

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

MEMORIA

INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA

Nº 23

FACULTAD DE INGENIERÍA



MEMORIA

Investigaciones en Ingeniería

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

Núm. 23

(2022)

Sumario

Págs.

Editorial – Memoria Investigaciones en Ingeniería continúa apoyando al investigador y al profesional

Rafael Sotelo

1

Analysis of the mechanical vibrations of a complex structure as a damped single degree of freedom system

Análisis de vibraciones mecánicas de una estructura compleja como un sistema amortiguado de un grado de libertad

F. Sánchez-Sarmiento, P. Sorichetti

2-17

Arquitectura de consolidación de la información para seguros de la salud mediante Big Data

Information consolidation architecture for health insurance using Big Data

J. Zerega-Prado, J. Llerena-Izquierdo

18–31

Fingerprint Verification System Based on DWT, Multiple Domain Feature Extraction, and Ensemble Subspace Classifier

Sistema de verificación de huellas dactilares basado en DWT, extracción de características de múltiples dominios y clasificador subespacial de conjuntos

A. Rojas, G. Jovanovic Dolecek

32-49

Desarrollo de competencia investigativa de estudiantes universitarios de ingeniería en proceso de titulación: propuesta metodológica y experiencia

Development of research competence of undergraduate engineering students in the process of graduation: methodological proposal and experience

J. Llerena-Izquierdo, R. Ayala-Carabajo

50–62

Electrificación por microrredes en zonas rurales de la provincia del Azuay, Ecuador

Electrification by microgrids in rural areas of the Azuay province, Ecuador

J. Ochoa Ochoa, C. Ochoa Malhaber, S. Ochoa Ochoa

63-74

Asynchronous Register Less NULL Convention Logic (RL-NCL) Pipeline Architectures Using Basic Gates

Arquitecturas Pipeline Asíncronas Register Less NULL Convention Logic (RL-NCL) Usando Puertas Básicas

G. C. Duarte, D. L. Oliveira

75-87

Una nueva manera de interpretar el método de tres puntos para el modelado del terreno en dos capas horizontales

A new way to interpret the three-point method for soil modeling in two horizontal layers

M. Andrade

88-105

La presión atmosférica y los protagonistas del cambio de percepción

Atmospheric pressure and the protagonist of the perception change

R. Torres Hugues, Y. Ymas Dávila

106-117

Riesgos Ergonómicos asociados a molestias musculoesqueléticas en trabajo remoto en docentes de la UGEL de Picota.

Ergonomic risks associated with musculoskeletal discomfort in remote work in teachers of the UGEL de Picota.

W. Y. Cano Moreto

118-134

Implementation and Evaluation of a Hail-Impact Simulation Device

Implementación y Evaluación de un Dispositivo de Simulación de Impactos de Granizo

F. Blasina, A. Echarri, G. Farber, F. Molina, S. Machín, N. Pérez

135-150

Lista de Autores – Memoria Investigaciones en Ingeniería

151

Lista de Revisores – Memoria Investigaciones en Ingeniería

152

Editorial – Memoria Investigaciones en Ingeniería continúa apoyando al investigador y al profesional.

Llegamos a la edición Número 23 de la revista Memoria Investigaciones en Ingeniería. Desde el primer número en el año 2000 la revista ha crecido de manera continua. Entre otros catálogos, está incluida en Latindex, cumpliendo las 38 características necesarias, en el Directory of Open Access Journals (DOAJ), y en Clarivate Web of Science (WoS), indexada en el Emerging Sources Citation Index (ESCI).

Presentamos trabajos sumamente variados en distintas áreas del quehacer de la ingeniería en Iberoamérica, en temas como análisis de vibraciones en estructuras, big data para seguros de la salud, técnicas de clasificación de huellas digitales, educación e investigación, electrificación rural, microelectrónica, modelado de terreno, ciencias atmosféricas, condiciones laborales, y simulación de impacto de granizo.

Los autores llegan de Argentina, Ecuador, México, Brasil, Cuba, Perú y Uruguay. En algunos casos, de distintas universidades.

Del mismo modo los revisores que han colaborado para que Memoria Investigaciones en Ingeniería mantenga su calidad, provienen de distintos países de Iberoamérica y de Estados Unidos.

Algunos de estos artículos son versiones extendidas de trabajos presentados en IEEE URUCON 2021 (<https://urucon2021.org/>), organizado por la Sección Uruguay de IEEE. Continuaremos ofreciendo esta modalidad de convocatoria a organizadores de congresos para beneficio de los autores y los lectores.

Esta revista tiene como objetivo publicar trabajos de investigación e innovación en ingeniería y tecnología. Confiamos en estar ofreciendo un digno servicio tanto al investigador como al profesional de Iberoamérica.

Agradezco a todos los revisores que participaron. Agradezco a los miembros del equipo editorial, Lic. Valentina Morandi y M.Sc. Ing. Fernando Hernández, por su invaluable aporte.

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

Analysis of the mechanical vibrations of a complex structure as a damped single degree of freedom system

Análisis de vibraciones mecánicas de una estructura compleja como un sistema amortiguado de un grado de libertad

Análise de vibrações mecânicas de uma estrutura complexa como um sistema amortecido de um grau de liberdade

Fernando Sánchez-Sarmiento ¹, Patricio Sorichetti ²

Recibido: Agosto 2020

Aceptado: Julio 2022

Summary. - The use of finite element method software allows the modal and spectral analysis of complex structures with an accessible computational cost. In contrast, with the theory of damped systems of a degree of freedom, solutions can be obtained analytically that describe with greater generality the vibrations of structures subjected to variable forces over time. However, with analytical methods, only very simple structures can be studied. This paper presents a method that allows to calculate the rigidity and effective mass of a structure from the values of the angular frequencies of the structure, with their corresponding inertial loads. Next, the structure can be analyzed as a cushioned system of a degree of freedom. In this way, it is possible to calculate the displacements and accelerations that the structure will suffer when it is excited by an external force variable over time. Subsequently, using D'Alembert's principle and a finite element program, the stresses can be calculated by a static analysis.

Keywords: mechanical vibrations; modal analysis; damped single degree of freedom system.

Resumen. - El uso de programas basados en el método de elementos finitos permite en la actualidad el análisis modal y el espectral de estructuras complejas con un costo computacional accesible. En contraposición, con la teoría de sistemas amortiguados de un grado de libertad se puede obtener analíticamente soluciones que describen con mayor generalidad las vibraciones de estructuras sometidas a fuerzas variables en el tiempo. Sin embargo, con métodos analíticos, sólo pueden ser estudiadas estructuras muy sencillas. En este trabajo se presenta un método que permite calcular la rigidez y la masa efectiva de una estructura a partir de los valores de las frecuencias angulares propias de la estructura, con sus correspondientes cargas inerciales. A continuación, la estructura puede ser analizada como un sistema amortiguado de un grado de libertad. De esta forma es posible calcular los desplazamientos y aceleraciones que sufrirá la estructura cuando es excitada por una fuerza externa variable con el tiempo. Posteriormente, utilizando el principio de D'Alembert y un programa de elementos finitos, se pueden calcular las sollicitaciones con un análisis estático.

¹ Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Austral, fsanchez@austral.edu.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8351-8192>

² Profesor de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, psorich@fi.uba.ar, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3140-2219>

Palabras clave: vibraciones mecánicas; análisis modal; sistema amortiguado de un grado de libertad.

Resumo. - A utilização de programas baseados no método dos elementos finitos permite atualmente a análise modal e espectral de estruturas complexas com um custo computacional acessível. Em contraste, com a teoria dos sistemas amortecidos de um grau de liberdade, é possível obter analiticamente soluções que descrevem de forma mais geral as vibrações de estruturas sujeitas a forças que variam no tempo. No entanto, com métodos analíticos, apenas estruturas muito simples podem ser estudadas. Este trabalho apresenta um método que permite o cálculo da rigidez e massa efetiva de uma estrutura a partir dos valores das frequências angulares da estrutura, com suas correspondentes cargas inerciais. A estrutura pode então ser analisada como um sistema amortecido de um grau de liberdade. Desta forma é possível calcular os deslocamentos e acelerações que a estrutura sofrerá quando for excitada por uma força externa que varia ao longo do tempo. Posteriormente, usando o princípio D'Alembert e um programa de elementos finitos, as forças podem ser calculadas com uma análise estática.

Palavras-chave: vibrações mecânicas; análise de modos; Sistema amortecido com um grau de liberdade.

Nomenclature

ω_n	Natural angular frequency
ξ	Damping ratio
a	Slope of the function f
b	Independent variable of the function f
r_{eff}	Ratio of the structural mass
c	Damping coefficient
$f(t)$	Force applied to the load mass as time function
m_{eff}	Effective mass
m_{effA}	Effective mass analytically obtained
m_{effN}	Effective mass numerically obtained
m_L	Loaded mass
m_s	Structural mass
k	Rigidity of the structure

1. Introduction. -

In many applications, structures are subjected to time-dependent external forces within a broad range of frequencies. Therefore, large resonance effects may take place if an oscillation mode is excited [1]. Usual examples include winds on high voltage transmission lines, seismic loads in buildings, drive train vibrations in vehicles and structures with unbalance rigid rotors. This often results in degraded performance, and in severe cases, even requires costly repairs and/or modifications. Consequently, significant benefits result from a careful analysis at the design phase. Modal analysis by means of finite element methods enables the calculation of resonance frequencies of complex structures. Within the linear elastic range, present-day software packages and personal computers make it possible to achieve highly accurate results at reasonable cost. Even though real-world examples may have many vibration modes, in most cases the lowest frequency (“fundamental”) mode is the most important from an engineering viewpoint. The fact that the response of a dynamic system up to the lowest resonance frequency may be modelled as a second-order system, is a well-known result, arrived by analytical mechanics. In other words, the response of the structure in the fundamental mode (see fig. I) is analogous to a damped single degree of freedom (i.e. mass-dashpot-spring) system, driven by an external time-varying force (see fig. II). The equivalent inertia of the structure is modelled by the effective mass, m_{eff} , and its elastic property is modelled by the rigidity, k. In most structures, the effective mass, m_{eff} , is a fraction of the total mass of the structure, m_s , since, under the action of the external force $f(t)$, the various parts of the structure have different accelerations. The mechanical energy dissipation in the structure (usually very low) is modelled by the damping coefficient c.

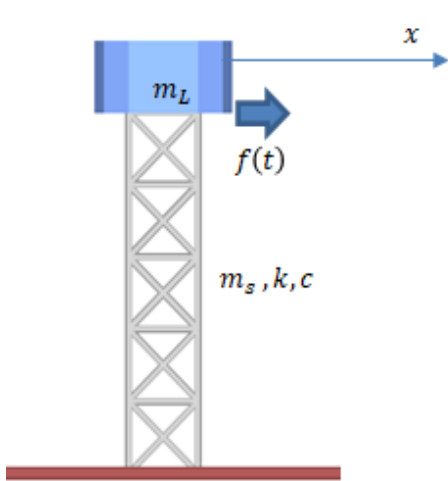


Figure I.- Structure with a transient force.

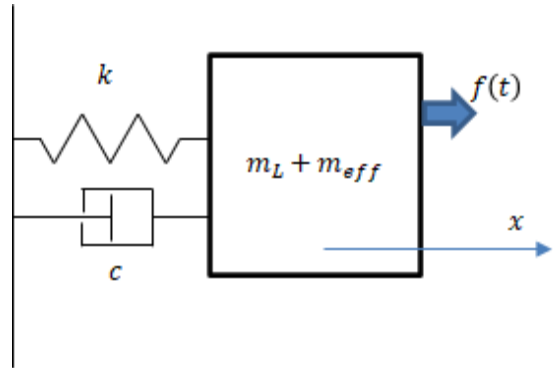


Figure II.- Damped single degree of freedom system

The equation of motion for the damped single degree of freedom system is:

$$\frac{k}{m_{eff} + m_L} x(t) + \frac{c}{m_{eff} + m_L} \frac{dx}{dt} + \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{f(t)}{m_{eff} + m_L}. \quad (1)$$

The solutions of eq. (1) when $f(t) = 0$ describe the free response of the system when displaced from its equilibrium configuration. For eq. (1) it is convenient to define the natural angular frequency, ω_n , corresponding to the free oscillation of the system with no damping ($c = 0$).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_{eff} + m_L}}. \quad (2)$$

The (dimensionless) damping ratio, ξ , proportional to the damping coefficient c , describes the decay of the free response:

$$2\xi\omega_n = \frac{c}{m_{eff} + m_L}. \quad (3)$$

From a dimensional analysis of eq. (1), it follows that the time scale of the decay of the free response is of the order of $(2\xi\omega_n)^{-1} = \left(\frac{c}{m_{eff} + m_L}\right)^{-1}$.

By substituting eqs. (2) and (3), in eq. (1), the equation of motion may be written as:

$$\omega_n^2 x(t) + 2\xi\omega_n \frac{dx}{dt} + \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{f(t)}{m_{eff} + m_L}, \quad (4)$$

Usually, the structural damping is described as a constant value. Bachman has shown usual values for several kinds of mechanical vibrations problems [5]. Radoičić and Jovanović [6] have shown an experimental and theoretical procedure for identifying values of the structural damping coefficient as well as a model for calculating the coefficient. They show an application example for a real tower crane structure. More complex models of the structural damping can be found on [7], including the well-known Rayleigh model,

$$\xi = \frac{1}{2\omega_n} a_0 + \frac{\omega_n}{2} a_1, \quad (5)$$

where a_0 and a_1 are calculated from the structure geometry and material.

The D'Alembert's Principle consist in add to the external forces a fictitious force that, commonly known as inertial force to set the dynamic equilibrium [2]. The principle is power tool because it allows the usage of a static analysis software to solve a dynamic problem. The inertial force is given by

$$f_i(t) = -m_L \frac{d^2x}{dt^2} \quad (6)$$

Consequently, in the vibrating structure the structural mass has a differential inertial mass:

$$df_i(t) = -dm_s \frac{d^2x}{dt^2} \quad (7)$$

In the FEA software, the inertial force of the structure mass is applied in every node with eq. (7) and the loaded mass with eq. (6).

1.1. Case 1: Harmonic excitation. -

If the structure is subjected to an external excitation $f(t)$ with a harmonic time dependence,

$$f(t) = F_0 \sin(\omega_f t), \quad (8)$$

the solution of eq. (4) gives the transient displacement [2], giving by.

$$x(t) = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \sin(\omega_f t + \theta), \quad (9)$$

where

$$r = \frac{\omega_f}{\omega_n} \quad (10)$$

$$tg(\theta) = \frac{2\xi r}{1-r^2} \quad (11)$$

1.2. Case 2: Instant force. -

In the case when the force, F , is applied instantly the solution of eq. (4) is

$$x(t) = \frac{F}{k} \sin(\omega_n t + \theta) \quad (12)$$

And the acceleration

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega_n^2 \frac{F}{k} \sin(\omega_n t + \theta) \quad (13)$$

2. Methodology. -

As indicated in the previous paragraphs, the rigidity and mass parameters that model the response of a structure (Figs. I and II) may be obtained from the natural frequency and the response to a static external force [2]. In most structures, the damping ratio, ξ , is very low. Therefore, analytical techniques may be used for simple geometries. For instance, the effective mass of the structure, m_{eff} , can be calculated using the Rayleigh method or, for beams, by the resolution of the Euler equation [2] [3]. However, for present-day engineering problems, numerical techniques are clearly necessary.

The effective mass of the structure is a fraction of the mass of the structure.

$$r_{eff} = \frac{m_s}{m_{eff}} \quad (14)$$

The function: $f(m_L) = \omega_n^{-2}$ can be defined from eq. (2). It is a linear function of m_L , where the slope is the inverse of the rigidity, and the constant is the ratio of the effective mass to the rigidity. Even though the f is also function of m_{eff} here is presented as a m_L function to obtain m_{eff} :

$$f(m_L) = \omega_n^{-2} = \frac{1}{k} m_L + \frac{m_{eff}}{k} \quad (15)$$

The natural frequencies of the system versus m_L can be found with a modal analysis, using a finite element software, with no limits on the complexity of the structure. Moreover, the natural frequencies could be also measured, for several values of m_L , by measuring the oscillation period for each case. The slope and the constant of the function f , eq. (15), can then be obtained with the approximation of the linear last squares [4], as shown in Fig. III.

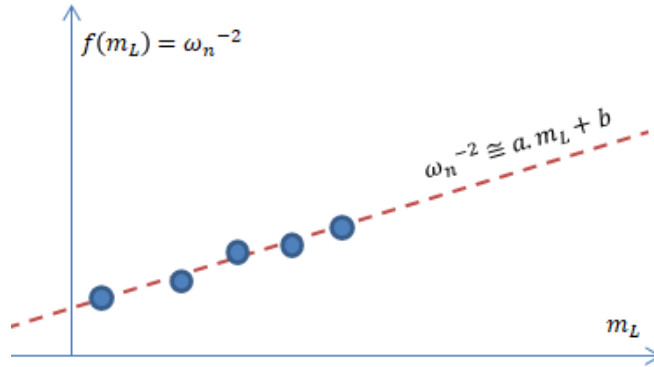


Figure III.- Schematic representation of the f function when the loaded mass and the rigidity are constant.

The slope and the constant of the function f , are given by:

$$a = \left(j \sum_{i=1}^j \omega_i^{-2} m_i - \sum_{i=1}^j m_i \sum_{i=1}^j \omega_i^{-2} \right) / \left(j \left(\sum_{i=1}^j m_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^j m_i \right)^2 \right), \quad (16)$$

$$b = \left(\sum_{i=1}^j m_i^2 \sum_{i=1}^j \omega_i^{-2} - \sum_{i=1}^j \omega_i^{-2} m_i \sum_{i=1}^j m_i \right) / \left(j \left(\sum_{i=1}^j m_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^j m_i \right)^2 \right). \quad (17)$$

Finally, the rigidity of the structure and its effective mass are given by

$$k = \frac{1}{a} \quad (18)$$

$$m_{eff} = b \cdot k \quad (19)$$

3. Numerical examples. - Three examples are given in this Section and solved by the method of Section 2. The results of the first and second examples are compared to the results obtained by the Raleigh method. The third example shows the applicability of the method for a structure that, due to its complexity, cannot be analytically solved. In these three examples the natural frequencies versus m_L have been obtained with the software LISA 8, using the free version (1300 node limit). The properties of the structure material are given in Table I.

Mechanical properties	
Young Module	210 (Gpa)
Poisson coef.	0,3
Density	7800 (kg/m ³)

Table I.- Numerical values of the mechanical properties of the material used in the examples.

3.1. Example 1.- Cantilever beam

This example describes a cantilever beam of rectangular cross section (width 10mm, height 20mm) and a length of 500 mm. The weight of a mass of 0,3 kg is applied instantly.

The model of the structure in LISA 8, with 4 beam elements and 5 nodes, has a fixed support on one end (See fig. IV). Seven runs were made with the added mass m_L of 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0 and 4 kg on the other end. A screenshot with the result of one run is shown on figure V.

Table II shows the results for all the values of m_L , and the values of the function $f(m_L)$ are plotted in fig. VI. The calculated slope is $2,975 \cdot 10^{-7} [N/m]$, and the constant is $5,508 \cdot 10^{-6} [s^2]$.

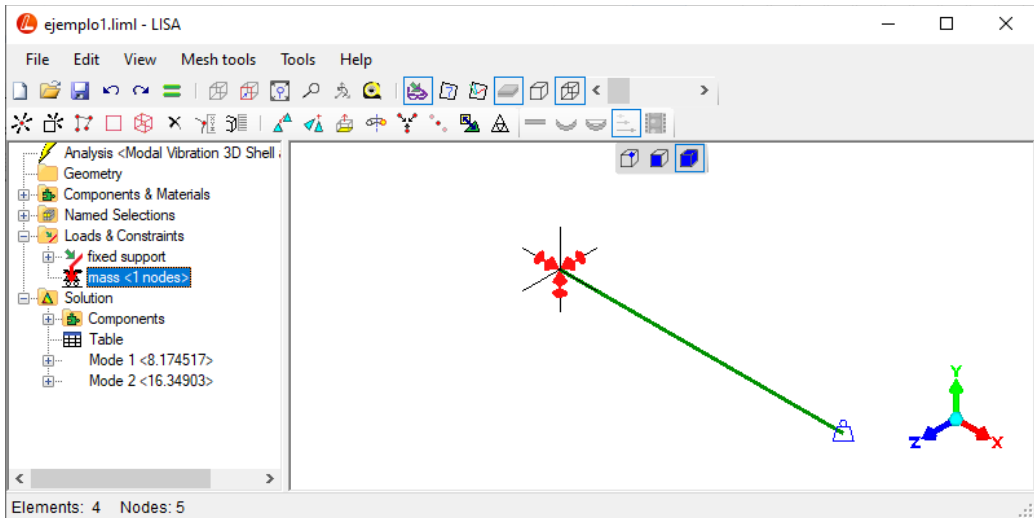


Figure IV.- Example 1, cantilever beam, FEM model in LISA 8

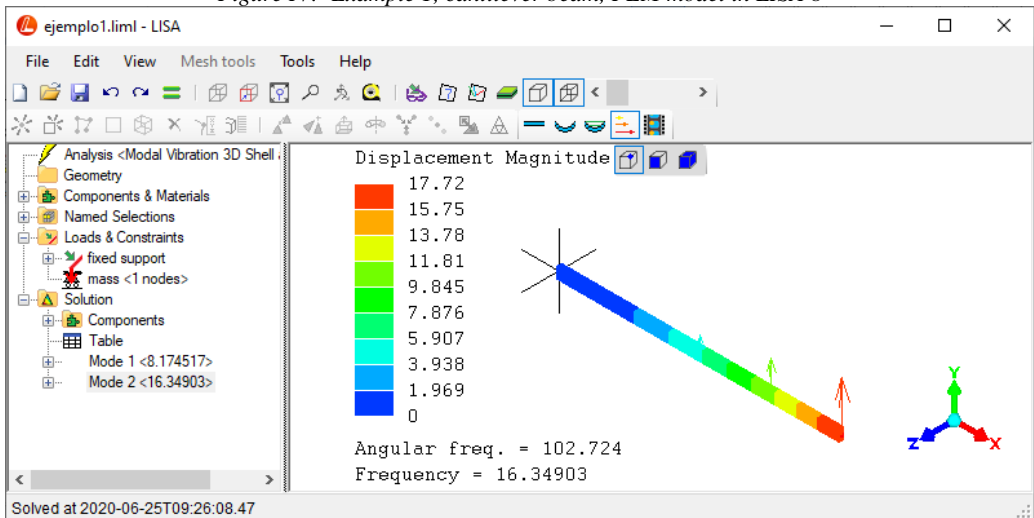


Figure V.- Example 1, results of the modal analysis of a cantilever beam in LISA 8

Loaded mass (kg)	Angular frequency (rad/s)
0.2	295
0.4	240
0.8	185
1	168
2	124
3	103
4	90

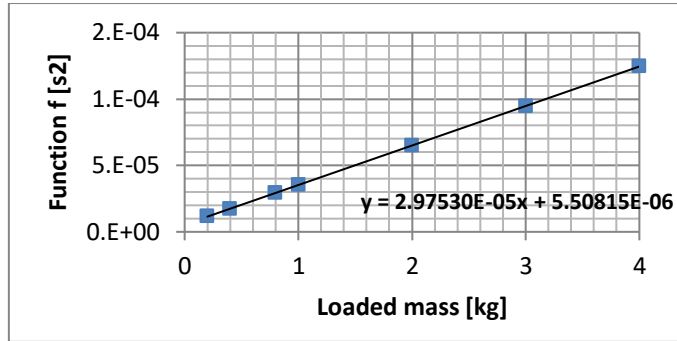


Table II & Figure VI- Example 1, angular frequencies and the “f” function versus the loaded mass, calculated with LISA 8.

The effective mass and the rigidity of the structure are found by replacing the slope and the constant of the linear approximation on equations. 18 and 19.

$$k = a^{-1} = 33612 [N/m]; m_{eff} = b.k = 0,1851 [kg] \tag{20}$$

Finally, the ratio of the effective mass and the structural mass is:

$$r_{eff} = \frac{m_{eff}c}{m_s} = 23,7\% \tag{21}$$

The table III shows the values of mass, the displacement of the modal analysis, the initial acceleration, and the inertial force for every node.

Node	Mass [kg]	Eigenvalue displacement	Initial acceleration [m/s²]	Inertial force [N]
1	0.0975	0	0	0
2	0.195	1.858	0.53	0.1
3	0.195	6.733	1.91	0.37
4	0.195	13.58	3.85	0.75
5	3.0975	21.39	6.06	2.4

Table III.- Example 1, values of inertial force the instantly applied weight load.

Finally, the stress analysis was performed on LISA of the dynamic problem using the static analysis model. Fig. VII shows the result of the longitudinal stress field.

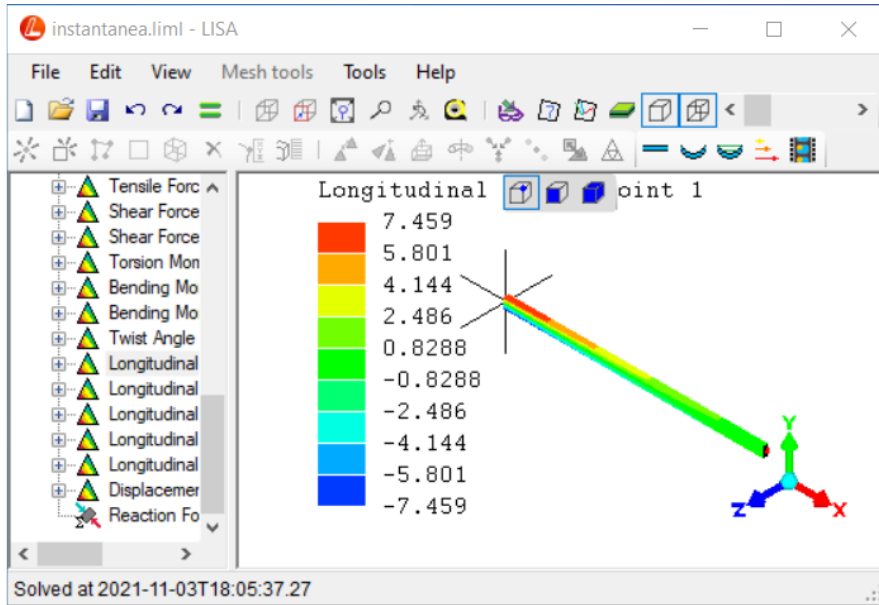


Figure VII- Example 1, Result of the stress analysis of the dynamic problem using the static analysis model.

The analytical Raleigh method [2] allows the verification. The rigidity and the effective mass of the Cantilever beam is given by

$$k = \frac{3EJ}{l^3} = 33600[N/m]; m_{effA} = \frac{33}{140}m_s = 0.1838 [kg] \quad (22)$$

The comparison of the effective mass calculated by analytical and numerical methods gives the following relative error (in percent):

$$e_{\%} = \frac{|m_{effA} - m_{effN}|}{m_{effA}} 100\% = 0.7\% \quad (23)$$

It must be remarked that this value is acceptable for many engineering applications.

3.2. Example 2.- Simply supported beam

This example presents a simply supported beam of rectangular cross section (width 50mm, height 80 mm) with a length of 2500 mm.

The model of the structure in LISA 8, with 20 beam elements and 21 nodes, has a simple support on each end (See fig. IIX). Seven runs were made with m_L values of 3, 9, 30, 50, 100, 150 and 200 kg placed on the beam center. The result of one run is shown in the screenshot in fig. IX. The results of the runs for the different values of m_L are shown in table IV, and the values of $f(m_L)$ are plotted in fig. X. The calculated slope is $7.252 \cdot 10^{-7}$ [N/m], and the constant is $2.783 \cdot 10^{-5}$ [s²].

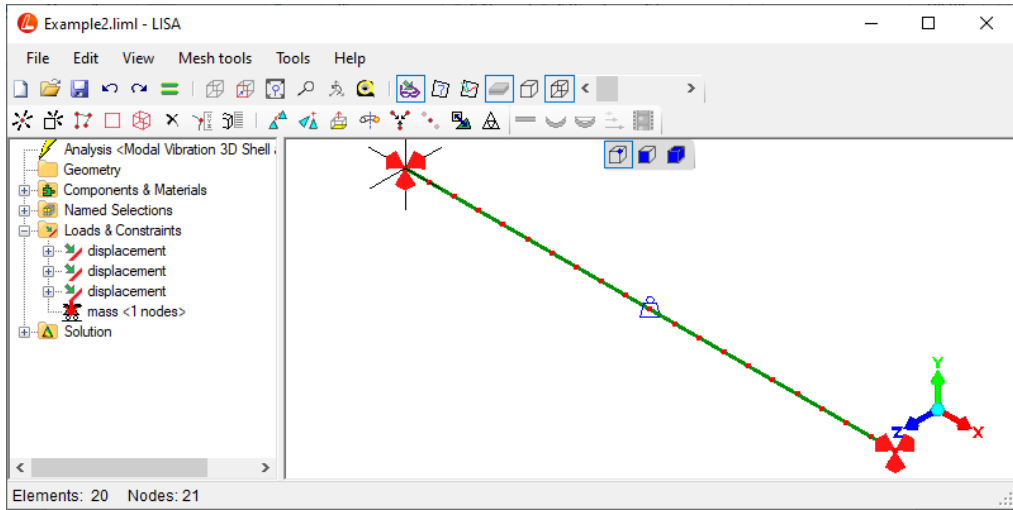


Figure IIX.- Example II, simple supported beam, FEM model in LISA 8

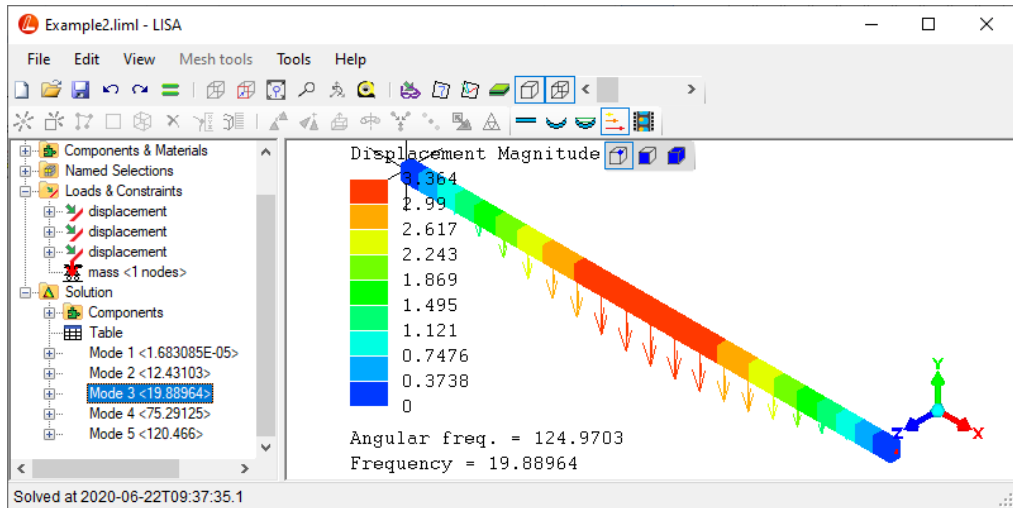


Figure IX.- Example II, results of the modal analysis of a simple supported beam in LISA 8

Loaded mass (kg)	Angular frequency (rad/s)
3	182
9	171
30	142
50	125
100	100
150	86
200	76

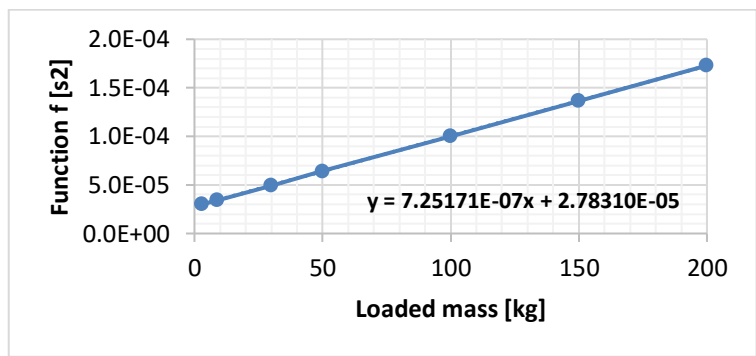


Table IV & Figure X- Example 2, natural angular frequencies of the structure and $f(m_L)$, calculated with LISA 8.

