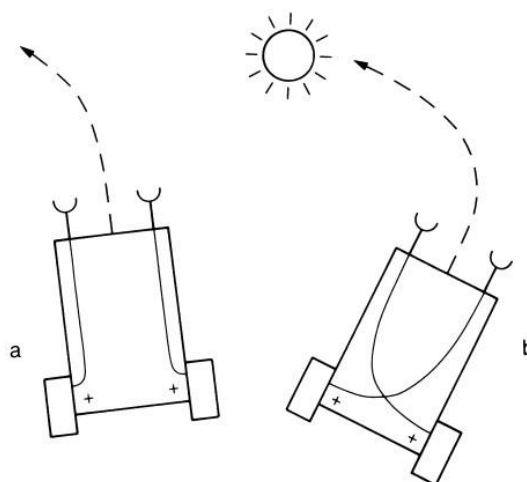


Figura III. Dos comportamientos diferentes correspondientes a señales excitatorias (+) o inhibitorias (-). a) el robot se aleja de la fuente de luz, “miedo”; b) el robot se aproxima a la fuente, “amor” (6).

así que su superposición está definida como:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle, \tag{2}$$

donde $|\psi\rangle$ es un qubit, $|i\rangle$ con $i = \{0,1\}$ es llamada un ket de vectores base i ; los coeficientes $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ son llamados amplitudes de probabilidad y deben estar normalizados en concordancia con la regla de Born dada por:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \tag{3}$$

Esta forma de expresar vectores y sus operaciones es llamada notación de Dirac: un ket representa el vector vertical v con elementos complejos, mientras un bra es el conjugado complejo del correspondiente ket:

$$\langle v| = (|v\rangle^*)^\top = |v\rangle^\dagger, \tag{4}$$

donde el símbolo *dagger* \dagger es la secuencia de operaciones de conjugación y transposición.

Los operadores cuánticos describen la evolución de un sistema cuántico cerrado. En el caso de de dimensión finita, éstos son matrices unitarias representando observables físicos como se expresa en la ecuación 5.

$$|\psi(t + 1)\rangle = U |\psi(t)\rangle, \tag{5}$$

donde U es el operador unitario de evolución. En la computación cuántica basada en circuitos, estos operadores se corresponden con compuertas cuánticas.

Al finalizar la evolución, una compuerta de medición obtiene el resultado final del circuito cuántico. Esta operación conlleva la decoherencia del estado cuántico y retorna bits clásicos.

Es de notar que en la mayoría de los algoritmos el circuito cuántico debe ser ejecutado múltiples veces para obtener una distribución estadística de los resultados.

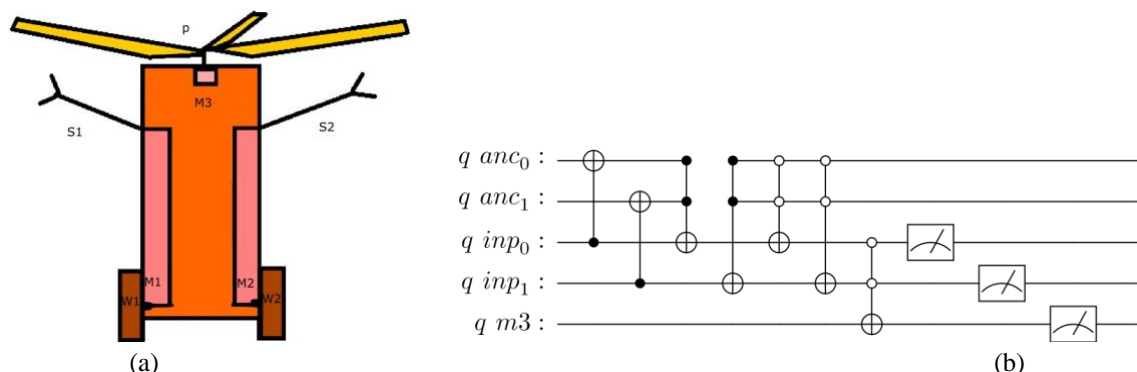


Figura IV: Circuito controlador cuántico para un robot de 3 motores. (a) Representación esquemática; (b) circuito. Los dos qubits superiores representan qubits auxiliares (ancilla), los dos siguientes son los qubits de entrada y el último está conectado al tercer motor, que controla la hélice M3 (14).

5. Robótica cuántica. - El principal objetivo de la robótica cuántica es la aplicación de la mecánica, algoritmos y computación cuánticas en el estudio de la robótica (14).

Se han desarrollado dos enfoques hacia la robótica cuántica. En la primera, la inmersión completa de un robot en un sistema cuántico ha sido estudiado mediante la introducción del concepto teórico de *robots cuánticos* por Benioff (15; 16; 17). En esta aproximación, un robot cuántico es un sistema cuántico móvil que incluye una computadora cuántica a bordo y requiere sistemas auxiliares. En estos trabajos se estudió un robot como un sistema de experimentación contrastable con valores teóricos derivados de la mecánica cuántica y se desarrolló la propuesta de una descripción de sistemas basada en mecánica cuántica capaz de ser consciente de su medio ambiente³, tomar decisiones y tener inteligencia.

³ En el artículo seminal de Benioff (15), esta premisa no fue contemplada sino en sus subsiguientes artículos sobre el tema.

En el segundo enfoque, todos los elementos físicos de un robot regular, tales como sensores y efectores, se consideran como parte de un sistema clásico, es decir, como un sistema macro que obedece las leyes newtonianas y el cuál no es necesario describirlo mediante teoría cuántica para ser analizado/operado. En éste, los elementos de control son implementados mediante circuitos cuánticos (18)(19)(14). Éste ha sido el enfoque adoptado para la experimentación descrita. Para este caso, (18) ha propuesto el término *robot controlado cuánticamente*, mismo que se adoptará en el presente trabajo.

La unidad de control (el circuito cuántico) puede encargarse de procesar tanto los datos sensados como determinar las acciones intermedias o finales a realizar por los actuadores. Como se ha descrito, han sido implementados únicamente circuitos de decisión y actuación.

6. Avances. - Para demostrar la interoperabilidad entre Webots y Qiskit, se han implementado circuitos de control robótico propuestos por diversos autores en trabajos anteriores. Por ejemplo, se implementó el circuito controlador del artículo (14). Éste fue diseñado para controlar tres motores, incluyendo el correspondiente a un rotor que le permite elevarse del suelo cuando la entrada al circuito es $|11\rangle$. Tal circuito se muestra en la figura IV y el código respectivo, por propósitos educativos y demostrativos, se desarrolla a continuación:

```
from qiskit import QuantumCircuit, QuantumRegister
from qiskit import ClassicalRegister, transpile
from qiskit_aer import AerSimulator

q_anc = QuantumRegister(2, 'q_anc')
q_inp = QuantumRegister(2, 'q_inp')
q_m3 = QuantumRegister(1, 'q_m3')

c_m1m2 = ClassicalRegister(3, 'c_m1m2')

qc = QuantumCircuit(q_anc, q_inp, q_m3, c_m1m2)

# input |00>
qc.cx(q_inp[0], q_anc[0])
qc.cx(q_inp[1], q_anc[1])

qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[0])
qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[1])

# (ctrl_state=0) == activo en 0
qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[0], ctrl_state=0)
qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[1], ctrl_state=0)

qc.ccx(q_inp[0], q_inp[1], q_m3, ctrl_state=0)

qc.measure(q_inp, c_m1m2[0:2])
qc.measure(q_m3, c_m1m2[2])

sim = AerSimulator()
qc_trans = transpile(qc, sim)
job = sim.run(qc_trans)
counts = job.result().get_counts(qc_trans)

print(counts)
```

También se implementó el circuito desarrollado en (18) y mostrado en la figura V; éste es un circuito para un estado de entrelazamiento Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ). El mismo permitió controlar los dos motores del robot *e-puck* para obtener un movimiento aleatorio basado en las mediciones del circuito.

La captura de pantalla de la figura VI muestra el circuito anteriormente descrito, siendo ejecutado en el simulador Webots.

7. Conclusiones y trabajo futuro. - Se presentan algunos avances preliminares y funcionales en la intersección de la robótica y la computación cuántica, desarrollados en las plataformas Webots y Qiskit, respectivamente. El simulador Webots ha permitido integrar los circuitos cuánticos desarrollados en la plataforma para programación cuántica Qiskit y utilizarlos como controladores del robot *e-puck*, demostrando la viabilidad del enfoque.