The effective mass and the rigidity of the structure are found by replacing, on eqs. 18 and 19, the slope and the constant of the linear approximation,

$$k = a^{-1} = 1379[N/m]; m_{eff} = b.k = 38.38 [kg] \quad (24)$$

Finally, the ratio of the effective mass to the structural mass is:

$$r_{eff} = \frac{m_{eff}}{m_s} = 49.20\% \quad (25)$$

For the verification, the analytical value of the natural frequency is obtained by the resolution of the Euler equation for a beam, assuming harmonic motion, and the simply support boundary conditions [3].

$$k = \frac{48EI}{l^3} = 1376[N/mm]; \omega_n = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{l^3 m_s}} \quad (26)$$

The effective mass of the single degree-of-freedom system is obtained by replacing eq. 26 on eq. 2.

$$m_{effA} = \frac{48}{\pi^4} m_s = 38,44[kg]. \quad (27)$$

And the analytic ratio of the effective mass to the structural one is:

$$\frac{m_{effA}}{m_s} = \frac{48}{\pi^4} \cong 49,28\% \quad (28)$$

The comparison of the effective mass calculated by analytical and numerical methods gives the following relative error (in percent):

$$e_{\%} = \frac{|m_{effA} - m_{effN}|}{m_{effA}} 100\% = 0,15\% \quad (29)$$

As in the previous example, this error value is acceptable for many engineering applications.

3.3. Example 3.- A complex structure

The third example is a complex structure of beam elements, with no analytical solution. Fig. XI describes its geometry, and the nodes that have restricted displacements. The main beams are tubes of square cross section (220mm x 220mm) and a wall thickness of 15 mm. The others are tubes of square cross section (110 mm x 110mm) and a wall thickness of 12 mm. The height of the structure is 3 meters, and its width is 3.5 meters.

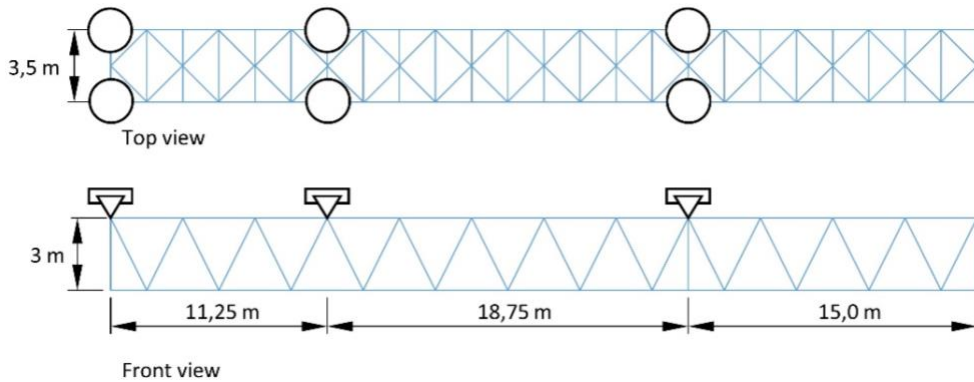


Figure XI.- Example III, geometry and boundary conditions.

The mesh was constructed with one element per beam, which is 173 elements and 69 nodes. Six runs were made with m_L values of 15, 35, 70, 105, 140 and 175 tons. The result of one run is shown on fig. XII. The results of the runs for the different values of m_L are shown in table V, and the values of $f(m_L)$ are plotted in fig. XIII. The calculated slope is $1,250 \cdot 10^{-4}$ [N/mm], and the constant is $4,391 \cdot 10^{-5}$ [s²].

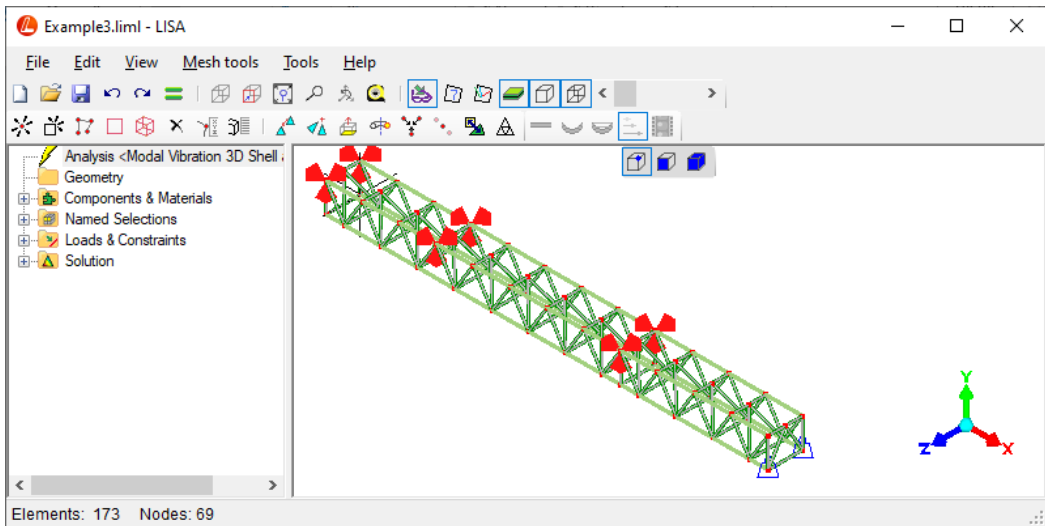


Figure XI.- Example III, a complex beam structure, FEM model in LISA 8.

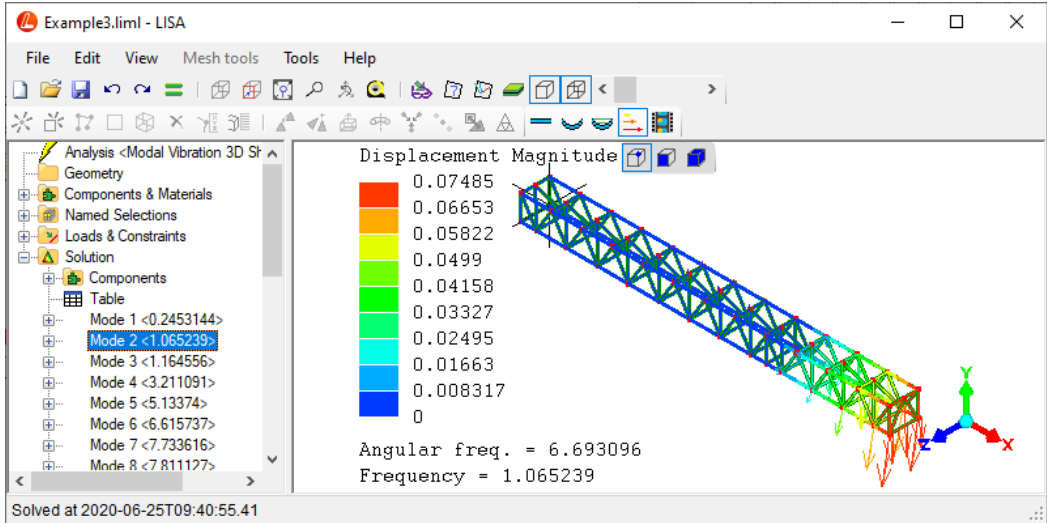


Figure XII.- Example III, results of the modal analysis of a simple supported beam in LISA 8.

Loaded mass (ton)	Angular frequency (rad/s)
15	21
35	14
70	10
105	8,6
140	7,5
175	6,7

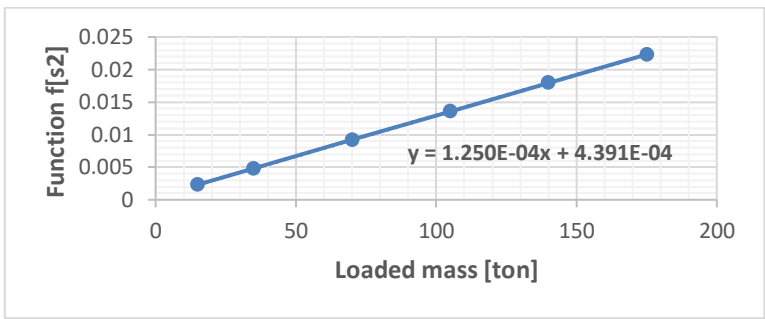


Table V. & Figure XIII- Example III, angular frequencies and $f(m_L)$ versus the loaded mass, calculated with LISA 8.

The effective mass and the rigidity of the structure are found by replacing the slope and the constant of the linear approximation, on eq. 18 and 19.

$$k = a^{-1} = 7997[N/mm]; m_{eff} = b.k = 3,51 [ton] \quad (30)$$

Finally, the ratio of the effective mass to the structural mass is:

$$r_{eff} = \frac{m_{eff}}{m_s} = 11,5\% \quad (31)$$

4. Conclusions. -

This work shows a method to obtain the effective mass and the stiffness of a structure modeled as a damped single degree-of-freedom system. The calculations require the natural angular frequencies of the structure modes, for different values of the loaded mass. The determination of the angular frequencies for different loaded masses can be obtained either experimentally or calculated by a modal analysis using the finite element method. Nowadays, the calculations may be carried out with a low-cost finite element software. This method is particularly useful for complex structures with no analytical solutions. The comparison of the results for structures with analytical solutions indicates that the errors are acceptable for many engineering applications (less than 1%).

Three examples show the capabilities of the method to perform the stress analysis, of the dynamic problem using a static analysis and the D'Alembert's Principle.

5. References

- [1] Green, D., & Unruh, W. G.; *The failure of the Tacoma Bridge: A physical model*, American journal of physics, 2006. 74(8): p. 706 – 716
- [2] Paz, M. & Kim, H K. *Structural Dynamics*, 2019, 7th Edition. Springer.
- [3] Thomson, W T. & Dillon Dahleh M. *Theory of vibration with Applications*, 1998, 5th Edition. Prentice-Hall, inc.
- [4] Burden, R. L. & Faires, J D. *Numerical analysis*, 2011, 9th Edition. Cengage.
- [5] Bachmann, H., Ammann, W. J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G. H., ... & Nussbaumer, H. *Vibration problems in structures: practical guidelines*, 1996, 2th Edition. Institut für baustatik und konstruktion, ETH Hônggerbrg
- [6] Radoičić, G., & Jovanović, M; *Experimental identification of overall structural damping of system*, Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2013. 59(4): p. 260 – 268
- [7] Cruz, C., & Miranda, E; *Evaluation of the Rayleigh damping model for buildings The failure of the Tacoma Bridge: A physical model*, Engineering Structures, 2017. 138: p. 324 – 336

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

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

PS 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.

Arquitectura de consolidación de la información para seguros de la salud mediante Big Data

Information consolidation architecture for health insurance using Big Data

Arquitetura de consolidação de informações para planos de saúde usando Big Data

José Zerega-Prado ¹, Joe Llerena-Izquierdo ²

Recibido: Febrero 2022

Aceptado: Julio 2022

Resumen. - La identificación de los datos que están en varias fuentes de información y su consolidación para entregarla como útil se logra con Big Data. El objetivo general de este trabajo es desarrollar un diseño de arquitectura de consolidación de la información para seguros de la salud mediante Big Data. Para esta propuesta de investigación se utiliza el método empírico analítico, de tipo cuasi experimental con enfoque cuantitativo, mediante el análisis de referencias relevantes y especificación de los componentes de la arquitectura. Los resultados de esta investigación permiten categorizar diferentes arquitecturas computacionales para seguros de la salud mediante una revisión de literatura relevante, desarrollar un modelo de arquitectura de un sistema computacional para una empresa ecuatoriana de seguros de salud orientado a la consolidación de la información, y evaluar la metodología de estudio utilizada para establecer factores viables del modelo. El aporte de este trabajo permite determinar la aplicabilidad del modelo a empresas de seguros de salud nacionales o extranjeras mediante la contrastación de factores viables en una empresa específica del medio. Se concluye que las distintas fuentes de información o tipos de datos utilizados en el ámbito de los seguros de salud permiten conocer varias aristas del análisis de datos a través de una arquitectura en Big Data, además de obtener indicadores para mejorar la toma de decisiones; el 73% de los factores establecidos son viables en una empresa ecuatoriana de seguros de salud.

Palabras clave: Aplicaciones de Big Data; Salud y seguridad; Arquitectura de la información.

Summary. - *The identification of data that is in various sources of information and its consolidation to deliver it as useful is achieved with Big Data. The overall objective of this work is to develop an information consolidation architecture design for health insurance using Big Data. For this research proposal, the analytical empirical method is used, of a quasi-experimental type with a quantitative approach, through the analysis of relevant references and specification of the architecture components. The results of this research allow categorizing different computational architectures for health insurance through a review of relevant literature, developing an*

¹ Ingeniero en Sistemas, GIEACI Research Group, <https://gieaci.blog.ups.edu.ec/>, jzerega@est.ups.edu.ec, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7688-5149>

² Magister en Sistemas de Información Gerencial, GieTICEA Educational Innovation Group, <https://gieaci.blog.ups.edu.ec/>, jlllerena@ups.edu.ec, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9907-7048>

architectural model of a computational system for an Ecuadorian health insurance company oriented to the consolidation of information, and evaluating the study methodology used to establish feasible factors of the model. The contribution of this work allows us to determine the applicability of the model to national or foreign health insurance companies by contrasting feasible factors in a specific company of the environment. It is concluded that the different sources of information or types of data used in the field of health insurance allow to know several edges of data analysis through a Big Data architecture, in addition to obtaining indicators to improve decision making; 73% of the established factors are viable in an Ecuadorian health insurance company.

Keywords: *Big Data applications; Health and safety; Information architecture.*

Resumo. - *A identificação dos dados que estão em várias fontes de informação e sua consolidação para entregá-los como úteis é conseguida com o Big Data. O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um projeto de arquitetura de consolidação da informação para planos de saúde por meio de Big Data. Para esta proposta de pesquisa, é utilizado o método empírico analítico, de tipo quase-experimental com abordagem quantitativa, por meio da análise de referências relevantes e especificação dos componentes da arquitetura. Os resultados desta pesquisa permitem a categorização de diferentes arquiteturas computacionais para seguros de saúde por meio de uma revisão da literatura relevante, o desenvolvimento de um modelo de arquitetura de um sistema de computador para uma seguradora de saúde equatoriana orientado para a consolidação de informações e a avaliação do metodologia de estudo utilizada para estabelecer os fatores viáveis do modelo. A contribuição deste trabalho permite determinar a aplicabilidade do modelo a seguradoras de saúde nacionais ou estrangeiras, comparando fatores viáveis em uma empresa específica no ambiente. Conclui-se que as diferentes fontes de informação ou tipos de dados utilizados na área de seguros de saúde permitem conhecer vários aspectos da análise de dados por meio de uma arquitetura de Big Data, além de obter indicadores para melhorar a tomada de decisões; 73% dos fatores estabelecidos são viáveis em uma seguradora de saúde equatoriana.*

Palavras-chave: *Aplicações de Big Data; Saúde e segurança; Arquitetura de informação.*

1. Introducción.- Los datos en el ámbito de la salud se generan desde diferentes fuentes y formatos; algunos de ellos son el historial médico, ingresos y salidas de hospital, medicamentos, tratamientos y prescripciones, datos de pacientes, imágenes, farmacias, laboratorios, sensores y compañías de seguros; estos datos están en continuo crecimiento, se generan con más velocidad y en varias diversidades [1][2]. A su vez las compañías en seguros de salud basan sus procedimientos y sistemas en datos generados por el sector de la salud [3][4]. Los seguros de salud se aplican en diferentes sectores como, el sector público que atiende personas con financiamiento de impuestos, el sector privado que se financia con el cobro a los clientes, el seguro social que se financia con aportes de los empleados, y finalmente el seguro comunitario que se financia de impuestos y de la participación de la comunidad [5][6].

En los seguros de salud se evidencia la usabilidad del Big Data (BD) por las siguientes razones: entender la expansión de enfermedades, tendencias en uso de medicamentos, mejorar los servicios médicos, aumentar el conocimiento médico desde diferentes perspectivas, suministrar información médica a los clientes, divisar cambios en prescripciones médicas, obtener sensores sociales, vincular las prescripciones entre medicamentos y enfermedades [7][8][9], búsqueda en aumentar la experiencia del cliente, mejorar los comentarios de los clientes en los procesos y redes sociales [5][10], detectar fraudes generales en los reclamos [11], entre otros. Así Big Data introduce grandes mejoras en el área del seguro de salud como: lealtad y retención de clientes, entender la conducta de los clientes, buscar oportunidades con otros clientes, entender la conducta de los canales de ventas en seguros, aumento en venta de seguros de salud, conducta de los beneficiarios de las pólizas, búsqueda de nuevas redes de personas, reducción de costos y precios en la compañía, detectar fraudes en los reclamos, selección inmediata de reclamos interrelacionadas entre compañías y mejoras en los proceso de reclamaciones [5][12].

El gobierno de India explora los seguros de salud y el financiamiento para analizar el alza de precios en la atención de salud, enfermedades y verificar medicamentos. También utiliza Big Data para reducir los costos de atención médica, proveerla en un menor tiempo, dar un amplio acceso a un número mayor de personas y mejorar la calidad [5][13]. En Japón todos los ciudadanos están obligados a adquirir un seguro de salud, es decir la cobertura es 100%. Naciones que aplican Big Data en seguro de salud son India [5], Japón, Corea, Taiwán [7], Indonesia [14]. Los participantes en los seguros de salud son: pacientes, beneficiarios, compañías farmacéuticas, proveedores de salud públicos y privados, médicos, compañías de seguro médico, compañías de seguro general, intermediarios de seguros, gobiernos locales y los gobiernos nacionales [7][15]. Las existentes leyes locales y normas generales para uso correcto de los datos de salud, deben ser cumplidas por médicos y proveedores de salud, además los cambios en las regulaciones se aplican a los procedimientos y sistemas informáticos; es necesario recordar que la adherencia en normas de salud es esencial en la gestión de información privada de los pacientes, y en este escenario los datos generados por la pandemia COVID-19 también deben respetarse [16][17][18].

Ecuador tiene 21 compañías privadas en seguros de salud legalmente constituidas bajo control de la entidad de la Superintendencia de Compañías, Valores y Seguros. Además, este tipo de compañía de seguros de salud es llamada medicina pre pagada debido a que estas compañías ofrecen los seguros en forma directa o por intermediarios del sistema de seguros existente en el medio, así los clientes contratan este servicio por un pago anual [19][20]; además existe un servicio público del gobierno ecuatoriano que reembolsa dinero a las personas en caso de accidentes, por ejemplo el seguro de tránsito [21]. Este estudio se centra en los datos a nivel general de los reclamos a compañías en seguro de salud. Los sistemas en seguros de salud gestionan la adquisición de datos por medio de: solicitudes de seguro individual, declaración del médico, formulario de reclamos, anexos de explicaciones médicas, anexo de datos de los dependientes, formulario de pago, anexo de cambios o actualización. Los datos que existen en las compañías de seguros de salud tienen características heterogéneas, es decir están en un formato estructurado (bases de datos, hojas

electrónicas) y en formato no estructurado (procesadores de palabras, correos electrónicos, archivos portables «pdf», redes sociales). Desde el área de salud, cada día se generan y capturan datos, y están en revisión desde sistemas que pertenecen a las compañías en seguro de salud, y estos grandes datos necesitan procesos, herramientas y tecnología para una organización sistemática [5][22][23].

En las compañías de seguros de salud, el trabajo sobre análisis de datos es complejo, la confirmación de discrepancias toma mucho tiempo, la detección de documentos fraudulentos es difícil de detectar, existe gran cantidad de documentos de reclamos, se evidencia diversidad en tratamientos y prescripciones médicas, es decir los datos son abundantes [11][24][25]. En los sistemas de seguros de salud, los clientes solicitan el reembolso de los pagos en atención médica y medicina a través de formularios que poseen datos clínicos y detallados.

Se propone un modelo computacional para una empresa ecuatoriana en seguros de salud que gestione los datos heterogéneos y los consolide en información, para el modelo propuesto se debe exceptuar aquellos datos que provienen de pruebas médicas, imágenes o radiografías debido a que éstos, son datos confidenciales del paciente. El objetivo general plantea desarrollar un diseño de arquitectura de consolidación de la información para seguros de la salud mediante Big Data.

2. Metodología. - Para la propuesta de diseño de una arquitectura de consolidación de la información se utiliza una metodología empírico analítica, de tipo cuasi experimental con enfoque cuantitativo para el análisis de las referencias y propuesta de los componentes de la arquitectura. Se revisan las bibliotecas virtuales IEEEExplore, Scopus, ACM, WoS entre otras. Se identifican y seleccionan los documentos con base teórica de propuestas sobre Big Data y Health Insurance. Se analizan los componentes de las arquitecturas en Big Data en los artículos científicos relevantes. Se escogen artículos científicos de alto impacto para el análisis de los elementos necesarios que permitan proponer una arquitectura de Big Data en el área de seguros de salud para una empresa en el contexto ecuatoriano. Se elabora un modelo de la arquitectura, su diagrama y debida explicación. Finalmente se evalúa la metodología utilizada para la factibilidad y aplicabilidad en una empresa específica en el medio.

En el desarrollo del modelo de arquitectura se utiliza una metodología iterativa [26] que ayuda a gestionar, examinar y visualizar los datos, la metodología contiene buenas prácticas y técnicas coordinadas que consiste en 5 fases: i) Definir etapas de los datos, ii) Gestionar las fuentes de datos, iii) Valorizar los datos, iv) Selección del almacén de datos, v) Implementación visual del Big Data. En la figura I se muestran las fases, en un proceso iterativo, debido a que se pueden realizar y repetir cada vez que existan más hallazgos de datos, de acuerdo con esto, el diseño de la arquitectura se aplica sobre datos de una empresa ecuatoriana de seguros de salud.

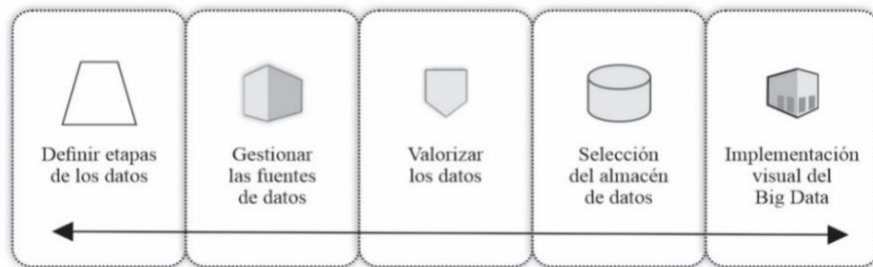


Figura I.- Metodología para desarrollo de Big Data

3. Revisión de la literatura. -

3.1. Big Data y conceptos generales. - Big Data es una colección de conjuntos de datos en considerables volúmenes. Medir o localizar problemas para una organización es complicado por la

variedad de datos que tiene. Con Big Data se abren posibilidades de aplicar herramientas tecnológicas, procesos y métodos para gestionar el conjuntos de datos y luego su posterior almacenamiento [5][27]. El conjunto de datos se almacena en formato estructurado o no estructurado y los datos disponibles sirven como plataforma de predicción [3][28].

De acuerdo a Alim y Abdul [3], Big Data tiene tres características principales: volumen, velocidad y variedad. Debido a que, en volumen, los datos médicos se duplican anualmente. En velocidad, el área de salud de cualquier departamento, redes o equipo genera más datos que otras áreas o sectores. En variedad, los datos generados por los equipos médicos son diferentes por cada equipo. Otros autores consideran más características: en veracidad, la información generada y almacenada es necesario mantener limpia y precisa [5][29]. En valor, va de acuerdo con el resultado. En validez, el dato debe ser correcto. En variabilidad, los datos tienen inconsistencia. En volatilidad, es la persistencia de los datos que determinan el almacenamiento. En visualización, es la facilidad de entender los datos [3].

3.2 Casos del uso de Big Data en Seguros de Salud.- Existen problemas de ética, uso, seguridad y privacidad para implementar Big Data en datos de salud y para alcanzar un buen éxito es necesario garantizar la seguridad y privacidad en los datos médicos, además de adoptar estándares y establecer un buen diseño del procesamiento de datos [1]. En India el gobierno respalda fuertemente la atención médica y los investigadores aplican BD sobre datos de salud, con ello obtienen conocimiento sobre los cuidados de salud que deben tener en los pacientes [5]. En Japón para identificar las causas de reclamos en los seguros, su modelo propone una revisión de medicación en lapsos de tiempo, estas prescripciones se descomponen para visualizar el comportamiento de medicina recomendada por el médico [7]. El seguro de salud nacional en Indonesia tuvo un aumento en las tarifas del año 2019, por esta razón aplicaron Big Data para capturar y estudiar los sentimientos expresados por los usuarios en una red social [14]. La reducción de fraudes en las compañías de seguros de salud fue minimizada a través de un framework que revisa los reclamos de seguros con la identificación de datos en los documentos [11]. Una comisión del gobierno de Australia analizó los gastos anuales de hospitales en 3 mil millones de dólares australianos, para reducir costos y aumentar la calidad de vida [30]. Existen algoritmos que trabajan sobre Big Data de compañías en seguros de salud, estos algoritmos evitan o localizan los posibles fraudes en los reclamos de una provincia de China [31]. En Australia se utilizan dos sistemas computacionales que analizan los reclamos en seguros de salud y utiliza los macro datos para descubrir fraudes, derroches o sobre precios en las transacciones [32], en este caso particular los investigadores aplicaron un modelo cuantitativo de Big Data en seguros de salud con datos de 1500 reclamos [33]. Se presenta un enfoque que se aplica a macro datos generados por el sistema informático en seguros de medicina para encontrar errores de datos o datos falsificados [34].

3.3 Datos generales en las compañías de seguros de salud.- Se explica algunos datos en las compañías en seguros de salud, estos datos contienen a nivel general, una solicitud de seguro individual, declaración del médico, formulario de reclamos, anexos de explicaciones médicas, anexo de datos de los dependientes, formulario de pago, anexo de cambios o actualización, entre los más relevantes. En hojas electrónicas están cotizaciones, calculadoras de constitución física, calculadoras de prorrates e inclusiones. En procesadores de palabras están las cartas avales que se envían a los proveedores para que den cobertura directa a los clientes, las cartas de asegurabilidad que detallan la información general de la cobertura que tienen los clientes, las cartas de siniestralidad que contiene resumen de los reclamos que han presentado los clientes, el certificado de cobertura, aviso de prima, recibos de pago, tarjetas de membresía y documentos de anexos. En la página web de la empresa los visitantes tienen la disponibilidad de dejar mensajes.

4. Resultados.- En esta fase se obtuvieron tres resultados de acuerdo con los objetivos específicos

del estudio de investigación.

4.1. Categorizar diferentes arquitecturas computacionales para seguros de la salud mediante una revisión de literatura relevante.- Se ha categorizado las arquitecturas de acuerdo a los objetivos encontrados en otros trabajos relevantes, y las categorías son: prevención de enfermedades [5], [33], [35], [36] y [37] es decir, el 25% se concentraron en obtener mejores prácticas de salud o alimentación; causas de reclamos [7] y [38] es decir, el 10% se concentraron en las principales causas o razones que hacen los clientes en sus reclamos; expresión de sentimientos [14] es decir, el 5% se concentró en conocer las opiniones positivas o negativas sobre los reclamos; fraudes en reclamos [11], [31], [32], [34], [39], [40], [41], [42] es decir, el 40% de las arquitecturas se concentraron en detectar fraudes o estafas en los reclamos a los seguros de salud; predicción de enfermedades [30] y [43] es decir, 10% se concentra en conocer qué enfermedades podrían acaecer sobre la población; seguridad de datos [44] y [45] es decir, 10% trabaja sobre seguridad de información sobre salud de los clientes, ver figura II.

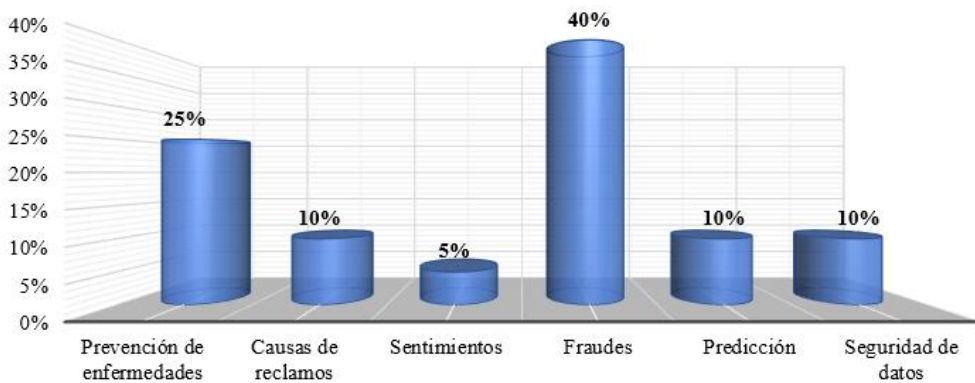


Figura II.- Categorías de los objetivos de las arquitecturas

4.2. Desarrollar un modelo de arquitectura de un sistema computacional para una empresa ecuatoriana de seguros de salud orientado a la consolidación de la información.- De acuerdo a la metodología utilizada [26] se sigue el siguiente orden:

i) Definir etapas de los datos.- Aquí se identifican los requisitos de información funcionales y los requisitos de información no funcionales que sirven para el análisis del proyecto de Big Data; los requisitos funcionales establecen la estructura de datos y los requisitos no funcionales establecen las herramientas apropiadas para las labores de análisis. Entre los requisitos no funcionales se destacan: a) oportunidad-circunstancia de análisis que define la condición de tiempo desde la captura de datos hasta el análisis, b) exigencias en calidad de datos, y c) tiempo de consultas. Se adoptan cuatro tipos de labores de análisis representadas en la tabla I y se aplica los requisitos no funcionales: a) oportunidad - circunstancia en segundos, horas y días, b) exigencias en calidad de los datos en baja, media y alta, c) tiempo de consulta en post segundo y sub segundo.

Ambiente	Circunstancia	Calidad de Datos	Tiempo de consulta
Datos sin procesar	-	baja	post – segundo
Reportes	días	alta	post – segundo
Procesamiento en línea	horas	media	sub – segundo
Tablero de gestión	horas	media	sub – segundo

Tabla I.- Requerimientos no funcionales

En este caso de la compañía de seguros de salud, el procesamiento en línea y el tablero de gestión son bajo tiempo/latencia y tienen la misma calidad de datos y, la misma circunstancia, basados en esto se definen 3 etapas, ver figura III.



Figura III.- Camino de datos para la compañía

ii) Gestionar las fuentes de datos.- Aquí se recolectan datos sin procesar y son cargados al sistema de archivos Big Data para que se almacenen en un clúster HDFS; de acuerdo a las oportunidades de la primera fase y la generación de las fuentes de datos, el responsable del Dataware House puede utilizar dos técnicas; la primera técnica es “Carga por lotes” que utiliza en momentos que los datos están lejano del tiempo real o pueden estar empaquetados y la herramienta a utilizar es MapReduce; la segunda técnica es “Carga de transmisión” que procesa los datos en tiempo real con la herramienta Apache Spark, y los datos en diferido los procesa con la herramienta Apache Flume. En ambas técnicas la conexión debe ser persistente con las fuentes de datos.

Para el caso de una compañía de seguros de salud en el contexto ecuatoriano existen 12 fuentes de datos comunes y se recomienda el uso de la “Carga de transmisión” para la base de datos, la técnica de la “Carga por lotes” para los archivos que están en hojas electrónicas o procesadores de palabras (variedad), debido a que estos archivos se generan a diferentes velocidades (velocidad); la herramienta de almacenamiento frecuente es HDFS para el procesamiento de los archivos distribuidos en diferido semanalmente, Hadoop es el *framework* libre que permite ejecutar aplicaciones en clusters y MapReduce para el soporte de la computación paralela y distribuida de los macrodatos, Kafka es un estándar para recolectar mensajes como clics o comportamientos de usuarios en las páginas web, y finalmente Apache Streaming para procesar los conjuntos de mensajes.

iii) Valorizar los datos.- Los datos sin procesar que están almacenados deben ser explorados para diseñar un modelo de datos multidimensional que genere valor a los datos, y estos datos recolectados en la segunda fase tienen entidades y relaciones no visibles o sin identificarse; el modelo de datos da a conocer estas entidades y relaciones. El Modelado Multidimensional es simple porque divide el problema en hechos y dimensiones, es eficiente porque implementa un modelo conceptual, y se basa en un descubrimiento iterativo a través de la exploración de los datos sin procesar. El modelo diseñado debe responder incógnitas relevantes para la empresa.