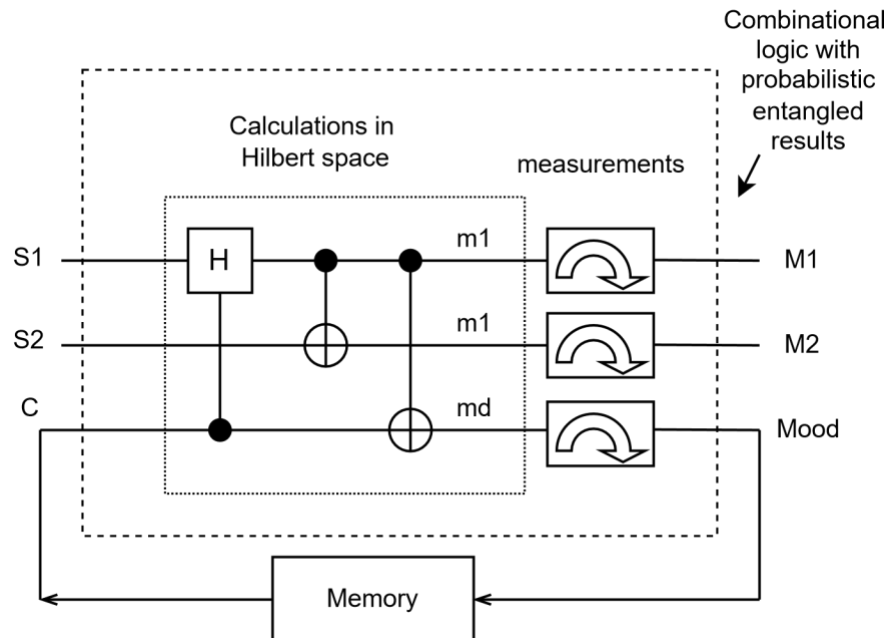


Figura V. Diagrama lógico de autómata cuántico. Sistema de control utilizado en (18).

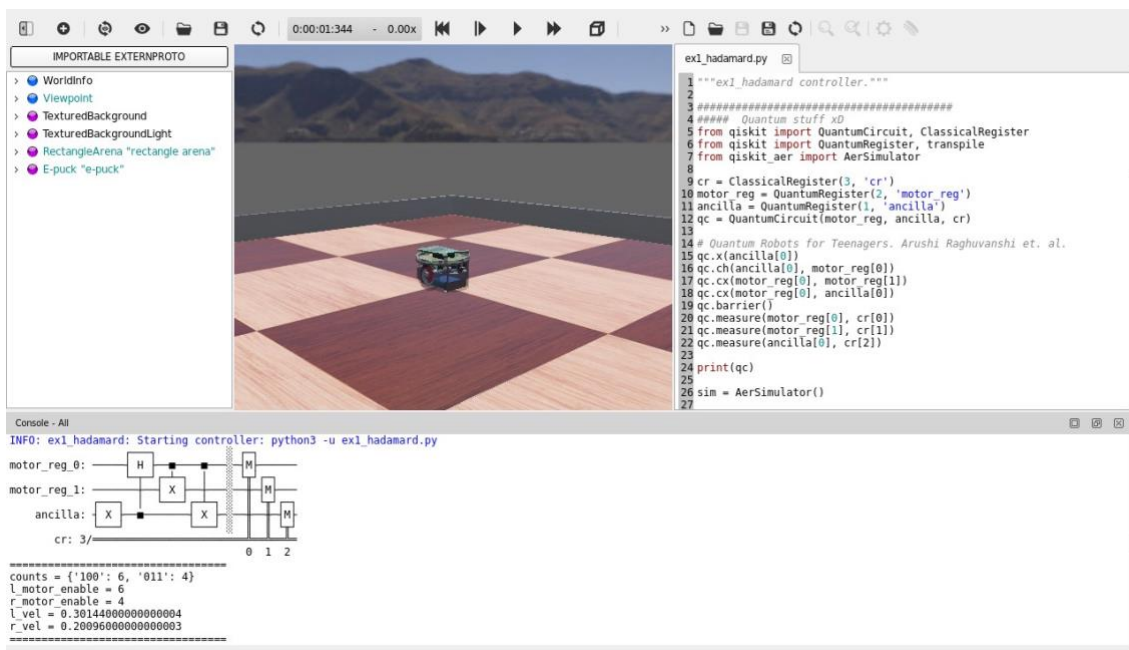


Figura VI. Entorno de simulación Webots, ejecutando un circuito cuántico GHZ como controlador de los motores del robot *e-puck* simulado.

La continuación de este trabajo se orientará a circuitos y robots más complejos simulados y que permitan ser usados tanto como herramienta de aprendizaje accesibles como en investigación posterior con el enfoque de la mostrada

interacción multidisciplinaria entre la robótica y la computación cuántica. Una posibilidad en este respecto se centraría en la versión cuántica del aprendizaje guiado por refuerzo (*Quantum Reinforcement Learning*, QRL) para aportar alguna inteligencia al agente robótico sobre la toma de decisiones y aprendizaje.

Agradecimientos. - Agradezco al comité organizador del CLEI/TLISC por la oportunidad de presentar este trabajo en el congreso y al profesor José Luis Ramírez Alcántara (CENIDET) por su apoyo en la realización del presente trabajo. Mi más profunda y personal gratitud a Karina P. Zaldívar G. por ser siempre mi modelo de trabajo y dedicación.

Referencias

- [1] F. R. Cortés, *Robótica. Control de robots manipuladores*, F. J. R. Cruz, Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2011.
- [2] T. Bräunl, *Robot Adventures in Python and C*. Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [3] M. M. Tadej Bajd and M. Muni, *Introduction to Robotics*. Springer Dordrecht, 2013.
- [4] Z. Cai, *Robotics: From Manipulator to Mobilebot*. World Scientific, 2023.
- [5] O. Michel, “Webots: Professional mobile robot simulation,” *Journal of Advanced Robotics Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39–42, 2004. [Online]. Available: <http://www.ars-journal.com/International-Journal-of-Advanced-Robotic-Systems/Volume-1/39-42.pdf>
- [6] V. Braitenberg, *Vehicles*. MIT Press, 1984.
- [7] P. Benioff, “The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical hamiltonian model of computers as represented by turing machines,” *Journal of Statistical Physics*, vol. 22, no. 5, pp. 563–591, 05 1980. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF01011339>
- [8] “Quantum mechanical models of turing machines that dissipate no energy,” *Physical Review Letters*, vol. 48, pp. 1581–1585, 06 1982. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.48.1581>
- [9] S. Wiesner, “Conjugate coding,” *SIGACT News*, vol. 15, no. 1, p. 78–88, 01 1983. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1008908.1008920>
- [10] Y. I. Manin, *Computable and Uncomputable*. Steklov Institute, 1980.
- [11] R. Feynman, “Simulating physics with computers,” *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, 1982.
- [12] D. Deutsch and R. Penrose, “Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer,” *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 400, no. 1818, pp. 97–117, 1985. [Online]. Available: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1985.0070>
- [13] J. V. Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition*. Princeton University Press, 2018.
- [14] S. Mahanti, S. Das, B. K. Behera, and P. K. Panigrahi, “Quantum robots can fly; play games: an ibm quantum experience,” *Quantum Information Processing*, vol. 18, no. 7, p. 219, 5 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11128-019-2332-4>
- [15] P. Benioff, “Quantum robots and quantum computers,” *Physical Review A*, vol. 58, no. 2, p. 893–904, Aug. 1998. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.58.893>
- [16] “Quantum robots and environments,” *Physical Review A*, vol. 58, no. 2, p. 893–904, Aug. 1998. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.58.893>
- [17] *Space searches with a quantum robot*, ser. Contemporary Mathematics. American Mathematical Society, 2007, vol. 305, pp. 1–12.

- [18] A. Raghuvanshi, Y. Fan, M. Woyke, and M. Perkowski, “Quantum robots for teenagers,” in *37th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL’07)*, 2007, pp. 18–18.
- [19] S. Pradhan, A. Padhi, and B. K. Behera, “Design and simulation of an autonomous quantum flying robot vehicle: An ibm quantum experience,” 2022.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

DCLM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.

Lista de Autores – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Número 27).

List of Authors – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Volume 27).

MIUM27-10: Análisis comparativo entre el método basado en desplazamientos (MBD) y el método basado en fuerzas (MBF) aplicado a edificio dual de 5 pisos.

Ing. Guimo Zavala Cáceres, Universidad de San Martín de Porres (Perú).

Prof. Genner Villarreal Castro, Universidad de San Martín de Porres (Perú).