1) Explorar las fuentes de datos sin procesar: Aquí se identifica el requerimiento de información “para analizar los reclamos de clientes” (hecho), mediante la “facturación promedio” (medida) en función de: póliza, reclamos, renovación, pagos, clientes, dependientes, zona, agencia, fecha, tipo transacción (dimensiones); las consultas deben devolver la facturación, reclamos, pagos o renovaciones media agregada por fecha, y esta consulta permite plasmar con el requisito de información “analiza los reclamos de clientes”, ver figura IV.

2) Integración: Aquí se propone integrar los varios modelos conceptuales que sean similares en sus hechos. La integración se repite iterativamente al momento de incorporar las fuentes de datos, entonces el resultado debe ser el modelo conceptual en Big Data, por esta razón se determinaron cuatro dimensiones y con ellas se realiza el análisis de las medidas.

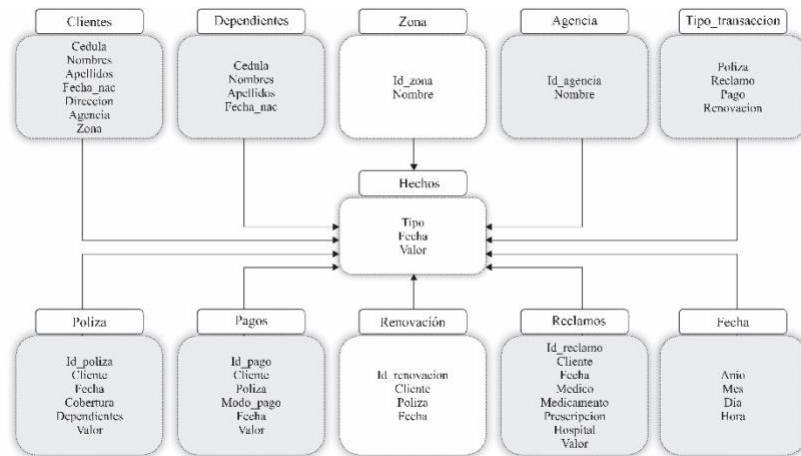


Figura IV.- Modelo conceptual del Big Data Warehouse

3) Enriquecimiento de Big Data Warehouse: Con el modelo conceptual se puede entregar consultas a través de Apache Pig o Hive para consultar datos sin procesar, además este almacén es flexible, es decir, el modelo puede ser actualizado y puede ser enriquecido con dos alternativas como adicionar otros datos fuentes y aplicar minería de datos.

Para el caso de una compañía de seguro de salud en general, para adicionar otros datos se consideran *brokers* (personas intermediarias en operaciones transaccionales en el ámbito financiero), vendedores independientes, sucursales, puntos de venta, puntos de reclamos y redes sociales. Para minería de datos se evidencia que hay diferentes tipos de clientes como personas o empresas, y se obtiene una nueva jerarquía, ejemplo, zona → tipo de cliente. En esta propuesta de investigación se aporta con una forma sistemática de reducir la complejidad en la integración de datos que se presenta como un desafío o problema de Big Data, además este estudio se enfoca en requisitos analíticos para cumplir y responder con criterios validados de datos relevantes.

iv) Selección del almacén de datos. - Se selecciona un Big Data Warehouse para su posible y sencilla implementación, este almacén debe soportar herramientas de Inteligencia Empresarial y tener buena respuesta en la latencia de consultas. Para el caso de una compañía de seguros de salud, se selecciona Apache Hive con herramientas de Inteligencia Empresarial en memoria, que gestionan aplicaciones OLAP y Dashboard, debido a que en esta fase se debe implementar el modelo conceptual con el uso de la herramienta Hive luego, transformar los datos del esquema conceptual en herramienta de Apache Pig finalmente, es posible consultar y analizar el Big Data o pasar a una base de datos en memoria.

v) Implementación visual del Big Data.- Con todos los datos cargados en el almacén de datos, estos se utilizan a través de las herramientas de Inteligencia Empresarial para diseñar y visualizar tablas o cuadros de mando, debido a que estas herramientas generan más valor e interpretación a los datos en forma práctica y sencilla. En este caso de la compañía de seguros de salud se propone el uso de Power BI y con ello, la verificación de los siguientes indicadores:

- Indicadores área de ventas: mide la cantidad de prima (valor de pólizas) ingresado por mes, por agencia y por zona para determinar la región y agencia que está vendiendo más mensualmente, también se suele realizar revisiones anuales para promociones.
- Indicadores de área de reclamos: mide la cantidad de prima de la póliza versus la cantidad de reclamos, esta comparación es anual de acuerdo con la vigencia que tenga la póliza, este indicador evalúa el comportamiento de ciertas carteras de clientes para brindar

incentivos adicionales.

- Indicadores del área de grupos: mide la cantidad de prima que ingresa por todo el grupo versus la cantidad de reclamos de todo el grupo, este indicador evalúa el comportamiento del grupo con el fin de renovarlo o mejorar sus beneficios.
- Indicadores del área de retenciones: mide la cantidad de clientes que son retenidos o clientes con intención de cancelar su póliza.
- Indicadores del área de renovaciones: mide la cantidad de clientes que solicitan actualización de cobertura durante su periodo de renovación anual.
- Indicadores del área de pagos: mide los clientes, agencias o carteras que tienden a no cumplir con sus pagos a tiempo.
- Indicadores de cancelación: mide las zonas, agencias o carteras que tienden a cancelar su cobertura antes de su finalización.

Se especifica que los datos médicos son confidenciales, y como tal no se publican indicadores referentes a esta clase de datos, si algún investigador decide implementar el proyecto en la compañía de seguros solo puede ser utilizado por esa compañía.

La figura V representa el modelo de arquitectura basada en la metodología utilizada. En la *capa fuentes de datos* están los diferentes tipos de datos de las distintas áreas físicas que contiene la compañía, los detalles de estos datos fuentes fueron descritos en la sección “Datos generales en las compañías de seguros de salud”, estos datos brutos sirven para a la fase de transformación. En la *capa transformación* se realiza el proceso ETL (*Extraction, Transformation and Load*) que requiere mucho tiempo de procesamiento; la extracción de datos de sistemas de origen que pueden ser bases de datos, archivos y otros tipos o diferentes sistemas, utiliza Hadoop, MapReduce y Kafka; la transformación de datos contiene una serie de funciones y reglas a través de las cuales deben pasar los datos, como limpiar, conciliar, dividir, seleccionar, combinar, estandarizar, eliminar datos duplicados entre otros, para ello se utiliza Apache Streaming; la carga de datos es el paso al almacén de datos desde la capa anterior, para esto se utiliza herramienta HDFS. Además, se realiza el proceso de envío al almacén de datos en un formato unificado, se utiliza Apache Pig y Hive. En la *capa herramientas* se nombra el software que se utiliza en todo el entorno desde datos fuentes hasta presentar los indicadores. En la *capa visualización* se presentan los datos sumarizados en reportes, tablas o gráficos mediante herramienta Power BI, el personal responsable aplica analítica de datos.

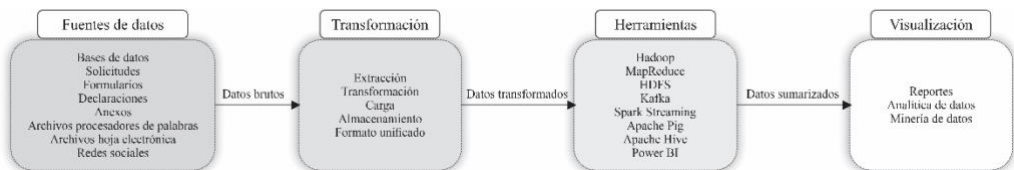


Figura V.- Modelo de arquitectura en empresa ecuatoriana de seguros de salud

4.3 Evaluar la metodología de estudio para establecer factores viables del modelo aplicable a una empresa ecuatoriana de seguros de salud mediante la contrastación de trabajos previos.

- Para evaluar los factores viables del modelo sobre una empresa ecuatoriana de seguros de salud, se considera los siguientes niveles: Bajo, Medio y Alto, además si es o no aplicable en una empresa, ver tabla II. El 65% son de Alto factor aplicable (34 factores), entre los factores destacan las investigaciones que ofrecen seguridad, presentan arquitecturas/modelos, buscan disminuir costos, minimizar fraudes/errores, y utilizan herramientas de libre acceso. El 8% son de Medio factor aplicable (4 factores), entre los factores destacan los accesos a datos confidenciales del paciente,

aunque la compañía de seguros es dueña de esta clase de datos, y son aplicables en la compañía. El 27% son de Bajo factor aplicable (14 factores), entre los factores se destaca la aplicación de algoritmos de Inteligencia Artificial porque no son objeto de estudio en esta investigación. El 73% de los factores son viables en la compañía de seguros de salud (38 factores) es decir, factores de Alta y Media aplicabilidad se consideran de utilidad en la empresa. El 27% de los factores son no viables (14 factores) es decir, factores de Baja aplicabilidad porque no se pueden utilizar en la empresa. Entre los 23 trabajos previos contrastados: 12 investigaciones son completamente aplicables, 8 investigaciones no son completamente aplicables, y 3 investigaciones no se pueden utilizar o aplicar.

5. Discusión. - Nuestra investigación se enfoca en Big Data para empresas de seguros de salud, por esta razón se categorizaron diferentes arquitecturas computacionales. Se diseñó un modelo de arquitectura de un sistema computacional, y establecieron factores viables del modelo aplicable a una empresa ecuatoriana, todo esto basado en investigaciones científicas y relevantes. Los tres resultados de esta investigación están enlazados por la literatura analizada y utilizada. Entre las investigaciones, se conoció que cuatro de ellas aplican algoritmos de Inteligencia Artificial para encontrar patrones o tendencias, los datos provienen de una Big Data en área de seguros de salud. El modelo de arquitectura es teórico. Una limitante es que la empresa no tenga computación distribuida y otros recursos para cargar el Big Data Warehouse. Otras limitantes son desconfianza en el sistema, habilidades en la operación del sistema, fragmentación de datos y concientización sobre el uso de datos en salud. Las herramientas nombradas en el modelo de arquitectura son de libre acceso o licencia libre. No es objeto de esta investigación conocer los tiempos, ni talento humano, ni especificaciones de equipos requeridos para la implementación de la arquitectura.

Para continuidad de esta investigación se propone un prototipo de Big Data, que tome como datos todas las fuentes de la empresa de seguros e implementada con las herramientas de software nombradas en el modelo de arquitectura.

Art	Factores	Aplicable	Empresa
[1]	Garantiza la seguridad y privacidad	Alto	Sí
	Adopta estándares	Alto	Sí
[3]	Aplica algoritmo de predicción	Bajo	No
	Presenta modelo de predicción	Bajo	No
[5]	Disminuye costos	Alto	Sí
	Conoce comportamiento de pacientes y proveedor de salud	Alto	Sí
	Presenta herramientas de software que utiliza	Alto	Sí
	Dirigido al sector público o privado	Alto	Sí
[7]	Revisa la medicación de los pacientes	Medio	Sí
	La compañía de seguros entrega el acceso a los datos	Medio	Sí
	Aplica un modelo de estados	Medio	Sí
[11]	Revisa los datos en los reclamos para reducir fraudes	Alto	Sí
	Utiliza un framework	Alto	Sí
[14]	Analiza los sentimientos expresados en una red social	Alto	Sí
	Usa herramientas libres	Alto	Sí
	Aplica algoritmo de Machine Learning	Bajo	No
[26]	Usa metodología para aplicar análisis en Big data	Alto	Sí
[30]	Analiza los gastos anuales de hospitales	Alto	Sí
	Utiliza un algoritmo de árbol de regresión	Bajo	No
[31]	Localiza los posibles fraudes en los reclamos	Alto	Sí
	Utiliza un algoritmo árbol de decisión	Bajo	No
[32]	Descubre fraudes, derroches o sobre precios	Alto	Sí
	Genera modelos predictivos e inteligencia de negocios	Alto	Sí

	Alerta al personal administrativo	Alto	Sí
[33]	Clasifica enfermedades	Alto	Sí
	Aplica algoritmo supervisado de inteligencia artificial	Bajo	No
[34]	Encuentra errores de datos o datos falsificados;	Alto	Sí
	Combina un algoritmo de árbol con un clasificador neuronal	Bajo	No
[35]	Evidencia patrones de enfermedades	Alto	Sí
	Aplica algoritmo no supervisado de inteligencia artificial	Bajo	No
[36]	Determina causas que inciden en la salud	Alto	Sí
	Aplica algoritmo de Machine Learning	Bajo	No
[37]	Análisis de salud	Alto	Sí
	Predice riesgos	Bajo	Sí
[38]	Conoce el gasto en salud	Alto	Sí
	Presenta un framework	Alto	Sí
[39]	Identifica fraudes	Alto	Sí
	Conoce interesados en el sistema de salud	Alto	Sí
[40]	Controla gastos financieros	Alto	Sí
	Presenta modelo basado en Big data	Alto	Sí
	Presenta herramientas de software para su uso	Alto	Sí
[41]	Previene errores	Alto	Sí
	Presenta estructura del modelo	Medio	No
	Aplica algoritmo de Machine Learning	Bajo	No
[42]	Reduce la tasa de contribución	Bajo	No
	Modelo matemático	Bajo	No
[43]	Seguimiento de salud	Alto	Sí
	Aplica analítica predictiva	Bajo	No
[44]	Preserva la confidencialidad	Alto	Sí
	Presenta arquitectura	Alto	Sí
[45]	Preserva la seguridad	Alto	Sí
	Presenta índices de gestión	Alto	Sí

Tabla II.- Factores viables

6. Conclusiones. - En este trabajo se obtienen las siguientes categorías, prevención de enfermedades, causas de reclamos, expresión de sentimientos, fraudes en reclamos, predicción de enfermedades y seguridad de datos, desde las arquitecturas computacionales para seguros de la salud mediante una revisión de literatura relevante. Se desarrolla un modelo de arquitectura de un sistema computacional que consiste en 4 capas: Capa Fuentes de Datos, Capa Transformación, Capa Herramientas y Capa Visualización, el diseño es para una empresa ecuatoriana de seguros de salud y está orientado a la consolidación de la información.

Se evalúa la metodología de estudio mediante la contrastación de trabajos previos, y se conoce que el 73% de los factores (Alto y Medio) son viables en una empresa ecuatoriana de seguros de salud, es decir, son de aplicabilidad para la empresa. El 27% de los factores (Bajo) son no viables, es decir no se pueden aplicar en la empresa. El aporte de este trabajo permite determinar aquellos factores viables que determinan la aplicabilidad del modelo a empresas de seguros de salud nacionales o extranjeras inclusive.

7. Referencias

- [1] I. Olaronke and O. Oluwaseun, “Big data in healthcare,” in *FTC*, Dec. 2016, no. December, pp. 1152–1157, doi: 10.1109/FTC.2016.7821747.
- [2] G. Melendrez-Cacedo and J. Llerena-Izquierdo, “Secure Data Model for the Healthcare Industry in Ecuador Using Blockchain Technology,” *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 252, pp. 479–489, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-4126-8_43.
- [3] A. Alim and D. Shukla, “A parameter estimation model of big data setup,” *IDEA*, 2020, doi: 10.1109/IDEA49133.2020.9170664.
- [4] A. de la Nube Toral Sarmiento *et al.*, “4to. Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad. Memoria académica,” 2018. .
- [5] S. Gupta and P. Tripathi, “An emerging trend of big data analytics with health insurance in India,” in *ICICCS*, Feb. 2016, no. Iciccs, pp. 64–69, doi: 10.1109/ICICCS.2016.7542360.
- [6] R. Ayala Carabajo and J. Llerena Izquierdo, “Tercer Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad.” 2017, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14450>.
- [7] K. Umemoto and K. Goda, “A Prescription Trend Analysis using Medical Insurance Claim Big Data,” in *ICDE*, Apr. 2019, vol. 2019-April, pp. 1928–1939, doi: 10.1109/ICDE.2019.00209.
- [8] R. Ayala Carabajo and J. Llerena Izquierdo, “Segundo Congreso Salesiano de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad.” 2016, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12776>.
- [9] J. Llerena-Izquierdo and M. Merino-Lazo, “Aplicación móvil de control nutricional para prevención de la anemia ferropénica en la mujer gestante,” *Rev. InGenio*, vol. 4, no. 1, pp. 17–26, 2021, doi: 10.18779/ingenio.v4i1.364.
- [10] W. M. Soto Eras, “Desarrollo del portal web de la fundación nuestra Señora del Cisne para la gestión de servicios en el Cantón Durán,” 2021. .
- [11] S. Kareem and R. Binti Ahmad, “Framework for the identification of fraudulent health insurance claims,” in *ICBDA*, Nov. 2017, vol. 2018-Janua, pp. 99–104, doi: 10.1109/ICBDAA.2017.8284114.
- [12] N. M. Morán Maldonado, “Estado de la Ciberseguridad en las Empresas del Sector Público del Ecuador: Una Revisión Sistemática,” 2021.
- [13] C. O. Sánchez Guzmán, “Modelo de red segura en un entorno distribuido para la transferencia de datos con mecanismos básicos de seguridad,” 2021. .
- [14] M. A. Laagu and A. Setyo Arifin, “Analysis the Issue of Increasing National Health Insurance Rates,” *ICoSTA*, 2020, doi: 10.1109/ICoSTA48221.2020.1570615599.
- [15] Y. J. Terán Terranova, “Seguridad en la Gestión de la información para las organizaciones públicas desde el enfoque ISO/IEC 2700: un Mapeo Sistemático,” 2021. .
- [16] D. Kim and K. P. Joshi, “A Semantically Rich Knowledge Graph,” in *IEEE*, May 2021, pp. 7–12, doi: 10.1109/BigDataSecurityHPSCIDS52275.2021.00013.
- [17] C. J. Guaigua Bucheli, “Algoritmos de seguridad para mitigar riesgos de datos en la nube: un mapeo sistemático,” 2021. .
- [18] J. G. Ponce Larreategui, “Indicadores de compromiso (IOC) para detección de amenazas en la seguridad informática con enfoque en el código malicioso,” 2021.
- [19] Superintendencia-de-Compañías-Valores-y-Seguros, “Compañías de Medicina Prepagada Ecuador,” *Listado*, 2021. https://appscvsmovil.supercias.gob.ec/portaldeinformacion/cias_medicina_prepagada.zul (accessed Sep. 27, 2021).
- [20] M. J. Aguirre Sánchez, “Tecnologías de Seguridad en Bases de Datos: Revisión Sistemática,” 2021. .
- [21] G. Ecuatoriano, “Servicio Publico para pagos de accidentes de transito,” 2021.

- <https://www.gob.ec/sppat/tramites/solicitud-pago-proteccion-gastos-medicos-victimas-accidentes-transito> (accessed Sep. 27, 2021).
- [22] M. J. Chévez Morán, “Estudio de los patrones de seguridad para la atenuación de las irregularidades, las debilidades y amenazas en empresas de servicios de telecomunicaciones,” 2021. .
- [23] O. A. Escalante Quimis, “Prototipo de sistema de seguridad de base de datos en organizaciones públicas para mitigar ataques cibernéticos en Latinoamérica,” 2021. .
- [24] I. N. Coello Ochoa, “Análisis de ciberataques en organizaciones públicas del Ecuador y sus impactos administrativos,” 2021. .
- [25] C. A. Orozco Bonilla, “Estrategias algorítmicas orientadas a la ciberseguridad: Un mapeo sistemático,” 2021.
- [26] R. Tardío and A. Mate, “An iterative methodology for big data management,” in *IEEE*, Oct. 2015, pp. 545–550, doi: 10.1109/BigData.2015.7363798.
- [27] P. S. Muñoz Campuzano, “Modelos de seguridad para prevenir riesgos de ataques Informáticos: Una revisión sistemática,” 2021.
- [28] N. A. Vera Navas, “Modelo de seguridad informática para riesgos de robo de información por el uso de las redes sociales,” 2021.
- [29] J. N. Miranda Jiménez, “Mapeo sistemático de metodologías de Seguridad de la Información para el control de la gestión de riesgos informáticos,” 2021.
- [30] Y. Xie *et al.*, “Predicting Days in Hospital Using Health Insurance Claims,” *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 19, no. 4, pp. 1224–1233, Jul. 2015, doi: 10.1109/JBHI.2015.2402692.
- [31] W. Yang and W. Hu, “Research on Algorithm for Health Insurance Data Fraud Detection,” in *IEEE*, May 2021, pp. 57–62, doi: 10.1109/BigDataSecurityHPSCIDS52275.2021.00021.
- [32] U. Srinivasan and B. Arunasalam, “Leveraging Big Data Analytics to Reduce Healthcare Costs,” *IT Prof.*, vol. 15, no. 6, pp. 21–28, Nov. 2013, doi: 10.1109/MITP.2013.55.
- [33] L. Jiang, “Quantitative Model of Insurance Risk Management System Based on Big Data,” in *ICSCSE*, Nov. 2016, pp. 590–593, doi: 10.1109/ICSCSE.2016.0159.
- [34] A. Sysoev and R. Scheglevatysh, “Combined Approach to Detect Anomalies in Health Care Datasets,” in *SUMMA*, Nov. 2019, pp. 359–363, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947605.
- [35] S. Zahi and B. Achchab, “Clustering of the population benefiting from health insurance,” in *ICSCA*, Oct. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1145/3368756.3369103.
- [36] Y. Katsis and N. Balac, “Big Data Techniques for Public Health,” in *IEEE/ACM*, Jul. 2017, pp. 222–231, doi: 10.1109/CHASE.2017.81.
- [37] S. Karim and E. Gide, “The Impact of Big Data on Health Care Services in Australia,” in *ICMSTTL*, 2019, pp. 34–38, doi: 10.1145/3348400.3348414.
- [38] Y.-K. Chen and Y.-H. Tao, “Analyzing the Healthcare Expenditure of National Health Insurance,” in *ICAMCM*, Dec. 2014, pp. 353–355, doi: 10.1145/2684103.2684178.
- [39] V. Chandola and S. R. Sukumar, “Knowledge discovery from massive healthcare claims data,” in *ACM*, Aug. 2013, vol. Part F1288, pp. 1312–1320, doi: 10.1145/2487575.2488205.
- [40] Y. Liu and J. Peng, “Big Data Platform Architecture,” *BDET*, pp. 31–35, 2018, doi: 10.1145/3297730.3297743.
- [41] M. Kumar and R. Ghani, “Data mining to predict and prevent errors in health insurance claims processing,” in *ACM*, 2010, p. 65, doi: 10.1145/1835804.1835816.
- [42] Y. Chen, K. She, and S. Zhao, “Social Insurance Contribution Rate Reduction and Firm Activity Evidence,” in *ICSEIM*, Jan. 2021, no. 24, pp. 113–117, doi: 10.1145/3451471.3451490.
- [43] X. Deng and D. Wu, “Senior health management through internet of things and real-time big data analytics,” in *ACM*, Sep. 2015, pp. 674–674, doi: 10.1145/2808719.2816981.
- [44] A. Sara and T. Yassine, “Secure confidential big data sharing in cloud computing,” in *iCBDCA*, Mar. 2017, vol. Part F1294, pp. 1–4, doi: 10.1145/3090354.3090388.

[45] L. Kantner and S. D. Goold, “Web tool for health insurance design by small groups,” in *CHI*, Apr. 2006, pp. 141–146, doi: 10.1145/1125451.1125484.

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

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

JLI 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.

Fingerprint Verification System Based on DWT, Multiple Domain Feature Extraction, and Ensemble Subspace Classifier

Sistema de verificación de huellas dactilares basado en DWT, extracción de características de múltiples dominios y clasificador subespacial de conjuntos

Sistema de verificação de impressão digital baseado em DWT, extração de recursos de vários domínios e classificador de subespaço de conjunto

Andres Rojas ¹, Gordana Jovanovic Dolecek ²

Recibido: Marzo 2022

Aceptado: Julio 2022

Summary. - This paper describes a fingerprint verification system including preprocessing, Wavelet transform, feature extraction using multiple domains, and ensemble subspace discriminant classifier. The system is implemented in MATLAB using Wavelet Toolbox, Image Processing Toolbox, and Statistics and Machine Learning Toolbox. First, the motivation and novelty, followed by the review of the previous work, are presented. Next, all steps are described in detail. Three fingerprint databases from the literature are used. The proposed method's performance is compared with state-of-the-art techniques based on different classifiers utilizing the accuracy metric. The proposed algorithm achieves high accuracy at 97.5% for the DB3-FVC2000 subset.

Keywords: fingerprint verification, image processing, classification learner, feature extraction, accuracy, ensemble subspace classifier.

Resumen. - Este documento describe un sistema de verificación de huellas dactilares que incluye preprocesamiento, transformada Wavelet, extracción de características utilizando múltiples dominios y clasificador discriminante subespacial de conjunto. El sistema se implementa en MATLAB utilizando Wavelet Toolbox, Image Processing Toolbox y Statistics and Machine Learning Toolbox. En primer lugar, se presenta la motivación y la novedad, seguido de la revisión del trabajo anterior. A continuación, se describen todos los pasos en detalle. Se utilizan tres bases de datos de huellas dactilares de la literatura. El rendimiento del método propuesto se compara con técnicas de última generación basadas en diferentes clasificadores que utilizan la métrica de precisión. El algoritmo propuesto logra una alta precisión del 97,5 % para el subconjunto DB3-FVC2000.

Palabras clave: verificación de huellas dactilares, procesamiento de imágenes, aprendizaje de clasificación, extracción de características, precisión, clasificador subespacial de conjunto.

¹ Bachelor of Science, Department of Electronics, National Institute of Astrophysics, Optics, and Electronics (INAOE), andres.rojas@inaoep.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1773-8514>

² Engineering Professor, Department of Electronics, National Institute of Astrophysics, Optics, and Electronics (INAOE), gordana@ieec.org, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1258-5176>

Resumo. - Este documento descreve um sistema de verificação de impressão digital que inclui pré-processamento, transformada Wavelet, extração de recursos usando vários domínios e classificador discriminante de subespaço de conjunto. O sistema é implementado em MATLAB usando Wavelet Toolbox, Image Processing Toolbox e Statistics and Machine Learning Toolbox. A motivação e a novidade são apresentadas primeiro, seguidas pela revisão do trabalho anterior. Todas as etapas são descritas em detalhes a seguir. Três bancos de dados de impressões digitais da literatura são usados. O desempenho do método proposto é comparado com técnicas do estado da arte baseadas em diferentes classificadores que utilizam a métrica de precisão. O algoritmo proposto atinge uma alta precisão de 97,5% para o subconjunto DB3-FVC2000.

Palavras-chave: verificação de impressão digital, processamento de imagem, aprendizado de classificação, extração de recursos, precisão, classificador de subespaço de conjunto.

1. Introduction. - The fingerprint is one biometrics that fulfills two essential attributes for unambiguous recognition: uniqueness and stability over time. Fingerprints remain relatively unchanged for life, and even the fingerprints of identical twins are different [1]. The other two biometrics that fulfill these requirements are the face and iris [2]. Fingerprints are famous for many reasons, they are accessible, do not provide more information than necessary, such as an individual's race or health, and fingerprint sensors have a relatively low price [3].

There are many reasons to use biometrics, including improving the convenience and efficiency of routine access transactions, reducing fraud, and improving public safety and national security [4]. Nowadays, multiple devices have finger-imaging sensors that better protect them from intruders, another security measure in addition to the specific password, or even face recognition.

Commonly, low-cost sensors' fingerprints are low resolution; moreover, the scanner and acquisition software is not flexible to be customized. As a result, developers deal with low-resolution fingerprints in their applications. Since most early research relies on features such as ridges, delta, and core (minutiae) points, the location of these points needs to be determined. Although this process can be relatively simple for a human, it requires complicated computation to be extracted by a computer. This problem is even more complex for low-resolution fingerprint images since some ridges can be broken in the image and wrongly considered as the core [5].

Nowadays, researchers explore non-minutiae representations by considering fingerprint images as oriented textures that combine the global and local information in a fingerprint [1]. In this work, the focus is on non-minutiae techniques, which implies that there is no need to analyze every local feature in the fingerprint, but rather texture-based features are calculated. A complete image of a fingerprint cannot be used or processed every time because the memory required to perform that task can be enormous. This problem slows down the processing speed of the system for recognition. For this reason, only prominent features are extracted from each image, and a feature set is created [1]. Our hypothesis for this research states that implementing more texture descriptors leads to more accurate fingerprint verification results.

One of the most popular non-minutiae approaches is the Wavelet transform. This technique produces spatial, and frequency representations used to create features that describe the textural characteristics of a fingerprint. A fingerprint image has distinct features with some frequency and direction. The corresponding subimages have larger energies using the Wavelet transform. By applying the Wavelet transform, vital information of the original image is transformed into a compressed image without much loss of information. The Wavelet transform has been widely used in signal processing, pattern recognition, and texture recognition [6].

This compressed information can be obtained from the same subject with similar results creating a set that can be used for pattern classification. A supervised machine learning algorithm is helpful for fingerprint verification since it generates a model that learns from image data in the form of feature vectors. In the training stage, a model is generated from the input feature vectors and their expected output values (labels) to map any new data to one of the trained categories. The training data consist of a set of training examples, each group having a pair consisting of an input object and the desired output value. A supervised learning algorithm learns from this training pair relationship and produces an inferred function [7].

In ensemble classification, multiple homogeneous or heterogeneous classifiers are combined to solve a similar classification problem. This approach enhances the generalization of models and improves the classification results even using weak classifiers [8].

This paper presents an extended version of the fingerprint verification system based on the Wavelet transform and ensemble subspace discriminant classifier [9]. It contains a detailed description of the image processing techniques applied to the preprocessing algorithm and more information regarding the features computed to classify the fingerprint images. This extended version includes more classification results obtained from the 12 fingerprint image subsets analyzed in this work.

This paper is organized as follows: Section 2 elaborates on motivation and novelty, while the next

section presents a review of previous works on fingerprint recognition. A detailed description of the proposed method is presented in Section 4. Section 5 reports the main results and discussion, and Section 6 states the conclusions.

2. Motivation and novelty. - Fingerprints are images obtained when the fingertip surface touches another surface, and even on the same hand, each fingertip surface describes a different pattern. Each person has unique designs on each fingertip surface. The probability of coinciding with other fingerprints is almost zero [10]. Human fingerprints are mainly different, and the overall shape does not change over time which is beneficial for machine learning applications because a good classifier should be stable over time. Its inputs should be consistent inside their pattern realm. Below we present the principal motivations for the study of fingerprints:

- Fingerprint image databases highly depend on the finger's surface status including external variables such as humidity, dust, temperature, etc. These parameters affect the accuracy of the recognition system and make the identification process more difficult, especially with low-quality fingerprint datasets [10].
- A fingerprint recognition system requires a minimum Equal Error Rate (EER), possibly zero, to provide high accuracy values, which is one of the most critical parameters of a fingerprint recognition system [1].
- A complete fingerprint image cannot be used or processed every time as the memory required might be significant, which reduces the processing speed. Also, pixel-by-pixel comparison with the query image may consume most of the time of the processor and a shift by a one-pixel value may lead to a complete mismatch and pseudo results. Hence, only prominent features must be extracted from each image, and a feature database is formed [1].
- Ensemble classifiers have increasingly gained more attention in different pattern recognition applications. This classification method combines the results of classifiers with varying accuracy scores with different techniques (voting, average, etc.). Thus, it is possible to obtain better predictive results from a single classifier [11].
- Wavelets are used to decompose the fingerprint image into different levels of resolution to ease information interpretation. Wavelet coefficients are independent, creating a set of features of the actual fingerprint image at different resolutions, which is useful for classification purposes [6].