MIUM27-12: Machine Learning en la detección y predicción de enfermedades del ganado: una visión general.

Ing. Marco Vieto-Vega, Investigador Independiente (Panamá).

Ing. Yaliska Moreno-Gonzalez, Universidad de Panamá (Panamá).

MIUM27-14: Synthesis and characterization of methyl methacrylate - glycerol hydrogels by polymerization in acid medium.

Prof. Laura Trujillo-Vargas, Tecnológico de Antioquia (Colombia).

MIUM27-16: Significance of Total Quality Management and Doing Right First Time in Promoting Environmental Sustainability.

Eng. Prof. Luis Javier Márquez Figueroa, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México).

Prof. Jorge Luis García Alcaraz, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México).

Dr. José Roberto Díaz Reza, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México).

Prof. Jesús Alfonso Gil López, Universidad de La Rioja (España).

MIUM27-17: Thermo-Mechanical Process-Induced Residual Stresses and Deformation Analysis During Manufacturing of Hull Structure.

Eng. Saad Ahmed, National University of Sciences and Technology (Pakistan).

Prof. Muhammad Asif, National University of Sciences and Technology (Pakistan).

Prof. Asad Ali Zaidi, Islamic University of Madinah (Saudi Arabia).

MIUM27-18: Diseño Sismorresistente de un Sistema de Muros Estructurales Aplicando la Norma E.030 del 2003 y 2018 en la Ciudad de La Libertad.

Mag. Marcos Josué Rupay Vargas, Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central (Perú).

Mag. Regner Raúl Parra Lavado, Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central (Perú).

Mag. Jorge Santiago López Yarango, Universidad Nacional del Centro del Perú (Perú).

MIUM27-19: Experimental Study of a Brackish Water Desalination Plant.

Prof. Ifrah Asif, NED University of Engineering and Technology (Pakistan).

Prof. Mirza Hammad Baig, NED University of Engineering and Technology (Pakistan).

Prof. Sohail Hasnain, NED University of Engineering and Technology (Pakistan).

Sadia Ahmed, NED University of Engineering and Technology (Pakistan).

MIUM27-21: Fatigue failure analysis of washing machine top frame under cycling loading – an investigative study in mitigating market complaint.

Prof. Sohail Hasnain, NED University of Engineering and Technology (Pakistan).
MSc Muhammad Mansoor Uz Zaman Siddiqui, University of Engineering and Technology.
Eng. Adeel Tabassum, National University of Sciences and Technology (Pakistan).
Eng. Syed Haider Raza Naqvi, University of Engineering and Technology (Pakistan).
Prof. Asad A. Naqvi, NED University of Engineering and Technology (Pakistan).

MIUM27-34: Comparación de sistemas estructurales en edificio de 5 pisos: Base fija vs. interacción suelo-estructura por modelo Barkan-Savinov en Arequipa, Perú.

Ing. Rosmery Mamani, Universidad de San Martín de Porres (Perú).
Ing. Mirian Ramos, Universidad de San Martín de Porres (Perú).
Prof. Genner Villarreal, Universidad de San Martín de Porres (Perú).
Mag. Arnaldo Falcón, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (Perú).

Artículos Invitados

(TLISC 2024)

MIUM27-40: A Review on Quantum Machine Learning and Quantum Cryptography.

Prof. Mauricio Solar, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Eng. Felipe Cisternas Alvarez, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Eng. Jean-Pierre Villacura, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Prof. Liuba Dombrovskaja, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).

MIUM27-41: Detectando un Espía con Criptografía Cuántica.

Prof. Mauricio Solar, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Ing. Jean-Pierre Villacura, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Ing. Felipe Cisternas Alvarez, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Prof. Liuba Dombrovskaja, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).

MIUM27-42: Implementación Cuántica de un Algoritmo Genético.

Prof. Mauricio Solar, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Ing. Vicente Figueroa, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Ing. Francisco Manriquez, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Ing. Francisco Pizarro, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Prof. Liuba Dombrovskaja, Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).

MIUM27-43: Desafíos en la integración de QPUs a sistemas HPC clásicos.

Prof. Adrian Pousa, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Prof. Victoria Sanz, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

MIUM27-44: Supply and Demand in the Training of Quantum Software Engineering Workforce.