The above analysis shows the principal task in fingerprint processing. Our main objective and motivation for this research are to get high accuracy in verification; using ensemble classifiers may be very useful in this task. A comparison was performed with previous simple models to choose the correct classifier. The results show that the ensemble subspace provides the highest accuracy compared to other machine learning algorithms. Consequently, our approach is based on the ensemble subspace discriminant approach.

The implementation of ensemble subspace discriminant classifiers is reported in [12] related to liver fibrosis in mice microscopic images. This work computed morphological and statistical features such as the area, perimeter, circularity, mean, median, and mode from microscopic images. Another ensemble approach for classifying satellite images is reported in [13]. More recently, the project in [14] for biometric human footprint matching applied ensemble subspace discriminant classifiers combined with fuzzy logic. Finally, the work presented at URUCON 2021 reported in [9] is one of the newest fingerprint recognition systems based on an ensemble of Linear Discriminant Analysis (LDA) classifiers using the random subspace method. This system utilizes

preprocessing to enhance the fingerprint images in conjunction with multiple domain feature extraction techniques.

The novelty of this work is the application of multiple transforms for feature extraction of fingerprint images [9] to implement a fingerprint verification system simulated in MATLAB. This paper highlights essential details such as the preprocessing algorithm steps, multiple image processing techniques, and more insight into the feature extraction, especially texture descriptors.

3. Review of previous works. - The literature on fingerprint identification systems presents similar subsystems: input data processing, feature extraction, and classification [10]. The main differences between the existing systems generally consist of the feature extraction technique and the classification approach [10]. Since the method proposed here is based on the Wavelet transform, we will review some Wavelet transform-based strategies enhanced with different machine learning classifiers.

The authors in [15] proposed two methods to detect fingerprint images based on one-dimensional (1-D) and two-dimensional (2-D) Discrete Wavelet Transform (DWT). Three statistical parameters are used to evaluate those two methods: skewness, kurtosis, and convolution of the approximation coefficients of 1-D DWTs. The cross-correlation coefficient was used to classify the fingerprints of different persons.

Reference [16] presented Wavelet features extracted directly from gray-scale fingerprint images without preprocessing. This system was tested on a small fingerprint database using the k-NN classifier.

Wavelet co-occurrence features are reported in [17], these values are extracted from the approximation coefficients of fingerprint images and classified using a feedforward neural network. The four recognition Wavelet co-occurrence features are contrast, correlation, energy, and homogeneity.

The authors in [18] presented an approach based on combining multiple domains: spatial, Fourier, Discrete Cosine Transform (DCT), and Wavelet. This system was designed for matching poor-quality fingerprints using the Manhattan distance measure for classification. A Wavelet-Bands Selection Features (WBSF) technique is proposed in [19]. In this case, the Euclidean and City-Block distance measures performed the pattern matching process. The method reported in [6] uses robust local features extracted from Haar Wavelet subheads. The classification approach in this paper was based on the absolute difference between the feature vectors. Another Euclidean distance approach is reported in [20], where the feature extraction is based on blocks of an enhanced region of interest (ROI). The feature vectors consist of mean energy, standard deviation, and Shannon entropy. The authors in [5] applied a simple method to verify low-resolution fingerprints using Haar-like transformations to generate feature vectors. These vectors were verified against their reference counterparts using the Hamming distance.

It is common for many authors to apply a combination or a comparison of machine learning algorithms; for example, the authors in [21] proposed SVM and k-NN as classification methods. This work utilized three discrete feature extraction methods: DWT, Principal Component Analysis (PCA), and DCT. The fingerprint identification system in [22] was based on Gabor Wavelet and SVM, indicating that Gabor Wavelet features represent textural information at different scales and orientations, accomplishing high recognition rates using a well-tuned SVM. The authors in [7] implemented fingerprint classification using SVM and logistic regression classifiers. Ridge fingerprint contours were extracted using a canny edge detection filter, creating feature vectors. The fingerprint images were enhanced using Gabor filters and the Wavelet transform. A similar approach in [10] proposed developing a fingerprint identification system based on image processing methods that clarify fingerprint contours. The matching process applied one and two-layer perceptron neural networks, random forest, and SVM.

4. Description of the method. - In this work, the FVC2000 [23], FVC2002 [24], and FVC2004 [25] fingerprint databases were used. A database is composed of four subsets, and each subset has 80 fingerprint images acquired from 10 subjects with eight imprints. A total of 960 fingerprint images were applied for fingerprint recognition. Each subset presents distinct characteristics, including resolution, size, and quality. The steps of the proposed method are presented below.

Step 1: Preprocessing

A gray-level fingerprint image I is defined as a $M \times N$ matrix, where $I(i, j)$ represents the intensity of the current pixel located in the i th row and j th column. An orientation image O is defined as a $M \times N$ image, where $O(i, j)$ represents the local ridge orientation at pixel (i, j) . The local ridge orientation is generally specified for a block of pixels rather than one. Former implies that the fingerprint image is divided into $w \times w$ non-overlapping blocks, and a single local ridge orientation is defined for each block. When analyzing a fingerprint, we can notice that the local ridge orientations of 90° and 270° are the same since the ridges oriented at these angles in a local neighborhood cannot be differentiated. A frequency image F is a $M \times N$ image, where $F(i, j)$ represents the local ridge frequency defined as the frequency of the ridge-valley structure in a local neighborhood along the normal direction to the local ridge orientation. This image is specified in blocks as the orientation image. A region mask R is a $M \times N$ image, where $R(i, j)$ indicates the category of a pixel [26]. There are two possible categories:

- Recoverable pixel: Where a small amount of noise corrupts ridges and valleys, this could be in the form of scars, creases, smudges, etc. However, neighboring regions or pixels can provide information about the actual ridge-valley structures. These pixels are labeled with a value of 1.
- Unrecoverable pixel: Where ridges and valleys are corrupted with a significant amount of noise and distortion, making the structures not visible. The neighboring regions cannot provide information to recover the authentic ridge-valley shapes. These pixels are labeled with a value of 0.

Preprocessing of the input fingerprint images is needed before applying the Wavelet transform. This process involves image processing techniques such as normalization of intensities in the image, local orientation and frequency estimation, region mask estimation, Gabor filtering, and binarization to enhance the image [26, 27].

Normalization: This is a pixel-wise operation, and its objective is to clarify ridge-valley structures by reducing variations in gray-level values throughout the image. Let $I(i, j)$ denote the gray-level value of the pixel (i, j) , M , and VAR the mean and variance of I , respectively. $N(i, j)$ denote the normalized gray-value in the pixel (i, j) defined as:

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}}, & \text{if } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

where M_0 and VAR_0 are the desired mean and variance, respectively [26].

Local orientation estimation: An orientation image provides information about a fingerprint in oriented texture, an intrinsic property defined by invariant coordinates of ridges and valleys in a local neighborhood [26].

Local frequency estimation: The gray level intensities along ridges and valleys create a local neighborhood where no minutiae or singular points appear. This can be modeled as a sine-shaped

wave along the normal direction to the local ridge orientation. Former indicates that the local ridge frequency is another intrinsic property of a fingerprint image [26].

Region mask estimation: A fingerprint image has pixels or blocks that could be in a recoverable or unrecoverable region. This classification process can be done by evaluating the wave shape created by local ridges and valleys in terms of their amplitude, frequency, and variance [26].

Gabor filtering: An interesting characteristic of fingerprints is their inherent configuration of parallel ridges and valleys, which have a well-defined frequency and orientation providing useful information that helps eliminate unwanted noise. These characteristics help to eliminate undesired noise while preserving true ridges and valleys. Since the sinusoidal-shape waves from ridge-valley structures vary slowly in a local orientation, a well-tuned bandpass filter at a specific frequency and orientation can remove noise while preserving accurate ridge-valley structures. Gabor filters are suitable for bandpass filters because they have frequency-selective and orientation-selective properties, giving them optimal joint resolution in the spatial and frequency domains [28]. The even-symmetric Gabor filter has the general form:

$$h(x, y; \phi, f) = e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x \cos \phi)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y \sin \phi)^2}{\sigma_y^2} \right]} \cos(2\pi f x \cos \phi), \quad (2)$$

where ϕ is the orientation of the Gabor filter, f is the frequency of the sinusoidal plane wave, and σ_x and σ_y are the space constants of the Gaussian envelope along the x and y axes, respectively. The application of Gabor filters to an image requires the following three parameters:

- The frequency of the sinusoidal plane wave
- The filter orientation
- The standard deviations of the Gaussian envelope

The first parameter corresponds to the local ridge frequency, and the second is the local ridge orientation. The third parameter involves a trade-off of values; the higher these values, the more resistant to noise the filters are, but this is more likely to create spurious ridges and valleys. In contrast, the smaller the values, the filters will not create spurious ridge-valley structures but will be less effective at removing noise. In this work, both values were implemented as 0.5. Using the estimated images, N as the normalized fingerprint, O as the orientation image, F as the frequency image, and R as the region mask, the enhanced image E is calculated as:

$$E(i, j) = \begin{cases} 255, & \text{if } R(i, j) = 0 \\ \sum_{u=-\frac{w_g}{2}}^{\frac{w_g}{2}} \sum_{v=-\frac{w_g}{2}}^{\frac{w_g}{2}} h(u, v; O(i, j), F(i, j)) N(i - u, j - v), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

where $w_g = 11$ is the size of the Gabor filters [26].

Binarization: The last step is implemented using a threshold in the enhanced image E using the following criteria:

$$B(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } E(i, j) \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

where $B(i, j)$ is the binarized version of the fingerprint, concluding the preprocessing of the input images.

The following diagram presents the main steps in the enhancement algorithm used in this work:

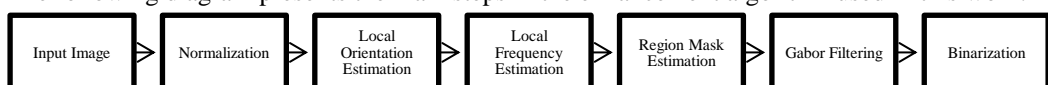


Figure 1. Flow diagram of the enhancement algorithm implemented.

An example of the enhancement algorithm is presented in Fig. 2 using a fingerprint from the FVC2000 database [23]. The initial image from the subset is illustrated in Fig.2.a. This image provides information regarding the ridge orientations shown in Fig.2.b. The red strokes indicate the angle (orientation) of the ridges. The next step involves the calculation of the ridge frequency used as an input for the Gabor filter presented in Fig.2.c. Lastly, binarization is performed to enhance the ridges and valleys from the initial fingerprint. The processed image will be composed with 0's on the ridges, and 1's on the valleys, as presented in Fig.2.d.

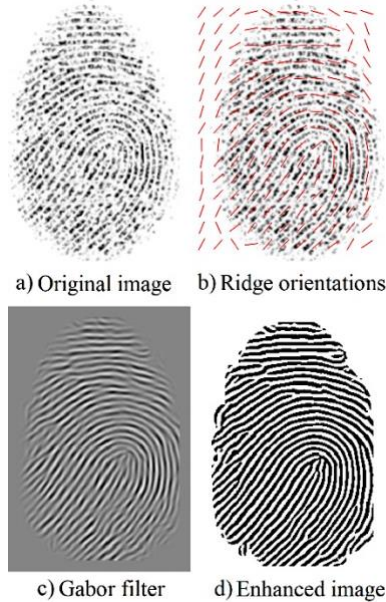


Figure 2. Preprocessing example of the input fingerprint images.

Step 2: Wavelet transform

A popular technique in image processing is the Wavelet transform. This approach was applied to extract information from the fingerprint images. More information about the Wavelet transform procedure is available in [9].

Step 3: Feature extraction using multiple domains

This stage describes multiple transforms calculated from each preprocessed fingerprint.

Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM): GLCM is a square matrix that provides specific properties about the spatial distribution of gray levels in the image's texture [29]. This matrix shows how often a reference pixel value with intensity i occurs in a specific relationship with another neighboring pixel with intensity j . In other words, each element (i, j) of the GLCM is the number of occurrences of the pixel pair at a distance d relative to each other [29]. This spatial relationship can be defined in multiple forms with different offsets and angles. For an image I of size $M \times N$, the elements of the corresponding GLCM for a displacement vector $d = (d_x, d_y)$ are defined as:

$$GLCM = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \begin{cases} 1, & \text{if } I(x, y) = i \text{ and } I(x + d_x, y + d_y) = j, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

In this work we consider one neighboring pixel $d = 1$ along with four possible directions $[0 \ 1]$ for 0° , $[-1 \ 1]$ for 45° , $[-1 \ 0]$ for 90° , and $[-1 \ -1]$ for 135° [17]. Each element of the GLCM is the number of times that two pixels with gray values i and j are neighbors in distance d and direction θ [29].

A regular histogram does not include the information about the relative position of the pixels; that is why for texture measurements, the GLCM is mainly used since it incorporates in the texture analysis not only the distribution of intensities but also the relative position of pixels in an image [30]. The number of possible intensity levels in the original image determines the size of the GLCM. We work with 8-bit images meaning there are 256 possible levels [30].

The GLCM is computed on the approximation image because the Wavelet transform decomposed the original image into these lower frequency coefficients ignoring the noise signals related to the higher frequencies, which are present in the detail coefficients [17]. Since this approximation has a lower resolution, it provides a compressed representation of the fingerprint image, allowing to ignore several extra details that are not relevant to the texture information for this specific application. The GLCM becomes a Wavelet co-occurrence matrix in the Wavelet domain. This matrix offers a second-order statistical texture representation of the input fingerprint image [17]. So far, we have only calculated the GLCM, but we need to compute the texture descriptors that will be a part of the feature set used for fingerprint recognition. To accomplish this objective, we applied the *graycoprops* function to generate four descriptors including contrast, correlation, energy, and homogeneity; whose equations are presented below:

$$Contrast = \sum_{i,j} |i - j|^2 GLCM_{i,j}, \quad (6)$$

$$Correlation = \sum_{i,j} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)GLCM_{i,j}}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (7)$$

$$Energy = \sum_{i,j} GLCM_{i,j}^2, \quad (8)$$

$$Homogeneity = \sum_{i,j} \frac{GLCM_{i,j}}{1 + |i - j|}, \quad (9)$$

where the first-order statistics μ and σ are the mean and variance, respectively [17]. Since we use four different orientations, the total number of features per fingerprint is 16 as texture descriptors. For each orientation, the GLCM is calculated by applying its respective offset. That means that equations (6) – (9) must be used four times because the GLCM variable will have four different values, one for each offset.

Spatial domain, Fast Fourier Transform (FFT), and Discrete Cosine Transform (DCT): FFT and DCT coefficients were calculated using the normalized fingerprint image. Four features were computed from these coefficients, including the mean of standard deviations, the standard deviation of the means, the mean of the absolute deviations, and the standard deviation of the absolute deviations [18]. Similar features were also calculated from the spatial domain version, i.e., the normalized fingerprint image. Another feature was the pixel density from the binarized version of the fingerprint image.

Statistic measures from the Wavelet transform: A subsequent 2-D DWT was applied to the binarized fingerprints. In this step, we used the Wavelet base “db12”. Various statistic measures were calculated from each one of the detail coefficient images [21].

Wavelet-Bands Selection Features (WBSF): WBSF separates the horizontal and vertical coefficient details into sub-bands giving information in both directions. Based on the same 2-D DWT processed in the previous step, the mean and standard deviations of the sub-bands provide the set of 36 features from this step [19].

The total amount of features computed for each fingerprint image is 170. All the features are collected into a table and labeled with a categorical variable representing the fingerprint owner.

Step 4: Ensemble Subspace Discriminant Classifier

One of the benefits of ensemble classifiers is their capacity to merge results from various “weak” learners into a high-quality ensemble model. Linear Discriminant Analysis (LDA) classifiers were chosen as the individual learners used in this step. LDA is a fundamental data analysis method that establishes the lower dimension subspace in which the data points from the original problem are separable. This separability is specified in terms of mean and variance values [31]. The subspace discriminant algorithm has medium prediction speed and low memory usage. The main advantage of utilizing a subspace ensemble is less memory than ensembles with all predictors [32]. In [33] is presented a description of the steps executed by the random subspace algorithm.

5. Results and discussion. - The method proposed in this paper was implemented in MATLAB R2019b. The implementation included the application of several toolboxes, including the Wavelet toolbox, Image Processing toolbox, and Statistics and Machine Learning toolbox. More details regarding the specific functions used for signal processing are included in [9]. The Classification Learner application is an intuitive interface for training machine learning models. The feature table produced for each subset has a size of 80x171, 80 imprints of fingerprints (10 subjects with eight fingerprints per subject), and 171 features (including the categorical variable). The learners applied to create the ensemble are LDA classifiers. 10-fold cross-validation was employed to generalize the data and prevent overfitting. Table I summarizes the highest accuracy values obtained for the twelve subsets analyzed in this work.

Database	Accuracy
DB1-FVC2000	95 %
DB2-FVC2000	95 %
DB3-FVC2000	97.5 %
DB4-FVC2000	95 %
DB1-FVC2002	85 %
DB2-FVC2002	76.3 %
DB3-FVC2002	85 %
DB4-FVC2002	83.8 %
DB1-FVC2004	78.8 %
DB2-FVC2004	65 %
DB3-FVC2004	95 %
DB4_FVC2004	80 %

Table I. Results of the classification process for every database.

The preprocessing enhancement algorithm has shown high and acceptable performance for several subsets in the three databases included in this work. The following figure compares boxplots for the validation accuracies for all subsets used in this system.

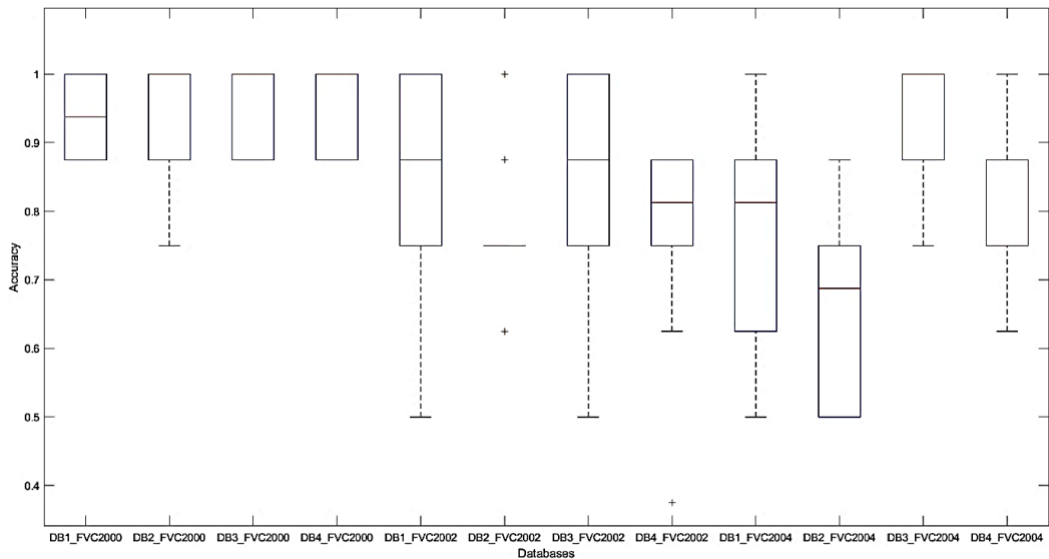


Figure 3. Boxplots of the accuracy values computed for each database.

The boxplots for the FVC2000 database (the first four boxplots) have a higher distribution for the quartiles, as can be noticed in Fig. 3. This behavior is consistent with the average accuracy values reported among the highest for all 12 subsets. On the contrary, the remaining eight subsets have wider quartiles, but almost for every classifier, the fingerprint verification system achieves a 100% accuracy for at least one-fold in the cross-validation implemented.

Another algorithm performance comparison is presented in the Receiver Operating Characteristic (ROC) curves. The positive class must be the same so a fair comparison can be made between all databases; in this case, Subject-Eight was chosen. Fig. 4 presents the results for the FVC2000 database.

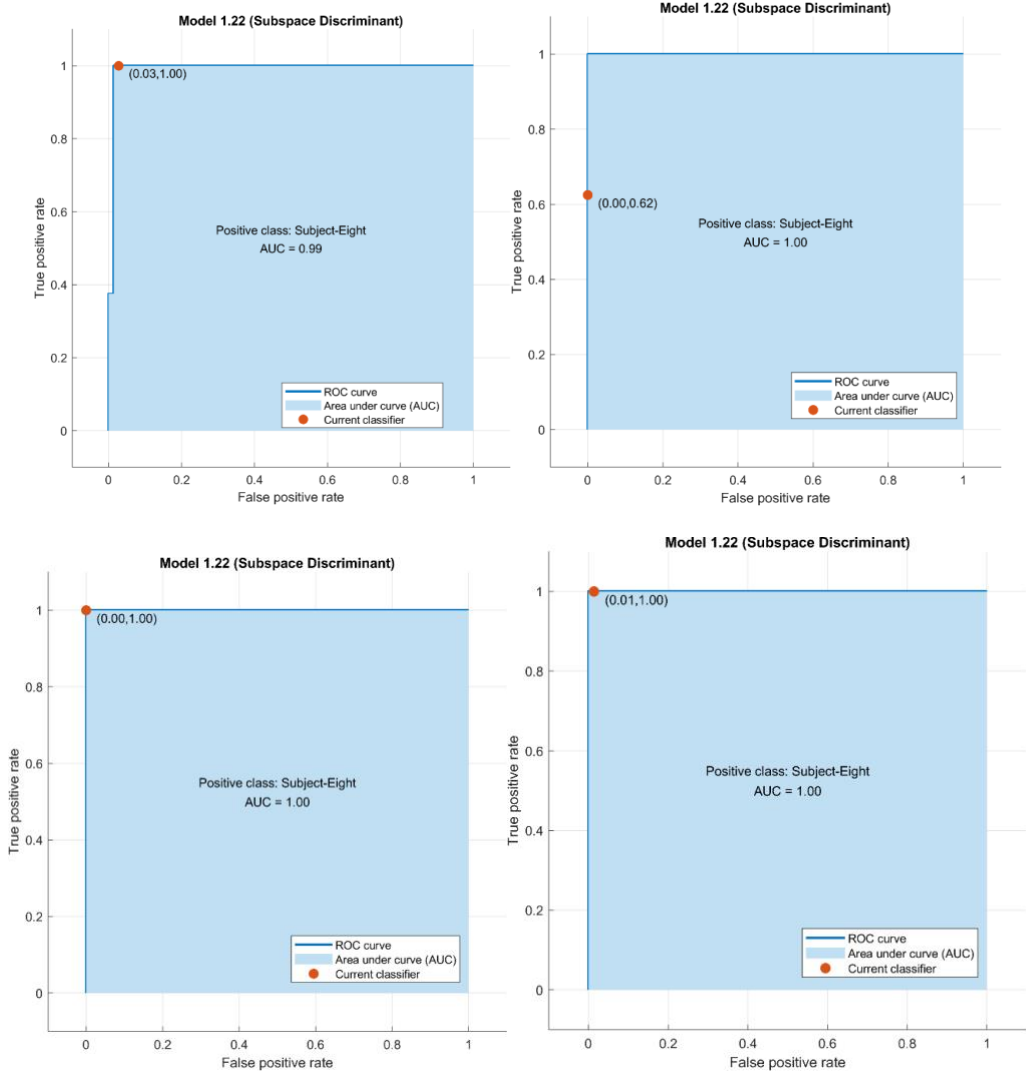


Figure 4. ROC curves for the FVC2000 database (Top left: DB1, top right: DB2, bottom left: DB3, bottom right: DB4).

A good classifier should have a ROC curve as close as possible to the top left, which in this case is true for the four subsets. As a result, we can prove again that high performance from the FVC2000 database can be inferred from the ROC curves presented. For the FVC2002 database, the next ROC curves were obtained.

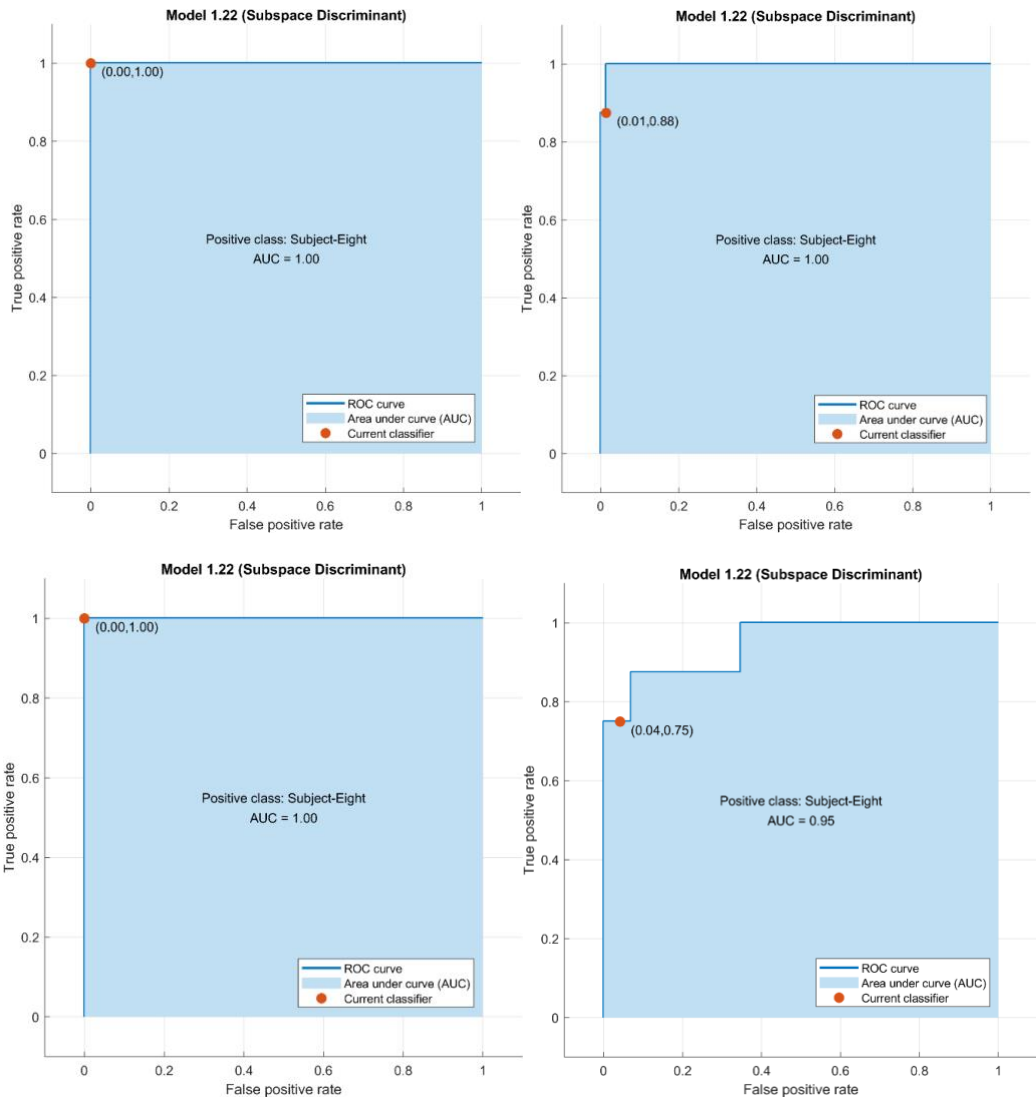


Figure 5. ROC curves for the FVC2002 database (Top left: DB1, top right: DB2, bottom left: DB3, bottom right: DB4).

For the FVC2002 database, it can be implied that for the DB4 subset, the algorithm performance is inferior, which is analogous to the lower accuracy value obtained for this subset at 83.8%. Finally, for the FVC2004, we have the following ROC curves.

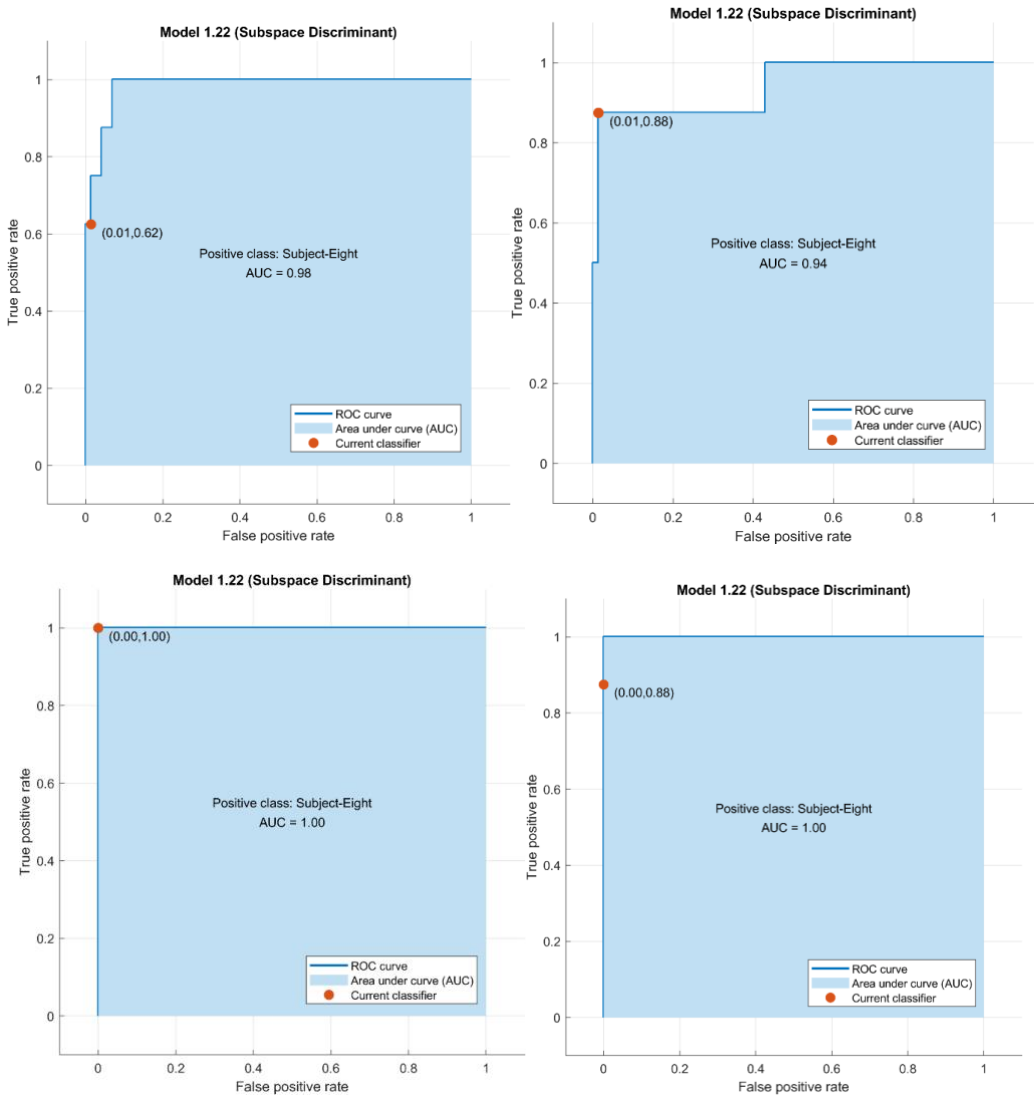


Figure 6. ROC curves for the FVC2004 database (Top left: DB1, top right: DB2, bottom left: DB3, bottom right: DB4).

This database provides the lowest accuracy values for the classification, which can be noticed from the ROC curves presented in Fig. 6. Note that these ROC curves were computed using only one positive class; if we choose a different class, we will obtain different results. The ROC curves will represent the behavior performance that was already reported using accuracy in Table I. To compare the performance of the classifiers from literature with the proposed method, we utilized the “accuracy” metric. This comparison is presented in Table II.

Work	Feature Extraction	Number of Features	Classification Model	Training Time	Database	Accuracy
Suwarno, et al. [5]	Haar-like transformation	100	Hamming distance	n/a	Custom set	80 %
Abdul-Haleem, et al. [6]	Energy, local ridge features, statistic measures, invariant moments	119	Absolute difference	n/a	DB3 (FVC2004)	96.87 %
Velapure, et al. [7]	Ridge contours, Gabor filter	≈ 16384	SVM	Not reported	Fingerprint Color Image.v1	87.5 %
Nguyen, et al. [10]	Statistic measures	256	Random forest	10 h 50 min	FVC group	95.8 %
Iloanusi, et al. [18]	Spatial, FFT, DCT, statistic measures	17	Manhattan distance	n/a	DB4 (FVC2000)	96.89 %
Tang, et al. [20]	Statistic measures, Shannon entropy	1152	Normalize Euclidean distance	n/a	FVC2000	96.84 %
Akbar, et al. [21]	DWT, PCA, DCT	40	SVM	Not reported	CASIA Version_5.0 (Dataset1)	95 %
Jirandeh, et al. [22]	Gabor Wavelet	160	SVM	≈ 170 s	PolyU HRF	95.5 %
This work	Spatial, FFT, DCT, GLCM, WBSF, statistic measures	170	Ensemble Subspace Discriminant	13.202 s	DB3 (FVC2000)	97.5 %

Table II. Comparison of results

The values in the table correspond to the highest accuracies achieved in each work. Our system obtained an accuracy of 97.5 % for the set “B” from the FVC2000 database subset DB3. A thorough description of Table II can be found in [9].

In this extended version, we have included a new column indicating each author’s database. Suwarno, et al. [5] used fingerprints captured by a commercial scanner, creating their own custom set, while Abdul-Haleem, et al. [6] used the DB3 subset from the FVC2004 database. Velapure, et al. [7] applied the Fingerprint Color Image Database.v1, from MATLAB Central File Exchange. Nguyen, et al. [10] used the FVC group database, but subsets were not specified. Iloanusi, et al. [18] applied the DB4 subset from the FVC2000 database, Tang, et al. [20] used the FVC2000 database. Akbar, et al. [21] utilized the CASIA Fingerprint Image Database Version_5.0 (Dataset1) and Jirandeh, et al. [22] used the PolyU HRF database. It is worth noting that although not all databases are the same, the comparison provides a good insight into the general performance of the proposed system in fingerprint verification research.

6. Conclusions. - This paper presents a fingerprint verification system based on DWT, multiple domain feature extraction, and Ensemble Subspace Classifier. The preprocessing algorithm used to enhance the original fingerprint images from the three datasets applies image processing techniques such as normalization, local orientation estimation, local frequency estimation, region estimation, and binarization. This work also explains why this approach is helpful for fingerprint image processing. This paper evaluated 12 fingerprint image subsets from which the highest accuracy (97.5 %, obtained for the DB3-FVC2000 subset) is compared with related works proposed in the literature.

7. References

- [1] S. Bharkad and M. Kokare, "Fingerprint identification — ideas, influences, and trends of new age," in *Pattern Recognition, Machine Intelligence and Biometrics*, Berlin, Springer, 2011, pp. 411-446.
- [2] P. Schuch, "Deep learning for fingerprint recognition systems," NTNU, 2019.
- [3] A. M. Bazen, *Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search*, Twente University Press, 2002.
- [4] National Research Council of the National Academies, "Biometric recognition: Challenges and opportunities," National Academies Press, Washington, 2010.
- [5] S. Suwarno and P. I. Santosa, "Simple verification of low-resolution fingerprint using non-minutiae feature," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
- [6] M. G. Abdul-Haleem, L. E. George and H. M. Al-Bayti, "Fingerprint recognition using haar wavelet transform and local ridge attributes only," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 122-130, 2014.
- [7] A. Velapure and R. Talware, "Performance analysis of fingerprint recognition using machine learning algorithms," in *Proc. of the Third International Conference on Computational Intelligence and Informatics*, 2020.
- [8] M. Leghari, S. Memon, F. Sahito, A. A. Chandio and M. Leghari, "Biometric verification enhancement with ensemble learning classifiers," in *2018 5th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC)*, 2018.
- [9] A. Rojas and D. G. Jovanovic, "Fingerprint recognition based on wavelet transform and ensemble subspace classifier," in *2021 IEEE URUCON*, Montevideo, 2021.
- [10] L. T. Nguyen, H. T. Nguyen, A. D. Afanasiev and T. V. Nguyen, "Automatic identification fingerprint based on machine learning method," *Journal of the Operations Research Society of China*, 2021.
- [11] M. A. Yaman, A. Subasi and F. Rattay, "Comparison of random subspace and voting ensemble machine learning methods for face recognition," *Symmetry*, vol. 10, no. 11, p. 651, 2018.
- [12] A. S. Ashour, Y. Guo, A. R. Hawas and G. Xu, "Ensemble of subspace discriminant classifiers for schistosomal liver fibrosis staging in mice microscopic images," *Health Information Science and Systems*, vol. 6, 2018.
- [13] K. Radhika and S. Varadarajan, "Ensemble subspace discriminant classification of satellite images," *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 77, pp. 633-638, 2018.
- [14] S. Basheer, K. K. Nagwanshi, S. Bhatia, S. Dubey and G. R. Sinha, "FESD: An approach for biometric human footprint matching using fuzzy ensemble learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26641-26663, 2021.
- [15] M. I. Islam, N. Begum, M. Alam and M. R. Amin, "Fingerprint detection using canny filter and DWT, a new approach," *Journal of Information Processing Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 511-520, 2010.
- [16] M. Tico, E. Immonen, P. Ramo, P. Kuosmanen and J. Saarinen, "Fingerprint recognition using wavelet features," in *ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2001.

- [17] K. S. Jeyalakshmi and T. Kathirvalavakumar, "Haralick features from wavelet domain in recognizing fingerprints using neural network," in *International Conference on Mining Intelligence and Knowledge Exploration*, 2020.
- [18] O. Iloanusi, N. David, C. Osuagwu and S. Olisa, "Multiple domains and transform-based features for fingerprint matching," *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 7, no. 9, pp. 27-34, 2018.
- [19] M. D. Al-Hassani, A. Kadhim and V. W. Samawi, "Fingerprint identification technique based on wavelet-bands selection features (WBSF)," *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, vol. 4, no. 3, pp. 308-323, 2013.
- [20] T. Tang, "Fingerprint recognition using wavelet domain features," in *2012 8th International Conference on Natural Computation (ICNC 2012)*, 2012.
- [21] S. Akbar, A. Ahmad and M. Hayat, "Identification of fingerprint using discrete wavelet transform in conjunction with support vector machine," *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 11, no. 5, pp. 189-199, 2014.
- [22] H. M. Jirandeh, H. Sadeghi and M. A. Javadi Rad, "High-resolution automated fingerprint recognition system (AFRS) based on gabor wavelet and SVM," *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 5, no. 5, pp. 166-169, 2014.
- [23] BioLab - University of Bologna, "FVC2000," 2000. [Online]. Available: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/>. [Accessed 4 July 2022].
- [24] BioLab - University of Bologna, "FVC2002 - Second International Fingerprint Verification Competition," 2002. [Online]. Available: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>. [Accessed 4 July 2022].
- [25] Biometric System Lab - University of Bologna, "FVC2004 - Third International Fingerprint Verification Competition," 2003. [Online]. Available: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>. [Accessed 4 July 2022].
- [26] L. Hong, Y. Wan and A. Jain, "Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 8, pp. 777-789, 1998.
- [27] P. Kovesi, "MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing," 2000. [Online]. Available: <https://www.peterkovesi.com/matlabfns/#fingerprints>. [Accessed 17 February 2021].
- [28] A. K. Jain and F. Farrokhnia, "Unsupervised texture segmentation using gabor filters," *Pattern Recognition*, vol. 24, no. 12, pp. 1167-1186, 1991.
- [29] B. Pathak and D. Barooah, "Texture analysis based on the gray-level co-occurrence matrix considering possible orientations," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 9, pp. 4206-4212, 2013.
- [30] R. C. Gonzalez, R. E. Woods and S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*, Gatesmark Publishing, 2009.
- [31] P. Xanthopoulos, P. Pardalos and T. Trafalis, "Linear discriminant analysis," in *Robust Data Mining*, Springer, 2013, pp. 27-33.
- [32] T. K. Ho, "The random subspace method for constructing decision forests," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 8, pp. 832-844, 1998.

- [33] MathWorks, "Ensemble Algorithms," The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/stats/ensemble-algorithms.html#mw_58afb400-8bf3-448f-aaf2-2a2e749a3faa. [Accessed 6 April 2021].

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

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

GJD 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 Gobertti.

Desarrollo de competencia investigativa de estudiantes universitarios de ingeniería en proceso de titulación: propuesta metodológica y experiencia

Development of research competence of undergraduate engineering students in the process of graduation: methodological proposal and experience

Desenvolvimento da competência investigativa de universitários de engenharia no processo de graduação: proposta metodológica e experiência.

Joe Llerena-Izquierdo ¹, Raquel Ayala-Carabajo ²

Recibido: Abril 2022

Aceptado: Octubre 2022

Resumen. - Se presenta una metodología de tutoría para trabajos de investigación aplicada en la unidad de titulación de la carrera de Ingeniería en Computación de la Universidad Politécnica Salesiana, en Guayaquil – Ecuador, durante el 2019-2020. Esta metodología desarrolla un proceso formativo, plantea un conjunto de recursos, además de proponer una serie de principios y resultados. Los estudiantes en proceso de titulación son orientados en el desarrollo y presentación de los resultados de sus investigaciones en formato de artículos para ser sometidos a la evaluación de comités científicos en eventos académicos internacionales de relevancia (con indexación) o de revistas científicas. En efecto, cada estudiante, desarrolla un proceso de tutoría, cinco meses de trabajo (promedio), desde el contacto inicial hasta la preparación del documento a enviar a la revista o exposición respectiva en el congreso donde el trabajo fue aceptado. Esta metodología conduce al universitario a investigar, con enfoque técnico, atendiendo problemas reales en áreas donde las ciencias de la computación e ingeniería pueden resolverlos. Mediante la observación y encuesta se determinaron las percepciones, necesidades y retroalimentación requeridas por el estudiante de acuerdo con su nivel de formación. Como resultado de la aplicación de esta metodología, veintitrés estudiantes publicaron artículos con indexación.

Palabras clave: Educación científica; Tutoría; Metodologías de enseñanza; redacción científica.

Summary. - A mentoring methodology for research works applied in the degree unit of the Computer Engineering career of the Universidad Politécnica Salesiana, in Guayaquil - Ecuador, during 2019-2020 is presented. This methodology develops a formative process, proposes a set of

¹ Magister en Sistemas de Información Gerencial, GieTICEA Educational Innovation Group, <https://gieaci.blog.ups.edu.ec/>, jllarena@ups.edu.ec, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9907-7048>

² Doctora en Educación y Sociedad, GIEACI Research Group, <https://gieaci.blog.ups.edu.ec/>, raquelayalac@gmail.com, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5173-099X>

resources, in addition to proposing a series of principles and results. Students in the process of graduation are guided in the development and presentation of the results of their research in the form of articles to be submitted for evaluation by scientific committees in international academic events of relevance (with indexing) or scientific journals. In fact, each student develops a process of mentoring, five months of work (average), from the initial contact to the preparation of the document to be submitted to the respective journal or exhibition at the congress where the work was accepted. This methodology leads the undergraduate to research, with a technical approach, addressing real problems in areas where computer science and engineering can solve them. Through observation and survey, the perceptions, needs and feedback required by the student according to their level of training were determined. As a result of the application of this methodology, twenty-three students published articles with indexation.

Keywords: Scientific education, Mentoring, Methodologies, Scientific writing.

Resumo. - Apresenta-se uma metodologia tutorial para o trabalho de pesquisa aplicada na unidade de graduação da carreira de Engenharia de Computação da Universidade Politécnica Salesiana, em Guayaquil - Equador, durante 2019-2020. Essa metodologia desenvolve um processo de treinamento, propõe um conjunto de recursos, além de propor uma série de princípios e resultados. Os alunos em processo de graduação são orientados no desenvolvimento e apresentação dos resultados de suas pesquisas em formato de artigo para serem submetidos à avaliação de comissões científicas em eventos acadêmicos internacionais relevantes (com indexação) ou revistas científicas. Com efeito, cada aluno desenvolve um processo de tutoria, cinco meses de trabalho (média), desde o contacto inicial até à preparação do documento a enviar para a respectiva revista ou exposição no congresso onde o trabalho foi aceite. Essa metodologia leva a universidade a investigar, com abordagem técnica, abordando problemas reais em áreas onde a ciência da computação e a engenharia podem resolvê-los. Por meio de observação e levantamento, foram determinadas as percepções, necessidades e feedback exigidos pelo aluno de acordo com seu nível de formação. Como resultado da aplicação dessa metodologia, vinte e três alunos publicaram artigos indexados.

Palavras-chave: Educação Científica; Tutorias; Metodologias de ensino; redação científica.

1. Introducción. - Un proceso definido de formación para la investigación en un estudiante universitario contribuye al desarrollo de habilidades investigativas que se constata en trabajo de interés científico publicado [1][2]. La investigación de grado se define como “una indagación o investigación realizada por un estudiante de grado que hace una contribución intelectual o creativa original a la disciplina”³. Los investigadores y los responsables de la política en educación superior apoyan cada vez más la estrategia de que los estudiantes de grado tengan oportunidades de becas y experiencia de investigación guiada por el profesorado [3][4].

Los cursos específicos de formación en investigación incrementan las habilidades, la confianza en sí mismos y el conocimiento de los estudiantes en esta materia [5]. Estos cursos, además de constituir una oportunidad de conexión entre el aprendizaje académico y la investigación, proporcionan espacios de discusión entre pares, de forma guiada y segura en grupos pequeños (Ibíd.). Esta formación incide, además, en la experiencia técnica y habilidades de comunicación de los estudiantes [6]. Es por esto por lo que, fomentar la investigación de forma rigurosa crea un círculo virtuoso que inspira a estudiantes a sentirse atraídos por la actividad científica y por el descubrimiento, siempre que se evite que su papel sea de simple y limitada asistencia de la investigación [7] o una falta de confianza de la capacidad o competencias de los estudiantes por adquirir habilidades investigativas [8].

Las actividades de investigación en grado se consideran prácticas de alto impacto ya que “brindan a los estudiantes tanto conocimiento avanzado de sus disciplinas académicas como capacidad de aplicar ese conocimiento para responder preguntas de manera creativa” [9]. Claramente, la experiencia en investigación impacta positivamente en los estudiantes de carreras universitarias [10], contribuyendo no solo a la comprensión del proceso de investigación, sino al desarrollo de habilidades de análisis de datos e interpretación de resultados; habilidad de integrar la teoría y la práctica; incluso, habilidades que van más allá de la academia: tolerancia ante los obstáculos, trabajo autónomo, auto confianza, comprensión de que las afirmaciones requieren evidencia, etc.

Desarrollar y mantener programas de investigación de grado beneficia a estudiantes, a los tutores de la facultad y a la universidad al completo. En efecto, los jóvenes desarrollan un pensamiento crítico independiente, además de las habilidades de comunicación. La institución puede beneficiarse de la productividad y visibilidad gracias a las aportaciones de las publicaciones de sus estudiantes, juntamente con sus tutores [10]. Las características y necesidades de la formación para la investigación en grado se hacen explícitas en los resultados de tutorías que han probado ser exitosas (desde la perspectiva de los propios estudiantes implicados) [11]. En concreto, al estudiar la relación entre los estudiantes y sus tutores de investigación [12]. Al mismo tiempo, entre las características que definen la calidad de la tutoría [13] están: a. Planificación estratégica para responder a las diferentes necesidades y habilidades de los estudiantes a lo largo del proceso de investigación; b. Establecimiento de expectativas claras y bien estructuradas para los estudiantes, ofreciéndoles apoyo emocional y atendiendo sus intereses; c. Trabajo específico sobre habilidades y conocimientos de investigación; d. Desarrollo de una comunidad de aprendizaje e investigación entre estudiantes y profesores; e. Dedicación de tiempo a la tutoría y práctica personalizada; f. Motivación de los tutores para la divulgación de los trabajos estudiantiles, con orientaciones rigurosas para que sean efectivas; g. Apoyo para la inserción de los estudiantes en redes científicas. Aunque los resultados de la formación en investigación de grado se han estudiado más ampliamente que las características de la relación tutorial [12], se ha evidenciado que ésta es la que puede producir cambios positivos en la identidad de los estudiantes universitarios, fortaleciendo la confianza y competencia percibida por el propio estudiante; al mismo tiempo, cambios en las expectativas profesionales, de posgrado y de pertenencia, respecto de sí mismo [12]. Y, aunque es cierto que los estudiantes en formación necesitan apoyo de sus contextos (compañeros tanto dentro

³ Disponible en https://www.cur.org/who/organization/mission_and_vision/

como fuera del laboratorio, estudiantes de posgrado y mentores de la facultad, familia, etc.), en su paso hacia una comunidad científica de práctica, especialmente durante sus primeras experiencias como investigadores [14], el papel del tutor es fundamental. En efecto, una tutoría experta equilibra las necesidades de los investigadores en formación y les plantea desafíos junto con el apoyo adecuado; asegura que participen activamente, incluyéndolos en una comunidad de investigación; fomentando su interacción con una audiencia más amplia; desarrollando un interés auténtico en la investigación y no solo en el proyecto concreto [15].

En [16] se ofrecen claves acerca de aquello que contribuye a que la experiencia de investigación sea enriquecedora para los estudiantes de grado: a. Desarrollar un proyecto valioso y significativo, tanto para el tutor como para el estudiante; b. Desarrollar procesos de aprendizaje del ciclo completo de la investigación, desde la hipótesis hasta la conclusión (con independencia del alcance del proyecto); c. Motivar a que los estudiantes planteen los pasos subsecuentes a partir de la investigación, desarrollando propuestas de publicaciones de investigación. En esencia, solo los estudiantes que realizan procesos de investigación verdaderos comprenden lo que “hacer investigación” significa [17]. Investigaciones muestran la importancia de la tutoría en el éxito de los aprendices y de los investigadores de carrera temprana ya que la inserción en redes se vincula al éxito profesional gracias al acceso a la información, a los recursos y apoyo recibido en las carreras. Más aún, la tutoría efectiva está asociada a varios tipos de éxito profesional (p. ej., mayor productividad, promociones más tempranas, y retención). A pesar de ello, sigue “sin estar claro qué aspectos de la tutoría contribuyen más eficazmente a productividad científica” [18]. Al mismo tiempo, hay numerosos estudios sobre los factores que influyen en la actividad de los profesores tutores y su motivación para comprometerse en los procesos formativos de investigación [19]. Por el contrario, la poca motivación hacia la investigación, “apareció relacionada a la experiencia vivida en las asignaturas del componente de investigación, la dinámica y la didáctica utilizada por la mayoría de los docentes; así como a la desarticulación entre estas asignaturas con las asignaturas del área disciplinar” [20].

La tutoría de investigación debe ser prevista “como parte del plan estratégico de una universidad para ayudar a los estudiantes a tener éxito” [21]. En esta línea, el apoyo institucional y económico, es clave en la etapa de formación para la investigación cuando se trata de financiar asistencia a eventos o publicaciones [22]. Más allá de este tipo de apoyo, se han establecido ciertos criterios y acciones que conllevan resultados positivos. Así, por ejemplo, se recomienda que se consideren como propósitos de esta formación en investigación el desarrollo de: competencias investigativas, no sólo habilidades concretas; la ética de la investigación; el espíritu de equipo y la colegialidad; la identidad profesional; la difusión de resultados; la investigación de campo; la formación en técnicas avanzadas [23][24]. Del mismo modo, se aconseja que la tutoría sea planificada mucho antes de que inicie la experiencia de investigación; que contribuya a la progresiva independencia, motivación y adecuación; mantener reuniones periódicas, brindando tutorías personalizadas y proporcionando retroalimentación [25]. Así también [26], como estrategias generales de tutoría, recogen la de desarrollo de proyectos, la de desarrollar la investigación en equipos [27]; la de las co-autorías en las publicaciones, las subvenciones a los proyectos y publicaciones de los estudiantes, entre otras. Estas recomendaciones, sin embargo, no ofrecen concreciones acerca de la metodología de trabajo de los tutores de investigación en contextos universitarios, es decir, la metodología de trabajo concreta que los profesores desarrollan para llevar a cabo esta acción tutorial dentro de las investigaciones revisadas.

1.1. Planteamiento del problema. - En el contexto ecuatoriano, las universidades desarrollan procesos de titulación regulados por el Reglamento de Régimen Académico [28] y que permite que las instituciones de educación superior establezcan (a través de su propia normativa interna) diversidad de productos (proyectos técnicos, artículos académicos, modelos, etc.) en el proceso de titulación.

Dentro de este marco, las universidades ecuatorianas, efectivamente, desarrollan procesos diversos, con resultados diversos. Así, según se observa en las diferentes universidades y, dentro de ellas, las diferentes carreras y procesos de titulación, la acción tutorial del profesor a la hora de orientar los procesos y productos de los estudiantes se caracteriza por una gran heterogeneidad. En el caso de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) del Ecuador, en el año 2018, en el “Reglamento Interno de Régimen Académico de la Universidad Politécnica Salesiana” en su reglamento interno de régimen académico [29], en la disposición Transitoria Quinta, capítulo I, artículo 102 se indica lo siguiente: *“Se consideran trabajos de titulación los siguientes: examen de grado o de fin de carrera, proyectos de investigación, proyectos integradores, ensayos o artículos académicos, etnografías, sistematización de experiencias, prácticas de investigación y/o intervención, análisis de casos, estudios comparados, propuestas metodológicas, propuestas tecnológicas, productos o presentaciones artísticas, dispositivos tecnológicos, modelos de negocios, emprendimientos, proyectos técnicos, trabajos experimentales, entre otros de similar nivel de complejidad”*.

De las opciones de titulación posibles, los estudiantes de las carreras de Grado de la UPS, actualmente, escogen realizar un Proyecto Técnico, un Examen de fin de carrera (complexivo) o un artículo académico. El trabajo de titulación es el trabajo investigativo, académico o artístico, mediante el cual el estudiante debe demostrar el dominio integral de los conocimientos adquiridos a lo largo de su formación universitaria/profesional. Por su parte, la Unidad de Titulación es la encargada de organizar los procesos de titulación de los estudiantes tipificados en la Disposición Transitoria Quinta del Reglamento de Régimen Académico vigente, a través de una planificación académica desde las áreas del conocimiento, y operativizada en las carreras de grado.

Desde el año 2018, como procedimiento general, la Unidad de Titulación presenta a los estudiantes el listado de los grupos de investigación y sus líneas respectivas, así como los proyectos vigentes o de reciente aprobación, a los cuales pudieran integrarse, aportando sus experticias y conocimientos adquiridos en la formación de grado. En algunos casos, los estudiantes aportan una idea de desarrollo que no pretende la solución a un problema, sino la construcción de un prototipo. Con todo, pueden –eventualmente– contribuir a la solución de un problema identificado, desde el planteamiento de una investigación de alcance muy acotado, alrededor del prototipo desarrollado. Es decir, el tutor es quien conduce al estudiante a plantear un tema de investigación adecuado y coherente, teniendo en cuenta la formación del estudiante y sus motivaciones; así como las líneas de investigación de la universidad. Los profesores investigadores que conforman los grupos de investigación de la sede ofrecen espacios y oportunidades para que los estudiantes realicen sus trabajos de investigación de forma guiada; luego de un proceso de selección de los estudiantes, según la pertinencia de las líneas de investigación del grupo dentro de las líneas de investigación institucionales, con el fin de que asimilen nociones clave del proceso de investigación y ejecuten procedimientos claros para plantear y desarrollar un proyecto de investigación. Cabe destacar que se pretende que sean copartícipes de su propia formación, interactuando con los miembros del grupo de investigación y sus propios pares que también desarrollan procesos investigativos con fines de titulación.

Para ello, la Unidad de Titulación realiza actividades de formación (periodo a periodo) para dar a conocer a los estudiantes el proceso de investigación/titulación. Para ello, se convoca a los estudiantes a presentar los anteproyectos, siendo ésta la oportunidad que tienen de elaborar un documento descriptivo del trabajo a realizar (Proyecto Técnico o Artículo Científico).

A partir de la experiencia del primer año de trabajo (2018), se observó que en la carrera de Computación los tutores no llevaban a cabo un proceso, orientaciones y prácticas de investigación comunes y/o compartidas. En efecto, a pesar de que desde el punto de vista organizativo el proceso está estructurado, no se aprecia consistencia y claridad desde el punto de vista metodológico y pedagógico. Es por esto por lo que cada tutor asumía su rol de forma personal y diferenciada, siendo difícil establecer criterios de calidad o un marco acerca de la coherencia y pertinencia del

proceso. El problema identificado era la carencia de un proceso integrador de la formación en investigación para los estudiantes de ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana y una propuesta metodológica efectiva [3][30].

El análisis de esta situación llevó al autor de esta investigación a establecer la necesidad de criterios, procesos, formatos y contenidos de lo que debía ser el proceso de titulación en formato proyecto técnico/texto académico [1]. Principalmente, se determinó que la meta del proceso de los estudiantes debía ser un producto en forma de publicación, a ser presentada en un evento académico y/o científico o publicación seriada, que cumpla la exigencia de revisión por pares.

Para este fin, se desarrolló una metodología para el acompañamiento o tutoría de los estudiantes en el espacio de titulación, un proceso sistemático de tutoría, para desarrollar un proyecto técnico, de resolución de un problema relevante del propio campo profesional.

En la metodología se recogen las características establecidas en [13] y [15], previamente recogidas. Más en concreto, y refiriéndonos al proyecto, para esta investigación se plantearon como objetivos de investigación: Diseñar una metodología mediante el desarrollo de competencias investigativas y de escritura científica para los estudiantes de los últimos ciclos de las carreras de ingenierías de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil; Diseñar protocolos y formatos para el proceso de desarrollo del trabajo investigativo de los estudiantes de las carreras de ingenierías de la universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil; Establecer un proceso de gestión de participación en el Congreso mediante el uso de incentivos por artículos indexados para los nuevos trabajos de los estudiantes de las carreras de ingenierías de la universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil; y, establecer procesos y formatos de preparación mediante asistencias presenciales para la presentación del trabajo de investigación por parte de los estudiantes de las carreras de ingenierías de la universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, entre los principales.

2. Método. - En este estudio participaron veintitrés estudiantes, 10 hombres y 13 mujeres, con edades comprendidas entre los 21 a 25 años pertenecientes a la carrera de Ingeniería en Computación de la sede Guayaquil (Universidad Politécnica Salesiana), siendo tutorizados por el autor de este trabajo⁴. El registro y seguimiento del proceso y trabajo de los estudiantes se realizó mediante Google Drive, además de la plataforma institucional creada para el efecto, un Sistema de Información para la Unidad de Titulación. La tutoría se desarrolló tanto de forma presencial como virtual (mediante la herramienta de comunicación Zoom). Al finalizar la fase de tutoría, una vez el estudiante ha completado satisfactoriamente con el propósito de publicación/defensa de su contribución (y, por tanto, titulación) se aplicó una encuesta para determinar su percepción general respecto del proceso. Cabe destacar que el proceso de acompañamiento a jóvenes en el desarrollo de habilidades para la escritura científica se extiende por alrededor de cinco meses. Se describe de forma sintética el proceso, fases, métodos y orientaciones desde donde se ha tutorizado a todos y cada uno de los estudiantes participantes en el proceso de elaboración de un artículo científico, basado en un proyecto técnico. Si se tiene en cuenta la fecha de aceptación del artículo en un congreso indexado, suman alrededor de siete meses; además, generalmente, en el momento de participar en el congreso para la divulgación de los resultados se cumplen ocho meses (sumados desde la fecha inicial de contacto con el profesor investigador).

2.1. Metodología de formación para la investigación. - En la primera fase se realiza el contacto del estudiante con el profesor investigador. Este primer encuentro y diálogo se desarrolla mediante varios medios de forma alternativa o simultánea: presencialmente y/o por medios electrónicos de un escrito (actualmente el usado de forma masiva, por la situación de pandemia que, hasta la fecha, vivimos). Ordinariamente el estudiante se dirige al profesor solicitando ser tutelado en el proceso de investigación y de desarrollo del artículo académico. El estudiante espera una respuesta

⁴ Grupo de investigación en enseñanza aprendizaje de las Ciencias para la Ingeniería, GIEACI, <https://gieaci.blog.ups.edu.ec/es/trabajos-publicados> | <http://joellerena.info/acompanamiento-academico/>

afirmativa por parte del profesor quien, con una respuesta escrita motivada, responde de forma efectiva y asertiva; atendiendo su pedido y analizando la propuesta del estudiante para que sea él quien se motive por el tema particular, teniendo en cuenta sus intereses y habilidades. Básicamente, se propone indagar un tema específico o explorar las posibilidades del tema planteado por el joven. A continuación, el estudiante y el tutor desarrollan una investigación del estado actual del tema seleccionado o estado del arte para, a partir de aquí, determinar la metodología a ser aplicada.

Le sigue una segunda fase dedicada al diseño de un experimento o práctica de carácter experimental para el desarrollo de un prototipo que sirva como solución en base a un modelo a seguir. En esta fase se prueba el prototipo en diferentes escenarios para identificar las posibilidades de la propuesta y el alcance de los objetivos. Se generan los datos y se procede a la correspondiente tabulación, contrastando los resultados con los de otros trabajos relevantes en el campo de la investigación.

En la tercera fase, por su parte, se determina el formato específico para la escritura de la contribución, empezando por la elección de un congreso de relevancia (que publique memorias) o la revista científica que deberá estar indexada en bases de datos de reconocimiento internacional. Esta fase, en consecuencia, constituye un periodo de aprendizaje intensivo de escritura académica por parte del estudiante, quien debe comprender y cumplir normas y requisitos para presentar trabajos investigativos. El estudiante debe identificar y exponer sintéticamente su estudio: la metodología utilizada, los resultados y conclusiones de la forma más rigurosa posible. En esta fase la comunicación del tutor con el estudiante se intensifica ya que van elaborando sucesivos borradores/versiones del trabajo escrito, haciendo seguimiento y revisión minuciosa de su redacción. Al mismo tiempo, el estudiante va esclareciendo los aspectos metodológicos de su trabajo, analizando trabajos similares en su metodología y/o resultados. Finalmente, en la cuarta fase, cuando el documento final de la propuesta se encuentra finalizado, se envía al Congreso seleccionado o revista. A partir de allí, inicia—de forma independiente a la tutoría y el proceso de titulación— la revisión por pares por parte de un comité científico internacional (cabe destacar que los artículos son enviados en idioma inglés), ver Figura I.

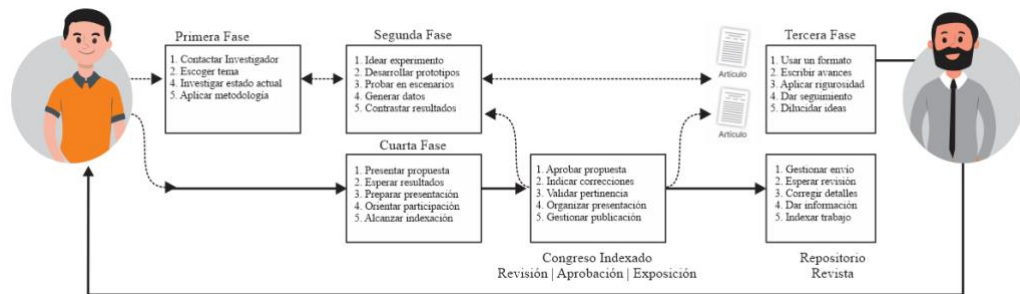


Figura I.- Fases de desarrollo del trabajo de titulación

El diseño y organización de la presentación es parte de esta cuarta etapa que involucra la divulgación de los resultados del estudio. En el caso de presentación a congresos, donde se requiere de una exposición por parte de los estudiantes (normalmente los eventos conceden un tiempo de quince o veinte minutos), se prepara conveniente y suficientemente, haciendo simulaciones de su exposición para asegurar que la presentación (normalmente en formato .pptx), el discurso, la respuesta a preguntas, etc. sean correctas. Con los últimos minutos de la exposición (normalmente los cinco minutos finales para responder preguntas a los asistentes del evento), culmina esta etapa del proceso. La gestión de la publicación, además, se considera componente esencial de esta última etapa del proceso formativo. En este caso, un revisor externo (normalmente de origen anglosajón) escribe a los autores o coautores ofreciendo indicaciones para la corrección, mejora o introducción

de buenas prácticas con el fin de que el trabajo pueda ser publicado según los estándares internacionales de los resúmenes de un Congreso indexado o de revista indexada y, cumpliendo con las respuestas de recepción y envío (cartas de copyright por ejemplo de Springer, Risti, etc.) por parte del editor. En esta etapa, el estudiante cuenta también con el acompañamiento del profesor investigador, orientando a que el joven preste atención a los detalles del trabajo con rigurosidad, cuidado y exactitud. Cabe indicar que el profesor investigador (tutor) y estudiante mantienen comunicación con la carrera de Computación (sede Guayaquil) mediante la página web de la “Unidad de Titulación”, haciendo registro de las 400 horas previstas para el proceso completo, así como de la documentación requerida para completar el proceso de titulación escogido. Al mismo tiempo, el tutor guía al estudiante a usar recursos digitales o servicios tecnológicos para impulsar la divulgación del trabajo publicado, registro del número identificador ORCID, o como medio de comunicación (web Zoom, WhatsApp, Microsoft Teams, Google Hangouts, Skype, etc. tanto en el equipo PC como en el dispositivo celular). Otros servicios tecnológicos que han ayudado en la implementación de esta metodología han sido los repositorios de almacenamiento, versionamiento y de comunicación escrita, como los aplicativos de Google Drive, GitHub de Microsoft y el correo institucional de la universidad con Outlook.