Prof. Álvaro M. Aparicio-Morales, University of Extremadura (Spain).
Prof. Enrique Moguel, University of Extremadura (Spain).
Prof. Jose Garcia-Alonso, University of Extremadura (Spain).
Prof. Alejandro Fernandez, National University of La Plata (Argentina).
Prof. Luis Mariano Bibbo, National University of La Plata (Argentina).
Prof. Juan M. Murillo, National University of La Plata (Argentina).

MIUM27-45: What's Special about Requirements Engineering for Quantum-Classical Systems?.

Prof. Horacio Pendent, Universidad Nacional de Tierra del Fuego (Argentina).

Prof. Libardo Pantoja Yepez, Universidad del Cauca (Colombia).

Prof. Ricardo Perez Castillo, Universidad de Castilla – La Mancha (Spain).

Prof. Julio Ariel Hurtado Alegría, Universidad del Cauca (Colombia).

Prof. Leandro Antonelli, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

Prof. Alejandro Fernandez, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

MIUM27-46: Una adaptación del UML Testing Profile para el Testing de Software Cuántico.

Prof. Ignacio García Rodríguez de Guzmán, Universidad de Castilla – La Mancha (España).

Prof. Moisés Rodríguez Monje, Universidad de Castilla – La Mancha (España).

Prof. Mario Piattini Velthuis, Universidad de Castilla – La Mancha (España).

Ing. María Teresa Merchan Quintana, Universidad de Castilla – La Mancha (España).

MIUM27-47: Modelling Quantum Software: An Annotated Bibliography.

Prof. Luis Mariano Bibbo, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

Prof. Alejandro Fernandez, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

Prof. José Manuel Suarez, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

Prof. Oscar Pastor, Universitat Politècnica de València (Spain).

MIUM27-48: Integración de Webots y Qiskit para la experimentación con circuitos cuánticos como controladores robóticos.

Ing. Diego Carlos Luna-Márquez, Tecnológico Nacional de México (México).

Lista de Revisores – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Número 27).

List of Reviewers – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Volume 27).

- Dr. Ricardo Oviedo Sarmiento, Universidad Nacional Federico Villarreal (Perú).
Dr. Waldo Hasperué, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Dr. Fidel Germán Sagástegui Plasencia, Universidad Privada Antenor Orrego (Perú)
Dr. Víctor Manuel Morales Rocha, Universidad Politécnica de Cataluña (España).
Dr. Alfonso Fernandez, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo (México).
Dr. Augusto Villa Monte, Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Mag. Keller Sánchez Dávila, Universidad Nacional de San Martín (Perú).
Mag. Harvey Charles Dávila Lavi, Universidad Nacional de San Martín (Perú).
Prof. Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Universidad Industrial de Santander (Colombia).
Dr. Carlos Francisco Javierre Lardies, Universidad de Zaragoza (España).
Dr. Jorge Limón Romero, Universidad Autónoma de Baja California (México).
Dr. Mahdi Hassan, Quaid e Awam University of Engineering Science and Technology (Pakistan).
Dr. Ahsanullah Soomro, Quaid e Awam University of Engineering Science and Technology.
Dr. Ahsan Ahmed, NED University of Engineering and Technology (Pakistan)
Dr. Muhammad Asif, National University of Science and Technology (Pakistan)
- Dr. Alejandro Fernandez, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Dr. Enrique Moguel, Universidad de Extremadura (España).
Dr. Federico Holik, Instituto de Física La Plata (Argentina).
Dr. Guilherme Travassos, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil).
Dr. Hernán Astudillo, Universidad Andrés Bello (Chile).
Dr. Ignacio García Rodríguez de Guzmán, Universidad de Castilla-La Mancha (España).
Dr. José García-Alonso, Universidad de Extremadura (España).
Dr. Juan M. Murillo, Universidad de Extremadura (España).
Dr. Laura Gatti, Universidad de Montevideo (Uruguay).
Dr. Leandro Antonelli, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Dr. Luis Bibbo, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Dr. Oscar Pastor, Universitat Politècnica de València (España).
Dr. Rafael Sotelo, Universidad de Montevideo (Uruguay).
Dr. Ricardo Pérez-Castillo, Universidad de Castilla-La Mancha (España).
Dr. Ricardo Rosenfeld, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
Dr. Samuel Sepúlveda, Universidad de La Frontera (Chile).
Dr. Valter Camargo, Federal University of São Carlos (Brasil).