3. Resultados. - Todos los estudiantes participantes en el proceso de tutoría en este estudio culminaron con una publicación científica, ya sea en memorias del congreso y/o revistas indexadas que se encuentran alojados en diferentes repositorios de publicaciones (ver Figura II). La mayoría de los trabajos se encuentran indexados en Scopus así como en la Web of Science y en Latindex.

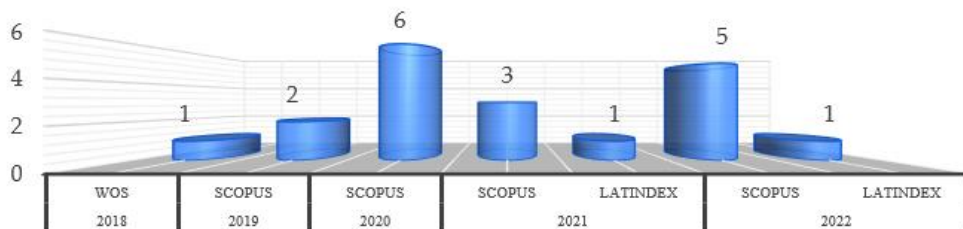


Figura II.- Trabajos desarrollados aplicando la metodología de tutoría de investigación

Cabe destacar que el proceso de escritura del producto científico, dentro de la tutoría ha oscilado entre un mes hasta ocho meses. De las respuestas de los estudiantes participantes, se obtuvo que la satisfacción de haber optado por este mecanismo de titulación es del 100%; los estudiantes indican que ha sido muy satisfactorio finalizar la experiencia de acompañamiento propuesta por el autor de esta investigación, mediante la divulgación de resultados de investigación por medio de la participación en un Congreso Internacional o el envío a una revista. En lo que respecta a la etapa de contacto con el tutor (ver Figura III), que supone la exploración conjunta de un tema y/o solución a un problema determinado, dentro del campo profesional, el 87% considera que ha sido extremadamente adecuado, mientras que el 13% lo considera adecuado.

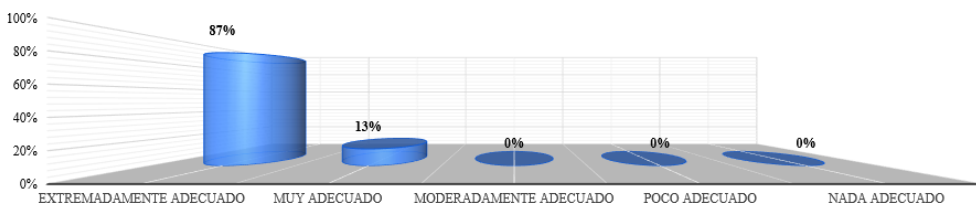


Figura III.- Percepción de los estudiantes acerca de la etapa para la determinación del tema

En lo que respecta a la percepción que los estudiantes tienen sobre la fase de búsqueda de artículos científicos, consideran que fue extremadamente adecuada un 57% y muy adecuada un 43%. Por otra parte, los estudiantes consideran que el proceso de crear y diseñar un prototipo aplicable,

probar su funcionamiento y la posterior fase de mejoras les ha resultado entre extremadamente adecuado un 65% y muy adecuado un 35%. En la etapa en que los estudiantes tienen un prototipo ya desarrollado, invitan a los participantes a experimentarlo, desarrollando pruebas de campo, han experimentado que la tutoría y este proceso en sí ha sido extremadamente adecuado en su gran mayoría un 83%, muy adecuado un 13% y moderadamente adecuado un 4%. Como parte de esta metodología, los estudiantes deben desarrollar una encuesta, aplicarla, recolectar los datos y, posteriormente, procesarlos. También han experimentado de forma muy positiva esta etapa, siendo el 52% extremadamente adecuado, el 39% muy adecuada y un 9% moderadamente adecuado. Respecto de la etapa de redacción del documento científico, es favorable la percepción del estudiante ya que considera extremadamente adecuado un 65% y muy adecuado un 35% el trabajo desarrollado en el contexto de la tutoría. Así también, ha sido valorada de forma muy positiva la fase de acompañamiento para el envío del artículo y la recepción de la valoración por parte de los evaluadores/pares externos al proceso de titulación que han sido los equipos designados por los congresos o revistas científicas donde el 69% ha considerado este acompañamiento extremadamente adecuado y el 31% muy adecuado. Junto con esto, es también positiva la percepción que los estudiantes tienen de la tutoría durante la fase de preparación para participar en un evento científico, considerando el 83% que es extremadamente adecuado y un 17% que es muy adecuado. Una de las condiciones para la participación es el registro, etapa previa, que no siempre resulta asequible para los estudiantes. Sin embargo, según las respuestas obtenidas en la encuesta los estudiantes consideran que los factores que más han contribuido a este registro han sido la gestión del tutor un 87% y el apoyo de la institución un 13% como se muestra en la Figura IV.

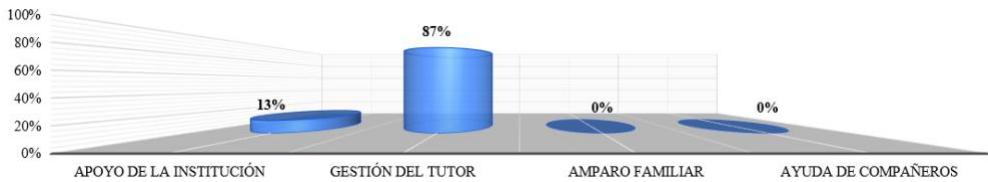


Figura IV.- Factores que contribuyeron al registro del artículo en un evento científico

De forma general, los estudiantes consideran que la titulación mediante el desarrollo de un producto como el artículo científico a partir de un proyecto técnico, es lo más adecuado (96% totalmente de acuerdo y 4% de acuerdo). Uno de los aspectos clave de la tutoría es la explicación del tutor, o acompañamiento en la exploración (elección, definición, profundización, aplicación, etc.) del tema de investigación. Se ha consultado sobre esta facilidad para seguir la explicación y el 18% la ha considerado muy fácil, el 52% fácil y el 30% neutral (ni fácil ni difícil). En términos generales, al valorar la metodología que el tutor ha desarrollado, el estudiante considera que ha sido extremadamente adecuada un 83% y muy adecuada un 17%. Así también, al ser consultado acerca de su percepción sobre el desarrollo de competencias nuevas en la formación investigativa, los estudiantes están totalmente de acuerdo en un 87% y parcialmente de acuerdo 13%. Complementariamente, respecto de la importancia de compartir esta metodología (Figura V), los estudiantes consideran que es muy importante un 83%, importante un 13% y neutral un 4%.

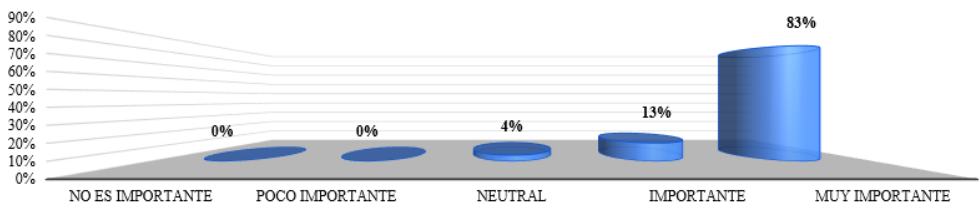


Figura V.- Percepción del estudiante sobre la importancia de compartir la metodología

4. Discusión y Conclusiones. - El rol y la acción del tutor es clave para la calidad de la formación en investigación en los estudiantes de grado. Si esta formación se da, no solo en el contexto de la etapa final del grado (titulación), sino como parte de un auténtico proyecto de investigación, con apoyo institucional, conformando redes entre pares y otros investigadores de mayor experticia; pero, sobre todo, con miras a generar una contribución científica sometida a los estándares internacionales de calidad, como en las contribuciones a eventos y revistas indexadas. El acompañamiento del tutor se hace efectivo, significativo y duradero en la medida en que es planificado, sistemático, garantice el seguimiento personalizado y la retroalimentación; introduce al estudiante en los métodos y técnicas de investigación científica, en el contexto de una red de apoyo conformada por la institución, los grupos de investigación y los pares de los mismos estudiantes; y si, además, es exigente con los criterios de calidad del producto esperado, esto es, el proyecto y/o la contribución científica. Sin embargo, esta acción tutorial, exige que se llegue a niveles de concreción metodológica que posibilite su seguimiento, valoración y eventual difusión/adopción por parte de los equipos docentes. Esa ha sido justamente la aportación de este estudio, la presentación de una metodología que ha sido experimentada y sistematizada a lo largo del acompañamiento de varios estudiantes en periodo de titulación que han concluido sus estudios con un artículo académico, basado en un proyecto de investigación aplicada, publicado en congresos y/o revistas indexadas. La metodología asegura los avances, ofrecer una retroalimentación oportuna y, mantener el compromiso y la motivación. Así, se han establecidos principios, recomendaciones, fases y recursos, diseñando una metodología de formación para la investigación aplicada en tutoría del proceso de titulación de estudiantes de ingeniería que ha tenido resultados positivos. Esta metodología promueve altos niveles de autonomía y aprendizaje de los estudiantes. En efecto, tanto desde la percepción del estudiante (determinada por una encuesta posterior a la titulación) como desde la valoración que han tenido los artículos publicados, la metodología ha resultado no solo eficaz en su propósito, sino que ha contribuido en muchos sentidos a la formación del perfil investigativo y profesional del estudiante. Así, y resumidamente, la experiencia tiene alto impacto en el cambio de mentalidad sobre la investigación, ofreciéndole la posibilidad de experimentar los métodos y procedimientos científicos, así como los marcos de referencia teóricos en sus últimos avances; conlleva mejora en su autopercepción y crecimiento de su autoestima como estudiante e investigador al experimentar que su esfuerzo y trabajo, así como su aportación, puede ser percibido positivamente por la comunidad científica. El establecimiento de una metodología, como la propuesta aquí, garantiza un proceso organizado y claro de principio a fin, contribuyendo a la sistematización de las acciones y esfuerzos del estudiante. Al mismo tiempo, para el profesor universitario en rol de tutor, se hace posible un análisis acerca de la calidad y adecuación del proceso; incorporando los logros de forma consecutiva. Esto, al mismo tiempo que al profesor, le dará seguridad al estudiante y los resultados contribuirán a la satisfacción de ambos. En los siguientes estudios, será necesario determinar de qué forma esta metodología (que el autor sigue desarrollando actualmente con nuevos estudiantes y que se evidencia en esta actualización de los datos [1]) se puede adaptar a diferentes contextos, niveles y propósitos de formación en investigación, así como con grupos más numerosos o generando un semillero de estudiantes para orientar a otros. Además, se requiere explorar con mayor profundidad la estrategia de formación del profesorado para la implementación de esta metodología, teniendo en cuenta la circunstancias y exigencias concretas de su acción tutorial.

5. Referencias

- [1] J. Llerena-Izquierdo and R. Ayala-Carabajo, "Training Methodology for Applied Research in the Graduation Mentoring Process of Engineering Students," *2021 IEEE URUCON*, pp. 531–535, Nov. 2021, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647382.
- [2] H. V. Rosenzuaig, C. C. Escobar, and C. M. Parra, "La Academia Politécnica Naval frente al reto de la Investigación Académica," *Rev. Mar. N°*, vol. 971, pp. 60–66, 2019.
- [3] W. B. Johnson, L. L. Behling, P. Miller, and M. Vandermaas-Peeler, "Undergraduate research mentoring: Obstacles and opportunities," *Mentor. Tutoring Partnersh. Learn.*, vol. 23, no. 5, pp. 441–453, Jan. 2015, doi: 10.1080/13611267.2015.1126167.
- [4] F. Aguilar Gordón *et al.*, "Experiencias docentes en tiempo de pandemia," 2022. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21823>.
- [5] N. Balster, C. Pfund, R. Rediske, and J. Branchaw, "Entering research: A course that creates community and structure for beginning undergraduate researchers in the STEM disciplines," *CBE Life Sci. Educ.*, vol. 9, no. 2, pp. 108–118, Oct. 2010, doi: 10.1187/cbe.09-10-0073.
- [6] L. S. Behar-Horenstein, K. W. Roberts, and A. C. Dix, "Mentoring undergraduate researchers: An exploratory study of students' and professors' perceptions," *Mentor. Tutoring Partnersh. Learn.*, vol. 18, no. 3, pp. 269–291, Aug. 2010, doi: 10.1080/13611267.2010.492945.
- [7] J. Li and L. Luo, "Nurturing Undergraduate Researchers in Biomedical Sciences," *Cell*, vol. 182, no. 1, pp. 1–4, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.05.008.
- [8] M. Griffiths, "Publishing with undergraduates: some further observations," *Psychol. Teach. Rev.*, vol. 21, no. 1, pp. 76–80, 2015.
- [9] S. N. Davis and R. M. Jones, "Understanding the role of the mentor in developing research competency among undergraduate researchers," *Mentor. Tutoring Partnersh. Learn.*, vol. 25, no. 4, pp. 455–465, Aug. 2017, doi: 10.1080/13611267.2017.1403534.
- [10] J. K. Petrella and A. P. Jung, "Undergraduate Research: Importance, Benefits, and Challenges," *Int. J. Exerc. Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 91–95, 2008, [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27182299%0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC4739295>.
- [11] D. Mahatmya *et al.*, "Pathways to Undergraduate Research Experiences: a Multi-Institutional Study," *Innov. High. Educ.*, vol. 42, no. 5–6, pp. 491–504, Dec. 2017, doi: 10.1007/s10755-017-9401-3.
- [12] S. N. Davis and R. Jones, "The Genesis, Evolution, and Influence of Undergraduate Research Mentoring Relationships," *Int. J. Scholarsh. Teach. Learn.*, vol. 14, no. 1, 2020, doi: 10.20429/ijstl.2020.140106.
- [13] J. O. Shanahan, E. Ackley-Holbrook, E. Hall, K. Stewart, and H. Walkington, "Ten salient practices of undergraduate research mentors: A review of the literature," *Mentor. Tutoring Partnersh. Learn.*, vol. 23, no. 5, pp. 359–376, Jan. 2015, doi: 10.1080/13611267.2015.1126162.
- [14] G. Gardner, J. Forrester, P. Shumaker Jeffrey, M. Ferzli, and D. Shea, "Authentic Science Research Opportunities: How Do Undergraduate Students Begin Integration Into a Science Community of Practice?," *J. Coll. Sci. Teach.*, vol. 044, no. 04, 2015, doi: 10.2505/4/jcst15_044_04_61.
- [15] H. Walkington, K. A. Stewart, E. E. Hall, E. Ackley, and J. O. Shanahan, "Salient practices of award-winning undergraduate research mentors—balancing freedom and control to achieve excellence," *Stud. High. Educ.*, vol. 45, no. 7, pp. 1519–1532, Jul. 2020, doi: 10.1080/03075079.2019.1637838.
- [16] N. B. Whitticar and C. S. Nunemaker, "Reflections on Undergraduate Research Mentoring," *Biophys.*, vol. 1, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.35459/tbp.2019.000112.
- [17] M. A. Marciniak, "Mentoring STEM Undergraduate Research Projects in a Large

- Community College,” *Primus*, vol. 30, no. 7, pp. 777–789, Aug. 2020, doi: 10.1080/10511970.2019.1639227.
- [18] Á. Gutiérrez, L. R. Guerrero, H. E. McCreath, and S. P. Wallace, “Mentoring experiences and publication productivity among early career biomedical investigators and trainees,” *Ethn. Dis.*, vol. 31, no. 2, pp. 273–282, Apr. 2021, doi: 10.18865/ED.31.2.273.
- [19] V. L. Baker, M. J. Pifer, L. G. Lunsford, J. Greer, and D. Ihas, “Faculty as mentors in undergraduate research, scholarship, and creative work: Motivating and inhibiting factors,” *Mentor. Tutoring Partnersh. Learn.*, vol. 23, no. 5, pp. 394–410, Jan. 2015, doi: 10.1080/13611267.2015.1126164.
- [20] M. Sánchez, “La Investigación Científica en la Formación de Estudiantes Universitarios,” *Rev. Paradig. (Edición Cuadragésimo Aniversario 1980-2020)*, vol. 41, pp. 409–436, 2020.
- [21] D. D. Law, K. Hales, and D. Busenbark, “Student Success: A Literature Review of Faculty to Undergraduate Mentoring,” *J. Empower. Teach. Excell.*, vol. 4, no. 1, pp. 22–40, Apr. 2020, doi: 10.15142/38X2-N847.
- [22] S. N. Davis, R. M. Jones, D. Mahatmya, and P. W. Garner, “Encouraging or Obstructing? Assessing Factors That Impact Faculty Engagement in Undergraduate Research Mentoring,” *Front. Educ.*, vol. 5, p. 114, Jul. 2020, doi: 10.3389/educ.2020.00114.
- [23] T. Giuliano, J. L. M. Skorinko, and M. Fallon, “Editorial: Engaging undergraduates in publishable research: Best practices,” *Front. Psychol.*, vol. 10, no. AUG, p. 1878, Aug. 2019, doi: 10.3389/fpsyg.2019.01878.
- [24] M. E. Morrison *et al.*, “Integrating Research into the Undergraduate Curriculum: 2. Scaffolding Research Skills and Transitioning toward Independent Research.,” *Journal of undergraduate neuroscience education: JUNE: a publication of FUN, Faculty for Undergraduate Neuroscience*, 2020. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33880093>.
- [25] G. A. Boysen *et al.*, “Mentorship of undergraduate research experiences: Best practices, learning goals, and an assessment rubric.,” *Scholarsh. Teach. Learn. Psychol.*, vol. 6, no. 3, pp. 212–224, Sep. 2020, doi: 10.1037/stl0000219.
- [26] T. A. Giuliano, “Guiding undergraduates through the process of first authorship,” *Front. Psychol.*, vol. 10, no. APR, p. 857, Apr. 2019, doi: 10.3389/fpsyg.2019.00857.
- [27] J. Llerena Izquierdo, “El Trabajo en Equipo Aligera la Carga,” Jan. 10, 2021. <https://pure.ups.edu.ec/es/publications/el-trabajo-en-equipo-aligera-la-carga>.
- [28] Consejo de Educación Superior del Ecuador, “Reglamento de Régimen Académico Consejo,” 2019. https://www.ces.gob.ec/lotaip/Anexos Generales/a3_Reformas/r.r.academico.pdf.
- [29] Universidad Politécnica Salesiana, “Normativa - UPS,” 2018. https://www.ups.edu.ec/normativa/-/document_library_display/u8OILwInqXw9/view/3169257.
- [30] J. Llerena-Izquierdo and R. Ayala-Carabajo, “La acción de acompañamiento salesiano del joven investigador universitario desde un proceso formativo,” in *Memorias del IV Congreso de Educación Salesiana: desafíos juveniles para una transformación social*, 2021, pp. 137–147.

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

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

RAC 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.

Electrificación por microrredes en zonas rurales de la provincia del Azuay, Ecuador

Electrification by microgrids in rural areas of the Azuay province, Ecuador

Eletrificação por microrredes em áreas rurais da província de Azuay, Equador.

Diego Ochoa Ochoa¹, Christopher Ochoa Malhaber², Sergio Ochoa Ochoa³

Recibido: Mayo 2022

Aceptado: Noviembre 2022

Resumen. - La electrificación de zonas rurales es un tema cada vez más relevante, debido a que en ciertos casos no se dispone de la red eléctrica tradicional. Es por ello, que es motivo de estudio el uso de microrredes de energías renovables aplicadas a estas zonas. Es importante considerar el recurso energético disponible para así poder dimensionar adecuadamente el sistema de microrred, ya que ciertos sistemas no pueden ser viables. En este estudio, se proponen dos sistemas de microrredes de generación de energías renovables: el primero es un sistema eólico/fotovoltaico que trabaja con la radiación indirecta del sol [$\text{kWh/m}^2/\text{día}$] y la velocidad promedio del viento [m/s]; el segundo es un sistema netamente fotovoltaico que utiliza la radiación indirecta y la temperatura del sol, ambos sistemas son aislados y cuentan con un banco de almacenamiento energético (baterías), además tienen como carga a un consumidor rural residencial de 160 kWh/mes. Los sistemas son simulados y modelados en el software HOMER Pro. Los resultados indican que el sistema de microrred fotovoltaico es el más viable, ya que el lugar cuenta con bajas velocidades de viento y por lo tanto un sistema eólico no es viable.

Palabras clave: microrredes; comunidades rurales; generación eléctrica; energías renovables; HOMER Pro.

Summary. - *The electrification of rural areas is an increasingly relevant issue, since in some cases they do not have access to the traditional electricity grid. For this reason, the use of renewable energy microgrids applied to these areas is being studied. It is important to consider the available energy resource in order to adequately size the microgrid system, since certain systems may not be viable. In this study, two renewable energy generation microgrid systems are proposed: the first is a wind/photovoltaic system that works with the indirect radiation of the sun [$\text{kWh/m}^2/\text{day}$] and the average wind speed [m/s]; the second is a purely photovoltaic system that uses the indirect radiation and the temperature of the sun, both systems are isolated and have an*

¹ Ingeniero Eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador), dochoao@est.ups.edu.ec, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2188-8657>

² Ingeniero Eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador), cochoam2@est.ups.edu.ec, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7326-8273>

³ Ingeniero Mecánico Automotriz. Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador), sochoao@est.ups.edu.ec, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3970-553X>

energy storage system (battery bank), also have as load a rural residential consumer of 160 kWh/month. The systems are simulated and modeled in HOMER Pro software. The results indicate that the photovoltaic microgrid system is the most viable, since the site has low wind speeds and therefore a wind system is not viable.

Keywords: *microgrids; rural communities; electricity generation; renewable energies; HOMER Pro.*

Resumo. - *A eletrificação das zonas rurais é um tema cada vez mais relevante, pelo facto de em certos casos a rede elétrica tradicional não estar disponível. É por isso que o uso de microrredes de energia renovável aplicadas a essas áreas é motivo de estudo. É importante considerar o recurso energético disponível para dimensionar adequadamente o sistema de microrrede, uma vez que determinados sistemas podem não ser viáveis. Neste estudo são propostos dois sistemas de microrrede de geração de energia renovável: o primeiro é um sistema eólico/fotovoltaico que trabalha com a radiação indireta do sol [kWh/m²/dia] e a velocidade média do vento [m/s]; o segundo é um sistema puramente fotovoltaico que utiliza a radiação indireta e a temperatura do sol, ambos os sistemas são isolados e possuem banco de armazenamento de energia (baterias), também cobram de um consumidor rural residencial 160 kWh/mês. Os sistemas são simulados e modelados no software HOMER Pro. Os resultados indicam que o sistema de microrrede fotovoltaica é o mais viável, pois o local possui baixas velocidades de vento e portanto um sistema eólico não é viável.*

Palavras-chave: *microrredes; comunidades rurais; geração da eletricidade; energia renovável; HOMER Pro.*

1. Introducción. - El progreso tecnológico promueve la creación de nuevas técnicas para la generación de electricidad enfocadas al desarrollo sostenible con cero consumos de combustibles fósiles. Estas técnicas innovadoras proporcionan energía limpia y sustentable, siempre con la finalidad de operar a favor del ecosistema sin emisión de contaminantes [1]. Uno de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) promueve el acceso a una energía asequible, segura y moderna, que según [2] una de cada 5 personas carece de este servicio moderno. La distribución eléctrica no siempre puede llegar abastecer a aquellos lugares de difícil acceso que por condiciones geográficas son una desventaja para el consumidor final [3]. Las microrredes son una alternativa viable en cuanto a servicio eléctrico en zonas aisladas; el montaje e instalación de equipos no requiere de una gran inversión como la que necesitaría un proyecto de gran escala [4].

Una microrred se enfoca en cubrir la demanda residencial individual o comunitaria de un determinado lugar, proporcionando electricidad a cualquier tipo de vivienda en general [5].

Un sistema Off-Grid ofrece distintas funcionalidades, como suministrar energía en lugares remotos en donde no cuenten con la red eléctrica tradicional, o para iluminar sitios pocos accesibles con iluminación tradicional u ornamental [6]. Un país en proceso de desarrollo como es el Ecuador, cuenta con un gran potencial de recursos derivados de aquellas fuentes de energía con origen renovable. Su zona geográfica compuesta por cordilleras, valles, islas, entre otros, permite aprovechar el flujo de aire y la irradiación solar como una solución práctica y sostenible para el país. Con este panorama se evidencia que la aplicación de las microrredes no es un reto cuando se trata de generación distribuida [7].

En la última década planificaron y construyeron importantes proyectos como la Central Eólica Villonaco y la Central Solar Isabela, situadas en las provincias de Loja y Galápagos, respectivamente, siendo Galápagos la que tiene un gran reto en la gestión del complejo sistema eléctrico, debido a que son islas remotas con una biodiversidad única en el mundo y donde los suministros tradicionales de energía son limitados, porque la mayor parte de esta zona está protegida [8]. Por ello, el actual gobierno ratifica el compromiso que tiene el país de apostar por nuevos métodos de generación renovable, al dar luz verde al proyecto eólico Minas de Huascachaca, provincia de Loja, Ecuador. Estudio realizado y gestionado en dos fases por la empresa ELECAUSTRO, la fase UNO se centra en la obra civil de carreteras y puentes; y la fase DOS se subdivide en A y B. La fase DOS A se enfoca en la construcción y puesta en marcha de la subestación Uchucay, mientras que la fase DOS B se ocupa del montaje de los aerogeneradores [9].

2. Desarrollo. – Esta sección describe el procedimiento utilizado para el desarrollo del estudio, comienza por la determinación de la zona (parroquia Checa.), la demanda existente, los recursos disponibles y las propuestas de microrredes. Es importante mencionar que las redes que electrifican a la parroquia, son propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS). Sin embargo, para la dotación de servicios nuevos, dentro del área de concesión de la Empresa, La Jefatura Técnica analiza la factibilidad de una extensión de red. En ocasiones no se procede por que el usuario tiene la necesidad de optar por otra fuente de energía, diferente a la convencional.

2.1. Ubicación satelital de la provincia del Azuay. – Para iniciar la simulación, se marca el punto de referencia en el mapa, que proporciona la información geográfica correspondiente al lugar. El análisis se realiza en la parroquia Checa, situada en dirección norte del cantón Cuenca, que es una de las 15 parroquias rurales que posee la ciudad, en la provincia del Azuay. Ecuador.

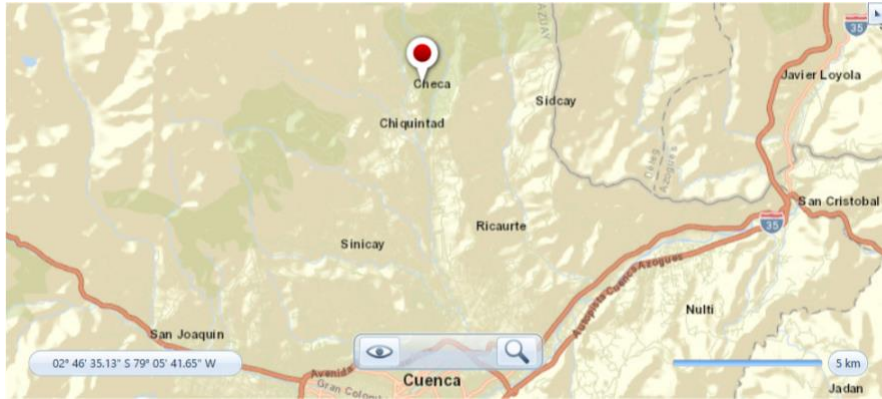


Figura I.- Ubicación satelital de la zona de estudio

2.2. Perfil de carga de la parroquia Checa. – En esta parroquia habitan alrededor de unas tres mil personas y se espera que para el año 2025 esta cifra aumente en un 6%, lo que indica que el perfil de carga este en constante crecimiento. La Figura II muestra el comportamiento de la demanda eléctrica residencial diaria, en la madrugada el consumo es mínimo porque las familias duermen. Pasada las 6:00 el consumo aumenta ligeramente hasta las 8:00 porque las familias se preparan para realizar sus actividades cotidianas fuera del hogar. Durante la jornada vespertina, la demanda se mantiene casi constate y a partir de las 18:00 se produce un pico máximo de la demanda [9].

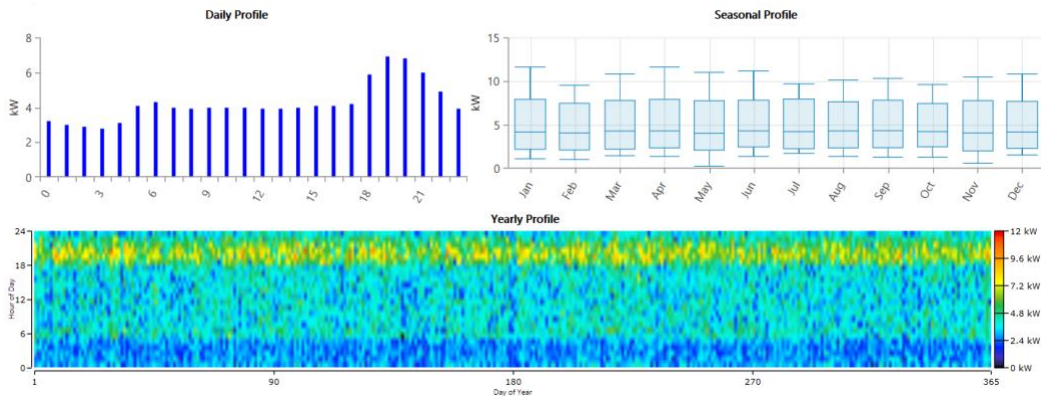


Figura II.- Perfil de carga residencial diario, mensual y anual de la zona de emplazamiento

2.3. Registro meteorológico de la parroquia Checa. – La plataforma NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) permite al usuario acceder a la base de datos meteorológicos de la parroquia y vincularlos internamente con el simulador. La Figura III muestra una radiación superior a los 4 kWh/m² por día para todos los meses y la Figura IV muestra una velocidad media de viento inferior a 6 m/s en los meses de julio y agosto, a pesar de ser catalogados como los meses de mayor afluencia.

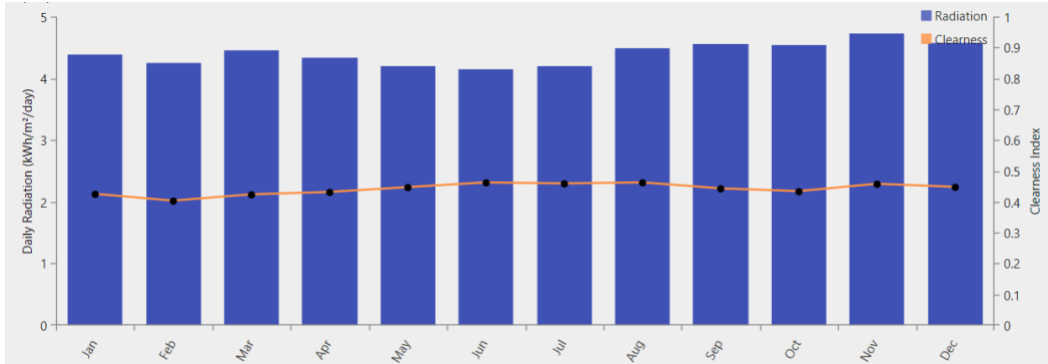


Figura III.- Radiación diaria [kWh/m²/día] de la zona de emplazamiento

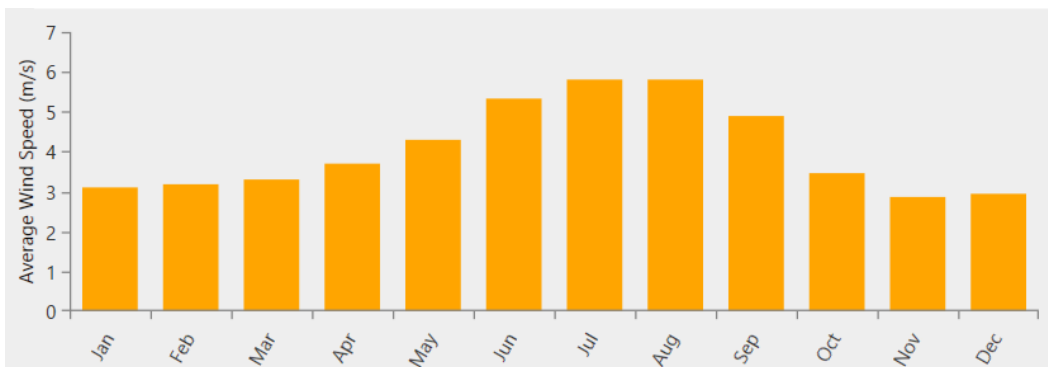


Figura IV.- Velocidad del viento promedio [m/s] de la zona de emplazamiento

2.4. Configuración microrred Eólico/FV. – Para el diseño se eligió un sistema híbrido formado por un micro aerogenerador de 1 kW y un arreglo de módulos FV de la misma potencia que la máquina eólica. También cuenta con un convertidor regulador que transforma y regula la tensión que entra en un conjunto baterías para el almacenamiento y transformación de la corriente para el suministro de energía, es decir cargar las baterías cuando existe generación y utilizar la energía almacenada cuando no la hay. Con este diseño, el sistema híbrido podrá llegar a abastecer una demanda de 11,27 kWh/día.

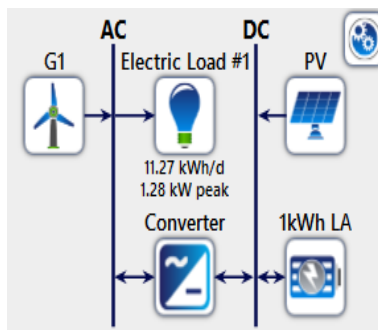


Figura V.- Configuración del sistema de microrred Eólico/FV

2.5. Configuración microrred FV. – En este segundo escenario se emplea un arreglo de módulos FV de 1 kW, un convertidor regulador y un banco de baterías de plomo ácido encargadas del almacenamiento de energía.

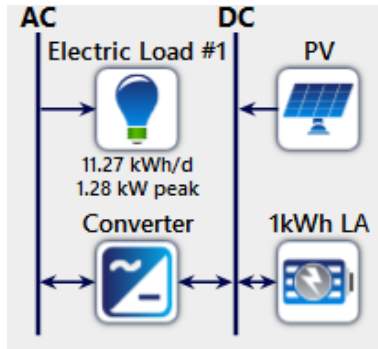


Figura VI. - Configuración del sistema de microrred FV

3. Resultados. – Considerando las restricciones de los recursos energéticos en la región, los resultados de las simulaciones de los sistemas de microrredes se muestran en tres puntos, el primero muestra las respuestas que obtuvo el sistema de microrred Eólico/FV, el segundo muestra la respuesta del sistema de microrred FV, y el tercero una comparativa de resultados entre los dos sistemas.

3.1. Microrred Eólico/FV. – En la Tabla I se presentan los costos por componente para el sistema de microrred Eólico/FV.

Componente	Costo de Capital	Costo de Reemplazo	Costo de O&M por año
Aerogenerador	\$ 5.000,00	\$ 4.500,00	\$ 1.000,00
Baterías	\$ 9.000,00	\$ 7.950,94	\$ 900,00
Paneles FV	\$ 9.628,59	\$ 9.310,00	\$ 962,80
Sistema Convertidor	\$ 354,25	\$ 354,25	\$ 35,43

Tabla I.- Costos para el sistema de microrred Eólico/FV

La Figura VII muestra la producción de energía mensual por sistema de generación en [MWh], en donde se aprecia que la mayor producción es por el sistema de generación fotovoltaico, esto se debe a que en la irradiación solar se mantiene más o menos constante a lo largo del año y la generación de energía no tiene una gran variación. En cambio, para el sistema de generación eólico, se presentan irregularidades en las velocidades del viento, lo que se traduce como menores producciones de energía; es en los meses de mayo hasta septiembre en donde se ve una leve generación.

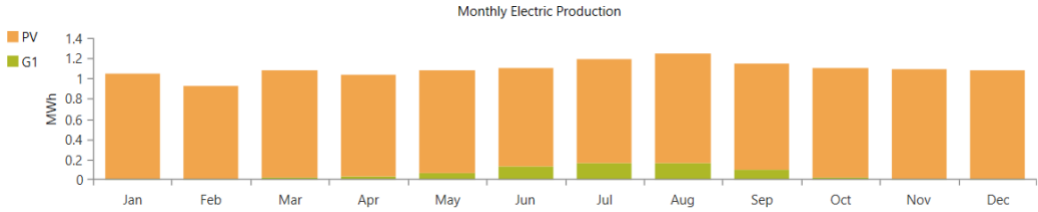


Figura VII.- Producción de energía [MWh] mensual por sistema, microrred Eólico/FV

La Figura VIII muestra la producción de energía anual por sistema de generación, por paneles fotovoltaicos y por turbina eólica, en donde se aprecia que la producción no solo es mayor (en valor medio) sino que también tiene menos variabilidad intra-diaria y en el período completo de simulación.

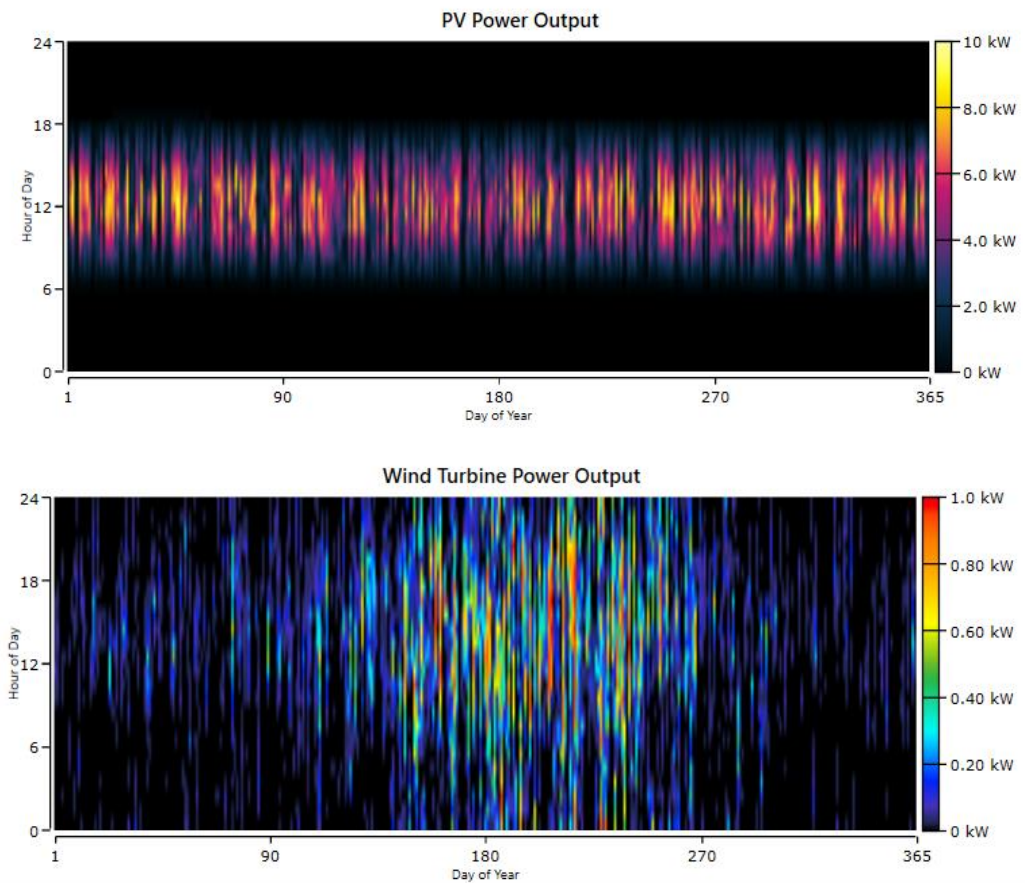


Figura VIII.- Producción anual por paneles fotovoltaicos y por turbina eólica, microrred Eólico/FV

La Figura IX muestra el estado de carga anual del conjunto de baterías, se aprecia que cambia considerablemente durante cada día. Debido a que las baterías deben de trabajar en los límites más altos durante mucho tiempo, porque tienen que recargarse con el sistema de microrred y durante la noche tienen que suministrar la energía a las cargas.



Figura IX.- Carga del conjunto de baterías, microrred Eólico/FV

3.2. Microrred Eólico/FV. – En la Tabla II se presentan los costos por componente para el sistema de microrred FV.

Componente	Costo de Capital	Costo de Reemplazo	Costo de O&M por año
Baterías	\$ 9.000,00	\$ 8.647,16	\$ 900,00
Paneles FV	\$ 10.838,77	\$ 9.650,00	\$ 1.083,88
Sistema Convertidor	\$ 391,12	\$ 391,12	\$ 39,11

Tabla II.- Costos para el sistema de microrred FV

La Figura X muestra la producción de energía mensual [MWh] por el sistema de generación fotovoltaico, la irradiación solar se mantiene más o menos constante a lo largo del año y la generación de energía no tiene una gran variación. El sistema funciona adecuadamente y puede suministrar de energía al consumidor e inclusive presenta excesos de producción.

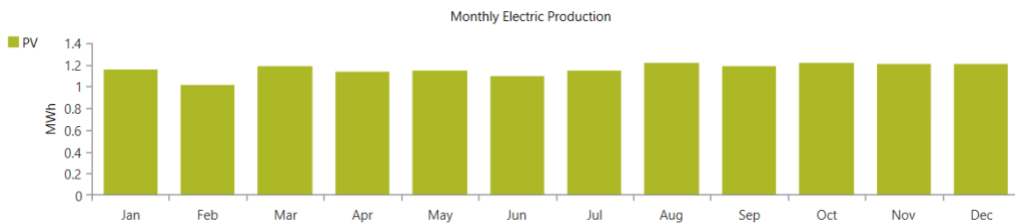


Figura X.- Producción de energía [MWh] mensual por sistema, microrred FV

La Figura XI muestra la producción de energía anual por paneles fotovoltaicos, en donde comparando con el sistema anterior, se ve una semejanza en cuanto a producción de energía.

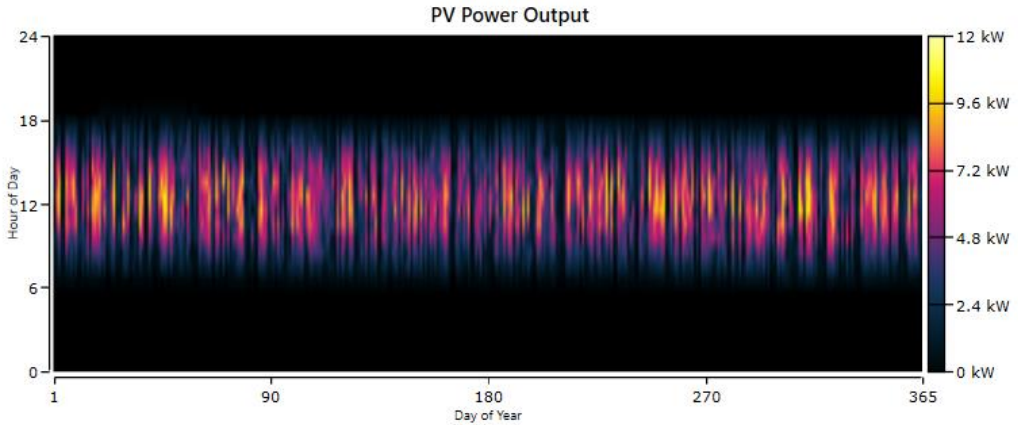


Figura XI.- Producción anual por paneles fotovoltaicos, microrred FV

La Figura XII muestra el estado de carga anual del conjunto de baterías, se aprecia un estado de carga similar al conjunto anterior. En donde las baterías deben trabajar en el estado de carga más alto posible, afectando la vida útil de las mismas y produciendo desgastes en la cargabilidad, al estar continuamente cargándose y descargándose para poder suministrar de energía al usuario consumidor. Una forma de mitigar este impacto es mantener las baterías entre el 20 y el 80% de carga, así no soportan mucho estrés ni desgaste.

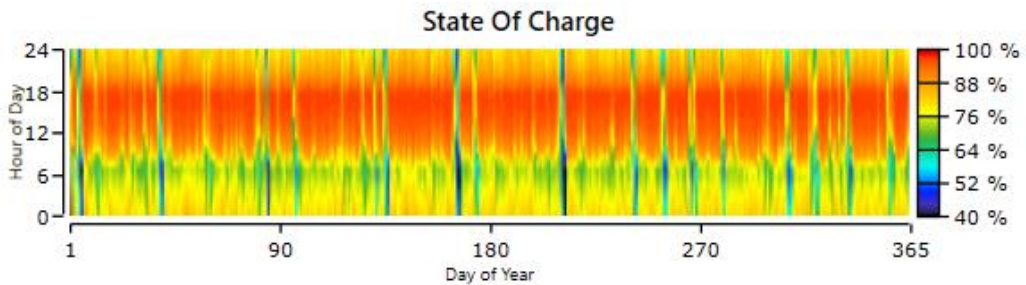


Figura XII.- Carga del conjunto de baterías, microrred FV

3.3. Comparación de los dos sistemas de microrredes. – En la Tabla III se presenta los resultados de los dos sistemas de microrredes, el Eólico/FV y el solo FV. Se muestran los valores de NPC [M\$], que es el coste actual neto o coste del ciclo de vida de un componente y es el valor actual de todos los costes de instalación y funcionamiento del componente a lo largo de la vida del proyecto, menos el valor actual de todos los ingresos que obtiene a lo largo de la vida del proyecto. HOMER calcula el NPC de cada componente del sistema y del sistema en su conjunto. Además del COE [\$/kWh], que es el coste nivelado de la energía, HOMER lo define como el coste medio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema. Por último, se muestra los valores de costo de capital de los sistemas en miles de dólares [k\$], la producción por paneles fotovoltaicos [kW] y por el aerogenerador [kW] y la capacidad de almacenamiento del conjunto de baterías [kWh].

Caso	Eólico/FV	FV
NPC [M\$]	0.06	0.04
COE [\$/kWh]	1.18	0.89
Costo Capital [k\$]	23.98	20.23
Paneles FV [kW]	9.63	10.8
Aerogenerador [kW]	1	0
Baterías [kWh]	30	30

Tabla III.- Resultados de los sistemas de microrredes Eólico/FV y FV

4. Conclusiones. - Este estudio presentó el modelado de dos sistemas de microrred de energías renovables en el software HOMER Pro: uno híbrido, eólico/fotovoltaico (Eólico/FV) y otro únicamente fotovoltaico (FV), como solución práctica para la electrificación de zonas rurales de la provincia del Azuay, Ecuador. En cada escenario se evalúa el alcance del proyecto en términos de producción, almacenamiento y coste de inversión del proyecto. Los resultados revelan un NPC de 0.06 M\$ y un COE de 1.18 \$/kWh para la configuración de microrred Eólico/FV, un NPC de 0.04 k\$ y un COE de 0.89 \$/kWh para la configuración de microrred FV. Por lo tanto, en términos de coste, el sistema de microrred más conveniente será el de configuración de microrred FV.

Al tratarse de proyectos de energías renovables, están limitados a las condiciones meteorológicas del lugar y las mismas pueden variar dependiendo de la época del año, lo que provoca variaciones en la generación, por lo que se consideró optar por un almacenamiento en baterías para almacenar la energía disponible y que esté lista para su empleabilidad. Se utilizó el software HOMER Pro para ajustar los sistemas, creando escenarios de modos de funcionamiento que analizan la producción y el almacenamiento de energía. A la hora de evaluar este tipo de proyectos, se analiza que tanto capital se necesita (y que tanto tiempo también) para integrar una carga pequeña a una red de distribución tradicional, depende del punto más cercano disponible y viable técnicamente para la conexión. Hay otros factores en juego, que no son considerados aquí pero que también son importantes como, por ejemplo: La tarifa de energía eléctrica que se le reconoce al distribuidor y la calidad de servicio técnico y de producto técnico que le aplica en la región. El balance de estos factores hace inviable la alimentación desde una red convencional, en función de la cercanía/lejanía del punto de conexión viable más cercano de la red. Por último, las microrredes se adaptan con facilidad a distintos entornos geográficos, facilitando el despacho de energía a las comunidades rurales de la provincia del Azuay.

5. Referencias

- [1] M. S. R. Molina, D. X. O. Ochoa and F. A. Q. Palomeque, "Comparative analysis of wind and solar micro-generation for an Off Grid system in the city of Cuenca-Ecuador," 2021 IEEE URUCON, 2021, pp. 122-126, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647295.
- [2] ARCONEL. *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019*, 2019.
- [3] D. Ochoa and M. Ronquillo, "Análisis y reacondicionamiento del sistema de generación híbrido (eólico-fotovoltaico) aislado de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca" 2021. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21283>.
- [4] J. Clairand, H. Chinchero-Villacís, X. Serrano-Guerrero and A. Gonzalez-Zumba, "Microgrids as Electrification Alternatives for the Amazon Region in Ecuador," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4286-4291, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881594.
- [5] C. Anzures, J. Posada, K. Osorio, J. R. Vidal Medina, V. M. Sanchez and Y. U. Lopez, "Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Interconectadas de Colombia," 2018 IEEE ANDESCON, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564585.
- [6] Serrano-Guerrero, X., Ochoa-Malhaber, C., & Ortega-Romero, I. Procedure of the design of photovoltaic systems applied to ornamental lighting. (2022). *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 393-398. <https://doi.org/10.24084/repqj20.320>
- [7] R. M. Schierloh, J. L. Godoy, F. M. Vincitorio and J. R. Vega, "Simulación y Análisis de Fallas Eléctricas en una Microrred Aislada con Integración de Generación Fotovoltaica y Almacenamiento en Baterías [Not available in English]," 2021 IEEE URUCON, 2021, pp. 138-142, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647183.
- [8] C. Ochoa-Malhaber, D. Ochoa-Ochoa, X. Serrano-Guerrero and A. Barragán-Escandón, "Technical-economic comparison of microgrids for rural communities in the island region of Galapagos, Ecuador: Isabela Island case," 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939813.
- [9] "Proyecto Eólico Minas de Huascachaca (PEMH)" 2022. <https://www.elecaustro.gob.ec/proyectos/proyecto-eolico-minas-de-huascachaca/> (accessed May. 10, 2022).
- [10] P. D. Robles Lovato, *Optimización y planificación de sistemas eléctricos*. Cuenca, 2020.

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

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

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

SOO 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.

Asynchronous Register Less NULL Convention Logic (RL-NCL) Pipeline Architectures Using Basic Gates

*Arquiteturas Pipeline Assíncronas Register Less NULL
Convention Logic (RL-NCL) Usando Puertas Básicas*

*Arquiteturas de Pipeline Assíncronas Register Less NULL
Convention Logic (RL-NCL) Usando Portas Básicas*

Gabriel C. Duarte ¹, Duarte L. Oliveira ²

Recibido: Mayo 2022

Aceptado: Octubre 2022

Summary. - Asynchronous circuits is an alternative to design digital systems that is becoming the interest of many researchers in the digital design area mainly due to its low-power consumption and robustness. One of the most compelling design paradigms of asynchronous circuits is the NULL Convention Logic (NCL). The pipeline is a very common technique used in digital circuits to achieve high throughput. Although one can implement a pipeline using NCL gates, recent works have shown that register-less pipelines are possible using modified NCL gates. In this paper we propose two new Register-Less NCL (RL-NCL) pipeline architectures and two new methods to design NCL gates, which can be implemented even in Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) or using the standard cells method. The new design of the proposed architecture was able to achieve an average area reduction of 27,32%, an average latency reduction of 14,1% and an average throughput increase of 5,54% comparing with the conventional NCL pipeline architecture.

Keywords: Asynchronous Circuits; NCL; RL-NCL; FPGA; Pipeline.

Resumen. - Los circuitos asíncronos son una alternativa para el diseño de sistemas digitales que se está convirtiendo en el interés de muchos investigadores en el área del diseño digital debido principalmente a su bajo consumo y robustez. Uno de los paradigmas de diseño más convincentes de los circuitos asíncronos es la NULL Convention Logic (NCL). La pipeline es una técnica muy común utilizada en circuitos digitales para lograr un alto rendimiento. Aunque se puede implementar una pipeline utilizando puertas NCL, trabajos recientes han demostrado que las pipelines sin registro son posibles utilizando puertas NCL modificadas. En este artículo, propusimos dos nuevas arquitecturas de pipeline Register-Less NCL (RL-NCL) y un paradigma de diseño, que pueden implementarse incluso en Field Programmable Gate Arrays (FPGA) o utilizando el método de celdas estándar. El nuevo diseño de la arquitectura propuesta logró una reducción media del área del 27,32%, una reducción media de la latencia del 14,1% y un aumento medio del rendimiento del 5,54% en comparación con la arquitectura de pipeline NCL convencional.

¹ Ingeniero, Division of Electronic Engineering, Aeronautical Technological Institute (ITA), castrotdga@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6739-8709>

² Ingeniero, Division of Electronic Engineering, Aeronautical Technological Institute (ITA), duarte@ita.br, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9704-6616>

Palabras clave: Circuitos Asíncronos; NCL; RL-NCL; FPGA; Pipeline

Resumo. - Circuitos assíncronos é uma alternativa para projetar sistemas digitais que vem despertando o interesse de muitos pesquisadores na área de projeto digital principalmente devido ao seu baixo consumo de energia e robustez. Um dos paradigmas de projeto mais atraentes de circuitos assíncronos é o NULL Convention Logic (NCL). O pipeline é uma técnica muito comum usada em circuitos digitais para obter alto rendimento. Embora seja possível implementar um pipeline usando portas NCL, trabalhos recentes mostraram que pipelines sem registro são possíveis usando portas NCL modificadas. Neste artigo propomos duas novas arquiteturas de pipeline NCL Register-Less (RL-NCL) e dois novos métodos para projetar portas NCL, que podem ser implementadas até mesmo em Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) ou usando o método de células padrão. O novo design da arquitetura proposta foi capaz de alcançar uma redução média de área de 27,32%, uma redução média de latência de 14,1% e um aumento médio de throughput de 5,54% em comparação com a arquitetura de pipeline NCL convencional.

Palavras-chave: Circuitos assíncronos; NCL; RL-NC; FPGA; Pipeline

1. Introduction. - This paper is an extended version of the work originally presented in the 2021 IEEE URUCON conference [1]. In this work, we added in the experimental simulations 4 circuits from a well-known benchmark, that correspond to a raise of 66,6% in the number of circuits used in the experimental validation. A new architecture is also proposed.

With the growing number of transistors being placed inside Integrated Circuits (IC) nowadays due to the reduction in the size of this component, synchronous digital systems became more difficult to design [2]. The distribution of the clock alongside the chip, the clock skew problem and the fact that the clock frequency and the power consumption are directly proportional are the main reasons that makes asynchronous digital systems an interesting alternative and why the interest for this paradigm grows today for many researchers. Of the most popular research topic nowadays we can cite artificial intelligence, machine learning and Internet of Things (IoT), in all of them low power consumption is a key challenge for the designers [3]. Cryptography is an application that already takes the advantages of asynchronous circuits. Recently, a work showed that the power consumption can be improved using the NULL Convention Logic asynchronous paradigm to implement cryptography algorithms, such as the Advanced Encryption Standard (AES) [4].

One famous technique used by digital designers to raise the throughput of circuits is the pipeline, which divides the circuit into stages with the insertion of registers to hold partial values. Asynchronous pipelines have four considerable advantages over synchronous pipelines [5]: (1) In a synchronous pipeline the clock frequency is calculated using the critical path of the circuit and all stages operates in the same rate, while in the asynchronous one, each stage operates accordingly with its own critical path, reducing the latency time. (2) Asynchronous pipelines can have a variable number of data at any time, because of this each data is processed when it's available, while in the synchronous pipeline a correct operation requires new data to arrive at predefined timed intervals. (3) Inherent flow control due to the handshake protocols used by asynchronous systems. (4) The dynamic power consumption is on demand, only when there is data to be processed. The circuit is quiescent when there is no data to be processed.

One of the most famous asynchronous paradigms is the NULL Convention Logic (NCL) framework proposed by [6]. NCL circuits are implemented using the 27 NCL gates, which consists of every Boolean function of four or fewer variables. NCL gates are also called threshold gates and have a state-holding hysteresis capability [7], meaning that once the output of the gate is set, it will be reseted only when all inputs are reseted. With NCL gates, Delay-Insensitive (DI) circuits can be implemented using dual-rail or quad-rail codes, and the design is similar to synchronous circuits. While in synchronous design the function is mapped to logic gates, in NCL circuits the function is mapped to a set of NCL gates.

The NCL paradigm also support the pipeline technique using the TH22 NCL gate to obtain the NCL registers for a dual-rail circuit, since a TH22 gate operation is identical to a C-element of 2-inputs. Figure I present the conventional NCL pipeline with three stages for a dual-rail circuit. Each stage consists of the processing block (composed of NCL gates), NCL registers to store partial values and the completeness detector (CD) circuit, which indicates when a new data is available. The acknowledge in (Ai) output indicates when a data is acknowledged by the first stage, and the acknowledge out (Ao) input tells when the output of the pipeline was acknowledged. The NCL pipeline operates in the four-phase handshake protocol.

Even though the NCL pipeline is robust and can be used in many applications, a recent work [8] have shown that a more efficient version of this architecture can be obtained, eliminating all registers used by the pipeline, reducing the area and the power consumption. This architecture is a Register-Less NCL (RL-NCL) pipeline and uses a modified version of the NCL paradigm, the Multi-Threshold NCL (MT-NCL) [9]. The MTNCL combines the Multi-Threshold CMOS (MT-CMOS) [10] and the NCL paradigm and was initially proposed by [11]. The MT-NCL gates uses the Sleep signal to keep the respective gate active or to put in sleep mode, and thus reduce the

power consumption.

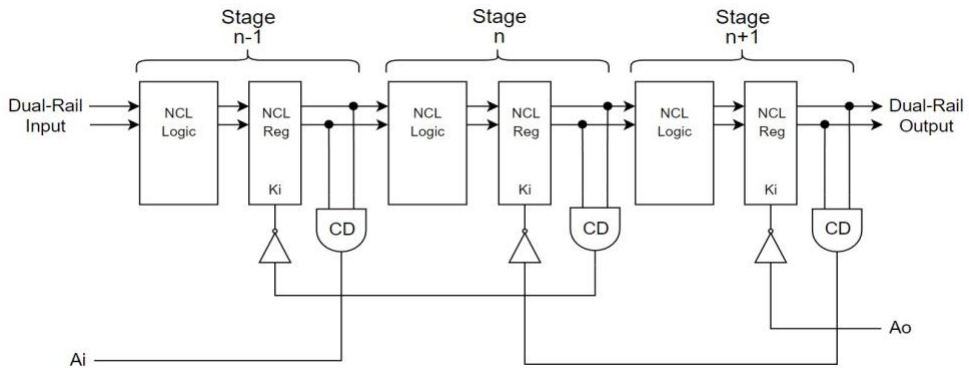


Figure 1: Conventional NCL pipeline.

By using the MT-NCL gates in the processing blocks of each stage and with only one C-element per stage, the sleep signal can be used to control each stage of the RL-NCL pipeline. The only disadvantage of this architecture is that the project is full custom. Other techniques can be used to obtain a more efficient pipeline circuit, such as using embedded registers in the NCL processing logic [7].

Many architectures and methods for the implementation of NCL gates were proposed in the literature. Although both for transistor-level and gate-level designs, transistor-level proposals and research are far more common than gate-level implementation and proposals for the NCL paradigm. This paper addresses this problem by proposing two new gate-level implementations of NCL gates with the addition of a control signal, thus allowing a gate-level implementation of two novel RL-NCL pipeline architectures. The main advantage of the proposed architectures is that it does not require a full-custom project and can be implemented in FPGAs or using the standard cells method.

The first proposed pipeline architecture is shown in Fig. II for a generic 3-stage pipeline. The control circuit is simple and uses only one gate for each stage. The method to implement NCL gates using basic gates uses the enable signal to control the operation of the stage, thus we call this method NCL-E. In the original paper [1] the logic block was inaccurately called NCLS with the control signal being called sleep, but we changed to NCL-E in this paper since the sleep signal behavior is different from the behavior of the proposed method to implement NCL gates.

Figure III shows an alternative design of the proposed RL-NCL pipeline architecture using a new method to implement NCL gates with embedded registers, which we call NCL-R. The pipeline architecture is similar to the conventional NCL pipeline, only removing the registers of each stage. It also does not require any additional circuit for the control of each stage.

The rest of the paper is organized as follows: Section II present some background in asynchronous circuits, including the NCL paradigm, the classification of asynchronous circuits regarding the delay model, the dual-rail code and handshake protocols. In Section III we present the related works regarding gate-level implementation of NCL gates. Section IV presents the first proposed new method to implement NCL gates with the addition of the enable signal and the proposed pipeline architecture presented in Fig. II, and Section V presents a new alternative design method to implement NCL gates and the pipeline architecture related to this method and presented in Fig. III. In Section VI we present the experimental implementation of both proposed architectures and the conventional NCL pipeline of the literature, then we show and discuss the simulation results. Finally, in section VII we make the conclusions about this paper.

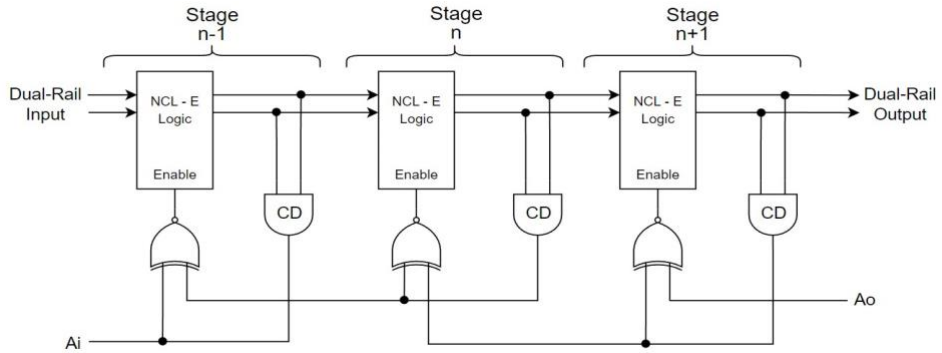


Figure II: RL-NCL pipeline architecture using the enable signal, proposed in [1].

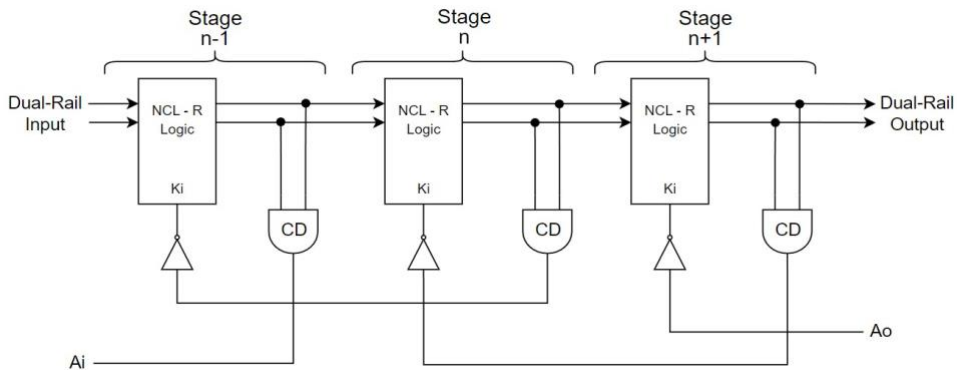


Figure III: New design: RL-NCL pipeline architecture using NCL gates with embedded registers.

2. Asynchronous Circuits Background. - Asynchronous circuits can be classified according to its delay model [12]: Bundled-Data (BD) circuits depends on defined delay values and specific timing intervals to operate correctly. If the circuit does not respect these intervals the correct operation cannot be guaranteed. To guarantee a correct operation, matching delays greater than the delays of critical paths are inserted in the circuit. Speed-Independent (SI) circuits operates correctly if the delays in the logic gates are positive, finite and arbitrary, but the delays of the wires must be zero.

Delay-Insensitive (DI) circuits operates correctly if both the delays of the gates and of the wires are positive, finite and arbitrary. Thus, DI sensitive circuits are the most robust class of asynchronous circuits. The Quasi Delay-Insensitive (QDI) is the most robust class that can be implemented for the majority of the circuits. QDI circuits also operates correctly if the delays of the gates and wires are positive, finite and arbitrary but with an additional restriction: the isochronic forks. That is, if a wire has a fork, each fork must have the same delays.

To achieve greater robustness, asynchronous circuits use DI codes, such as the dual-rail and the quad-rail. The most common code for NCL circuits design is the dual-rail, in which each bit of data is represented with two wires, the true-rail and the false-rail. A one bit data "a" can have three

values: (1) $[a1, a0] = [0,0]$: in this case both rails are zero, so "a" has a NULL value; (2) $[a1, a0] = [0,1]$: the false rail is one and the true rail is zero, in this case "a" has the logic level zero; (3) $[a1, a0] = [1,0]$: the true rail is one and the false rail is zero, thus "a" has a logic level one. Both rails cannot be one at the same time, so the transition from a valid data to another one has to be separated by a NULL value.

Asynchronous circuits can operate in the two-phase or in the four-phase protocol. In the two-phase protocol, once a data is acknowledged by the receiver a new data can be sent. This is represented by a wire transition, in both low to high or high to low. In the four-phase protocol, once a data is acknowledged by the receiver the protocol has to return to zero, and then a new data can be sent. Due to the nature of each protocol, dual-rail circuits operate naturally in the four-phase protocol. In dual-rail circuits a transition from low to high indicates that a valid data was acknowledged and a transition from high to low indicates that a NULL value was acknowledged.

3. Related Works. - In the past two decades the NCL paradigm has grown in interest of many researchers and has achieved important progress. Most of the NCL gates implementation are targeted at transistor-level implementation in CMOS technology (such as Static, Semi-Static and Differential implementations), with recent studies showing implementations in new technologies such as FinFET and carbon nanotube-FET (CNTFET). Along with that, the design flow (logic synthesis, optimization and technology mapping), testing and verification also achieved great progress [13].

Several gate-level styles for the implementation of NCL gates were proposed in the literature. As an example, let's analyze the NCL TH23 gate ($AB+AC+BC$) implemented in two proposals. The implementation of the TH23 gate in the architecture proposed in [14] is presented in Fig IV (a). The architecture uses an AND gate (gate 6) with the output feedback and the OR function of the inputs (gate 4) to obtain the hysteresis condition, so once the output is set, it can only be reseted when all inputs are zero. The output is obtained with the OR function of the NCL gate function, in this example implemented by gates 1, 2 and 3, with the output of the hysteresis circuit (gate 6).

Another method to implement NCL gates using basic gates is the Standard RS architecture, that uses a standard set-reset (RS) latch using NAND gates and is based in the static implementation of NCL gates [15]. The circuit of the TH23 NCL gate implemented using this architecture is shown in Fig IV (b). The set input of the latch (gate 5) receives the inverted NCL function, since the latch is set with a logic level zero. Gates 1, 2 and 3 implement the negated NCL function. The reset input of the latch (gate 6) receives the OR function of the inputs of the NCL gate, so the output only resets when all inputs are zero. When any of the inputs are different from zero, the latch retains the previous value. This way the hysteresis condition of NCL gates is satisfied.

Recently, two new studies analyzed the timing behavior of the architectures mentioned above and showed that both implementations are not quasi delay-insensitive (QDI), consequently they have timing restrictions [16; 17]. The papers also proposed a new architecture for the implementation of NCL gates that is QDI, thus being more robust.

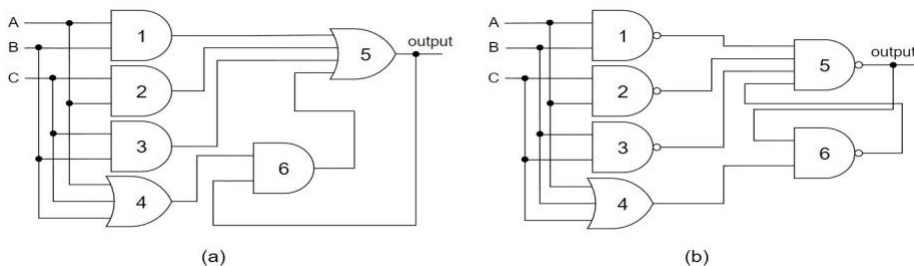


Figure IV: NCL TH23 gate using: (a) Architecture of [14] (b) Standard RS Architecture.

4. Proposed Architecture. - To achieve the proposed pipeline architecture of the Fig II, a new method to implement NCL gates is also proposed. Fig. V (a) presents the new method to implement NCL gates with the addition of the enable signal, similar to a RS latch with enable. When the enable is equal to a logic one, the latch can set or reset the output depending on the inputs of the NCL function and when the enable is equal to a logic zero, the latch keeps the previous value. The circuit used to set the output is the NCL function itself, and to reset is a NOR gate with fan-in equal to the number of inputs of the NCL gate. This way, the circuit will set the output only when the enable is a logic one and the NCL function is true and will only reset when the enable is one and all the inputs are zero. As an example, Fig. V (b) shows the NCL THxor0 gate using the proposed NCL-E method.

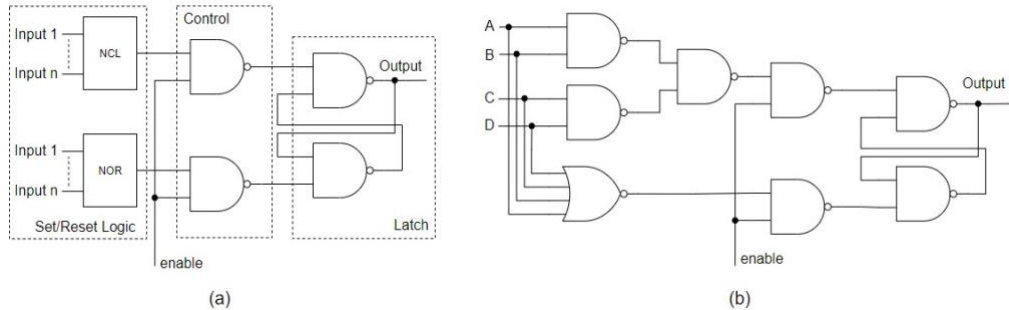


Figure V: Proposed NCL-E gate level: (a) Generic NCL-E gate (b) THxor0.

Comparing the proposed architecture with an architecture from the literature [8], besides the main difference that is the logic block implementation (MTNCL logic that is full-custom and the proposed NCL-E method that can be implemented with basic gates) the architectures are similar. Both have a circuit for detecting the completeness of data at the end of each stage and for the control, one uses a C-element and our proposal uses a XNOR gate.

The control circuit for each stage was obtained using the Burst-Mode (BM) specification [18]. Fig. VI (a) presents the BM specification for the control circuit and Fig. VI (b) shows the Karnaugh Map of the specification, which implements a XNOR gate. The signals cd and Ao are the inputs and the enable is the output that controls the NCL-E gates.

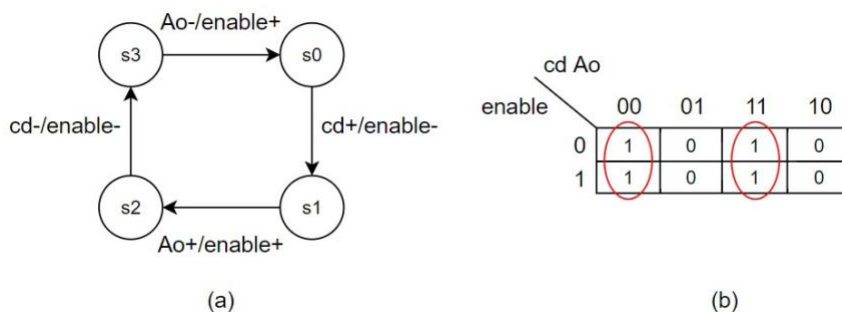


Figure VI: Control circuit: (a) BM Specification (b) Karnaugh Map.

The CD circuit can be implemented using the NCL gates TH12 and TH22, similar to the circuit used in the NCL register or with conventional OR gates and one C-element at the output. The output of the CD circuit is a logic one when all the gates have a valid value at its outputs and zero when all the gates have a NULL value.

The proposed NCL-E gates can also be used in conjunction with conventional NCL gates at the end of the stage processing block, in cases where the circuit of a stage has a higher depth of logic processing.

5. Alternative Design: A More Robust Implementation. - For the alternative pipeline architecture presented in Fig III to work correctly, a new method to implement NCL gates is also proposed, in which an additional input is used to control the behavior of the gate. This input is called K_i because it has a similar role as the K_i input of a NCL register and the main reason why we choose to call this method a NCL-R circuit is because it behaves like a NCL gate with an embedded register. The circuit used to implement the NCL gates in the proposed method is shown in Fig. VII (a) and is divided in three parts: The latch, the control block and the set/reset logic.

The latch block is a standard RS latch using NAND gates. The control block is similar to the additional circuit used to enable a RS latch with a little modification, since the enable signal and the K_i signal have different behaviors. A conventional RS latch with enable is only set or reset when the enable is a logic one. On the other hand, when the K_i signal is a logic one, it must enable the latch to set its output and block the reset condition and when the K_i signal is a logic zero, it must enable the latch to be reseted and block the set condition, thus the control block uses a NAND gate for the set signal and an OR gate for the reset signal of the latch. The set/reset logic block depends on the NCL gate to be implemented. The reset condition is obtained with one OR gate with fan-in equal to the number of inputs of the desired NCL gates, so the output of the OR gate is zero only when all inputs are zero and consequently guaranteeing the hysteresis condition of only resetting the output when all inputs are zero. The set condition is the NCL function itself.

As an example, we choose to present the NCL THxor0 gate using the proposed method. Fig. VII (b) shows the circuit of the THxor0 gate in the proposed method. The NCL block is implemented using the three NAND gates that implement the logic function $AB+CD$ of the THxor0 gate. The reset logic is the OR gate with fan-in equal to four that receives the inputs A, B, C and D. When the K_i signal is logic one it will enable the output to be set waiting on the NCL function. Once the output is set, it will only be reseted when the K_i signal is zero and all the inputs of the NCL gate are also zero. Fig VIII show a dual-rail 2-input XOR gate in the proposed NCL-R method.

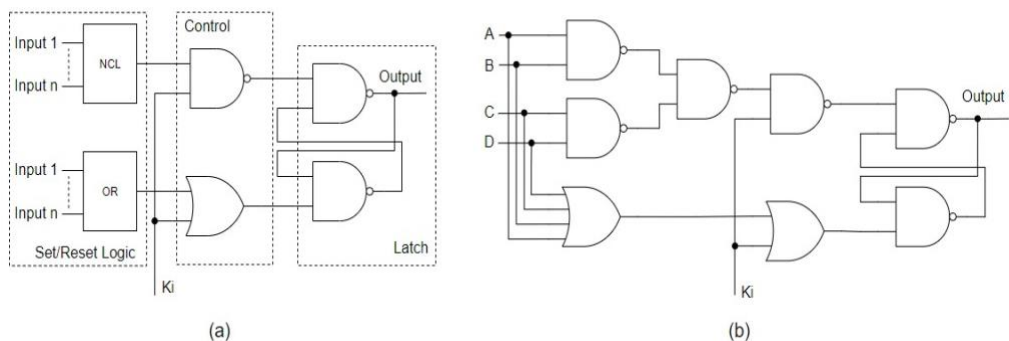


Figure VII: Proposed NCL-R gate level: (a) Generic NCL-R gate (b) THxor0.

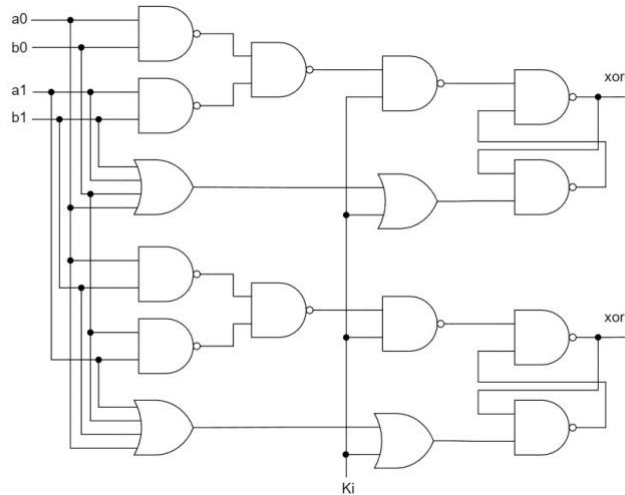


Figure VIII: Dual-rail 2-input XOR gate in the proposed NCL-R method.

6. Experimental Results and Discussion. - To validate the correct operation of the proposed method to implement the NCL gates and the new RL-NCL architectures, we implemented ten circuits in FPGA both in the proposed architectures and in the conventional NCL pipeline for performance comparison.

All the circuits were described in structural VHDL and synthesized for the Intel Cyclone IV family’s EP4CE115F29 device in the Quartus Software. This device was chosen because it’s the FPGA that is in the Altera DE2-115 development and educational board, used in many universities over the world. The post-synthesis (timing) simulations were performed in the ModelSim software. To compare the performance of each pipeline we used four parameters: (1) Latency (in nanoseconds), the time needed for a new data to cross all the stages of the pipeline and be available at the output. (2) Throughput, in million operations per seconds (MOPS). (3) Dynamic power con-

Parameter	Arch.	ALU	KSA	Mult.	Prim.	Pari.	Comp.	c17	cm82	cm152	majo.
LUTs	NCL	111	537	147	57	100	156	72	143	156	128
	NCL-E	94	475	123	41	72	112	52	103	112	92
	NCL-R	91	465	123	39	67	107	48	96	107	87
Power	NCL	1,1	3,25	1,01	0,44	0,81	1,05	0,54	0,89	1,05	0,84
	NCL-E	1,06	3,61	1,1	0,41	0,77	1,03	0,55	0,79	1,06	0,79
	NCL-R	0,95	4,65	1,23	0,64	0,79	1,31	0,52	0,88	1,22	0,94
Latency	NCL	15,67	23,13	15,63	11,99	15,93	15,59	12,29	14,83	15,42	15,2
	NCL-E	14,33	22,42	16,23	10,27	12,64	12,26	11,59	12,95	12,53	12,62
	NCL-R	14,27	21,35	13,42	10,52	13,08	13,61	8,48	13,8	13,29	12,81
Throughput	NCL	25,81	15,46	18,63	21,47	20,41	16,6	21,11	19,68	16,61	17,97
	NCL-E	23,15	16,28	20,06	22,87	20,41	18,23	22,18	20,79	17,53	18,98
	NCL-R	24,88	17,28	21,99	21,83	20,72	16,74	22,83	21,05	17,79	18,55

Table I: Simulation Results

sumption, measured in milliWatts (mW) and (4) the required area used by the circuits, in this case measured in number of LUTs. To obtain the power consumption, all the simulations performed generated the .vcd file which specifies all the transitions in the circuit and was used in the PowerPlay tool, which is integrated in the Quartus software.

We choose six common digital circuits to implement in both architectures along with four circuits obtained from the LGSynth91 benchmark [19], which is one of the ACM/SIGDA benchmarks. The six common digital circuits are: ALU, array multiplier, prime number detector, parity detector, comparator and a Kogge-Stone Adder (KSA). The four benchmark circuits are: c17, cm82a, cm152a and majority. Table I shows the obtained results of each circuit in both pipelines for each parameter mentioned above.

The proposed NCL-E architecture obtained better results in nine out of the ten circuits for the latency time, in eight out of ten for the throughput and in six out of ten for the dynamic power consumption. For the area, the proposed architecture obtained better results in all circuits. In average, the NCL-E architecture obtained a reduction of 12,5%, 1,17% and 23,98% in latency time, power consumption and number of LUTs and obtained a raise of 4,1% in throughput comparing with the NCL pipeline.

We highlight that the proposed NCL-R architecture obtained a reduction in the latency time and in area in all ten circuits, with an average reduction of 14,1% and 27,32%, respectively. The proposed architecture achieved a throughput raise in nine out of the ten circuits simulated, with an average increase of 5,54%. As a drawback, the proposed architecture consumed more dynamic power in six out of the ten circuits with an average increase of 14,2% in the dynamic power consumption. Although the proposed architecture consumed more power, the measured values were all calculated with the circuits operating at the maximum throughput, and a more detailed power consumption analysis can be made with the circuits operating at the same throughput for better comparison.

Comparing the NCL-E and the NCL-R architectures, the NCL-R architecture obtained better results in latency time, throughput and area, but as a drawback consumed more power.

7. Conclusion. - With new requirements for the design of modern circuits, systems and applications, such as low power consumption and robustness, the asynchronous paradigm is gathering more attention by the researchers and the NCL circuits is one promising design choice, being capable of even implementing pipelines without the need of using registers.

Although there have been important accomplishments and new works recently in the asynchronous circuits area due to the raising of interest for this class of circuits, most of the works are targeted to full-custom projects at the transistor level and much less at the gate-level, targeting FPGAs or the standard cells method. Along with that, there's still much work to be done in Computer-Aided Design (CAD) tools for asynchronous circuits to make it more relevant for designers.

This paper proposes two new methods to implement NCL gates using only basic gates, therefore being suitable for FPGA and standard cells implementations and not requiring a full-custom project. In each new method to implement NCL gates we introduce a control signal, enable and Ki, respectively. With the new methods to implement the NCL gates, two new RL-NCL pipeline architectures are also proposed, with of one of them being very similar to the conventional NCL pipeline and therefore working without additional control circuits for each stage. Both new pipeline architectures obtained a significant area reduction, of 23,98% and 27,32% respectively for the NCL-E and NCL-R proposals, in comparison with the conventional NCL pipeline. This was achieved due to the removal of the registers. A reduction in latency and an increase in throughput was also achieved, showing the viability and good performance of the proposed architectures. The second proposal was designed to be a robust implementation of a RL-NCL pipeline, operating exactly like the NCL pipeline.

For future works, we wish to implement the architectures in Very Large Scale Integration (VLSI) using the standard cells method, so a comparison with the other RL-NCL architecture from the literature can be obtained. Another work to be done is develop a CAD tool to help designers to obtain an automated process to synthesize circuits in the proposed RL-NCL architectures. The implementation of the architectures in other FPGA vendors, such as Xilinx and/or Lattice, for comparison between many FPGA families and technology implementations, is also another future work to be accomplished.

8. References. -

- [1] G. C. Duarte and D. L. Oliveira, "A novel asynchronous pipeline architecture with less-registers using null convention logic," in *2021 IEEE URUCON*, 2021, pp. 36–41.
- [2] B. H. Calhoun, Y. Cao, X. Li, K. Mai, L. T. Pileggi, R. A. Rutenbar, and K. L. Shepard, "Digital circuit design challenges and opportunities in the era of nanoscale cmos," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 343–365, 2008.
- [3] L. Ye, Z. Wang, Y. Liu, P. Chen, H. Li, H. Zhang, M. Wu, W. He, L. Shen, Y. Zhang, Z. Tan, Y. Wang, and R. Huang, "The challenges and emerging technologies for low-power artificial intelligence iot systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no. 12, pp. 4821–4834, 2021.
- [4] T. Le Thanh, L. T. Tri, and H. Trang, "Power consumption improvements in aes decryption based on null convention logic," *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 15, pp. 254–264, 2021.
- [5] S. M. Nowick and M. Singh, "High-performance asynchronous pipelines: An overview," *Ieee design & test of computers*, vol. 28, no. 5, pp. 8–22, 2011.
- [6] K. M. Fant and S. A. Brandt, "Null convention logic/sup tm/: a complete and consistent logic for asynchronous digital circuit synthesis," in *Proceedings of International Conference on Application Specific Systems, Architectures and Processors: ASAP '96*, 1996, pp. 261–273.
- [7] S. Smith and J. Di, *Designing Asynchronous Circuits using NULL Convention Logic (NCL)*, 2009.
- [8] M. Chang, P. Yang, and Z. Pan, "Register-less null convention logic," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 3, pp. 314–318, 2017.
- [9] L. Zhou, R. Parameswaran, F. A. Parsan, S. C. Smith, and J. Di, "Multi-threshold null convention logic (mntcl): An ultra-low power asynchronous circuit design methodology," *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 81–100, 2015.
- [10] S. Mutoh, T. Douseki, Y. Matsuya, T. Aoki, S. Shigematsu, and J. Yamada, "1-v power supply high-speed digital circuit technology with multithreshold-voltage cmos," *IEEE Journal of SolidState Circuits*, vol. 30, no. 8, pp. 847–854, 1995.
- [11] A. D. Bailey, J. Di, S. C. Smith, and H. A. Mantooth, "Ultra-low power delay-insensitive circuit design," in *2008 51st Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2008, pp. 503–506.
- [12] J. Sparso and S. Furber, *Principles of Asynchronous Circuit Design - A Systems Perspective*, 1st ed. Springer, 2001.
- [13] D. Khodosevych and A. A. Sakib, "Evolution of null convention logic based asynchronous paradigm: An overview and outlook," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78650–78666, 2022.
- [14] V. Satagopan, B. Bhaskaran, W. K. Al-Assadi, S. C. Smith, and S. Kakarla, "Dft techniques and automation for asynchronous null conventional logic circuits," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 15, no. 10, pp. 1155–1159, 2007.

- [15] F. A. Parsan and S. C. Smith, "Cmos implementation comparison of ncl gates," in *2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2012, pp. 394–397.
- [16] D. L. Oliveira, O. Verducci, L. A. Faria, and T. Curtinhas, "A novel null convention logic (ncl) gates architecture based on basic gates," in *2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2017, pp. 1–4.
- [17] D. L. Oliveira, O. Verducci, V. L. V. Torres, R. Moreno, and L. A. Faria, "Synthesis of QDI Combinational Circuits using Null Convention Logic Based on Basic Gates," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 308–317, 2018.
- [18] S. M. Nowick, "Automatic synthesis of burst-mode asynchronous controllers," Stanford, CA, USA, Tech. Rep., 1995.
- [19] S. Yang, "Logic synthesis and optimization benchmarks user guide: Version 3.0," MCNC Technical Report, Tech. Rep., Jan. 1991.

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

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

DLO 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 Gobertti.

Una nueva manera de interpretar el método de tres puntos para el modelado del terreno en dos capas horizontales

A new way to interpret the three-point method for soil modeling in two horizontal layers

Uma nova forma de interpretar o método de três pontos para modelagem de terreno em duas camadas horizontais.

Marcos Andrade ¹

Recibido: Mayo 2022

Aceptado: Octubre 2022

Resumen. - Enfrentados al diseño de la puesta a tierra de una instalación eléctrica debemos disponer de un modelo adecuado del terreno. El modelado en dos capas horizontales ha demostrado ser el más útil, práctico y preciso.

En una presentación previa [1] se propuso una nueva fórmula aproximada a ser considerada por las normas IEEE 80-2000 e IEEE 81-2012 para el modelado del terreno cuando se utilizan los métodos de medida de cuatro puntos (Wenner y Schlumberger).

En esta presentación, se utiliza un procedimiento similar para el método de tres puntos. Conduciendo así a la presentación de una nueva fórmula que relaciona los parámetros del modelo de dos capas y simplifica su cálculo a partir de la serie de medidas de campo.

Se muestra la forma de aplicación del nuevo procedimiento y las diferencias y complementos con los otros métodos. Este método, al utilizar picas durante las mediciones, consistentes con una práctica habitual durante la construcción, posee notorias ventajas respecto a los métodos de cuatro puntos. En particular en algunos tipos de terrenos, especialmente aquellos de alta resistividad superficial mientras que puede utilizarse como complementario en otras medidas excepto en aquellas a realizar en terrenos rocosos donde es difícil hincar jabalinas.

Palabras clave: Puesta a tierra; resistividad; método de tres puntos; Wenner; Schlumberger Palmer

Summary. - Faced with the design of the grounding of an electrical installation, we must have an adequate model of the terrain. Modeling in two horizontal layers has proven to be the most useful, practical and accurate.

In a previous presentation [1] a new approximate formula was proposed to be considered in IEEE 80-2000 and IEEE 81-2012 standards for terrain modeling when four-point measurement methods (Wenner or Schlumberger) were used.

In this presentation, a similar procedure is used for the three-point method. It leads to the presentation of a new formula that relates the parameters of the two-layer model and simplifies their calculation from the series of field measurements.

The form of application of the new procedure and the differences and complements with the other methods are shown. This method, by using rods during the measurements, is consistent with a common construction practice. This has notable advantages over the four-point methods in some

¹ Ingeniero Electricista. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR (Uruguay) IEEE Life Senior Member, mandrade@ieee.org, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5646-921X>

types of terrain, especially those with high surface resistivity; while it can be used as a complement in other measurements except in those to be carried out on rocky terrain where it is difficult to drive rods.

Keywords: Grounding; resistivity; three-point method; Wenner; Schlumberger Palmer

Resumo. - Diante do projeto de aterramento de uma instalação elétrica, devemos ter um modelo adequado do terreno. A modelagem em duas camadas horizontais provou ser a mais útil, prática e precisa.

Em uma apresentação anterior [1] foi proposta uma nova fórmula aproximada a ser considerada pelos padrões IEEE 80-2000 e IEEE 81-2012 para modelagem de terreno quando se utilizam métodos de medição de quatro pontos (Wenner e Schlumberger).

Nesta apresentação, um procedimento semelhante é usado para o método de três pontos. Levando assim à apresentação de uma nova fórmula que relaciona os parâmetros do modelo de duas camadas e simplifica o seu cálculo a partir da série de medições de campo.

A forma de aplicação do novo procedimento e as diferenças e complementações com os demais métodos são mostradas. Este método, por usar estacas durante as medições, de acordo com a prática comum durante a construção, tem vantagens marcantes sobre os métodos de quatro pontos. Particularmente em alguns tipos de terreno, especialmente aqueles com alta resistividade superficial, embora possa ser usado como complemento de outras medições, exceto aquelas a serem realizadas em terrenos rochosos onde é difícil afundar dardos.

Palavras-chave: Posto na Terra; resistividade; método de três pontos; Wenner; Schlumberger Palmer.

1. Introducción. - Puesta a tierra es un término que resulta casi sinónimo de seguridad y aunque estas instalaciones cumplen otras funciones en la red, su destino prioritario es ese. Desde pequeñas instalaciones en viviendas hasta complejos mallados interconectados en subestaciones de alta y extra alta tensión, consisten, en definitiva, en conductores de todo tipo enterrados directamente, o a través de un componente facilitador, en el suelo. De modo que conocer y modelar adecuadamente el terreno donde se realizará la instalación es prioritario. También lo es cuando se pretende medir el resultado de las tensiones máximas a las que llega la instalación durante una falta en la red, que pueden ir desde décimas hasta decenas de miles de Volt.

Los métodos de cuatro puntos, Wenner [2] y Palmer [3], han sido tratados en una publicación reciente [1] y los resultados obtenidos se extienden en esta presentación a los métodos de tres puntos, en particular al método de enterrado de jabalina. Lo analizado en la publicación anterior [1] se incluye en el punto 3 del presente trabajo.

Cuando se utilice el término resistencia se hará referencia a resistencia de puesta a tierra, salvo que se realice una aclaración específica.

Los métodos de medida de resistividad del terreno más utilizados son los de cuatro puntos y se han desarrollado desde los principios de la exploración geológica de terrenos a través de métodos eléctricos. El esquema más utilizado es el de Wenner. La configuración de Palmer-Schlumberger se utiliza en menor grado.

Aunque el terreno es mucho más complejo que solo dos capas, por razones de practicidad, este es el modelo más utilizado. Se trata de dos capas horizontales que representan el conjunto del terreno. Debe tenerse en cuenta que la resistividad no es algo constante, que varía de manera considerable con la humedad y que esto afecta de manera diversa a las diferentes capas. Que también influyen la temperatura y el contenido de sales, así como el tratamiento que pueda efectuarse para obtener el resultado deseado. El modelo de dos capas será suficiente para lograr un sistema de puesta a tierra seguro. Nos dice la norma IEEE 81 [4], repitiendo una expresión de Tagg: “El mejor modelo a utilizar depende del propósito de las mediciones. A menudo, un modelo terrestre de dos capas da excelentes resultados”.

A continuación, se resumen los métodos más utilizados:

1.1. Método de tres puntos. - El método consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo del cual se conozca la expresión de la resistencia en función de la resistividad del terreno y de su geometría. El electrodo universalmente utilizado es la pica o jabalina, por lo que este método podría llamarse también: método de enterrado de jabalina. Otros electrodos, por ejemplo, un conductor enterrado horizontalmente, podría también ser utilizado, aunque carece de interés debido a las dificultades de su ejecución. Sin embargo, de existir al comienzo del estudio un electrodo de esas características bien puede ser utilizado para una medida inicial de resistividad.

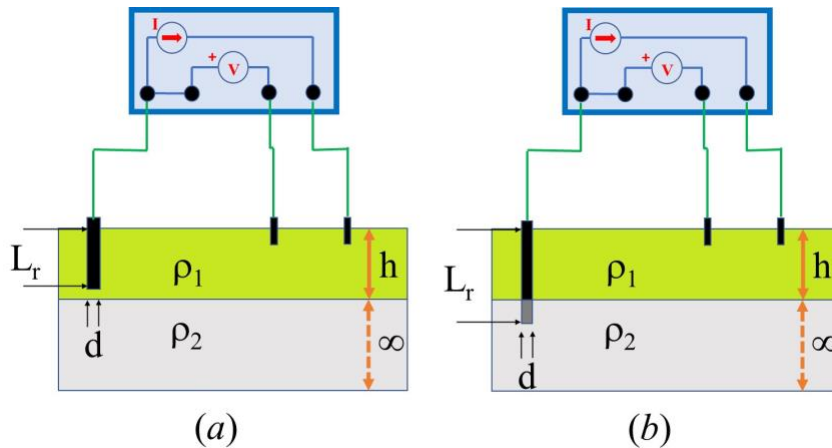


Figura 1 Método de enterrado de jabalina a) $L_r < h$, b) $L_r > h$

En el método que se analiza se va hincando una jabalina y a medida que crece la longitud de enterrado se van realizando medidas de resistencia, figura I. En un terreno homogéneo la resistividad puede calcularse a partir de la medida de resistencia R . Para una jabalina de diámetro d enterrada una longitud L_r , desde la superficie del terreno, mediante la expresión (1) [5].

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \tag{1}$$

La expresión (2) [5], es también muy utilizada; los resultados obtenidos son similares.

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{4L_r}{d}\right)} \tag{2}$$

Si el terreno no puede considerarse homogéneo, el valor calculado de resistividad ρ_a se denomina resistividad aparente y sería la resistividad que tendría un terreno homogéneo en el cual se hubiera realizado esa única medida. En estas condiciones para cada longitud de enterrado L_r , tendremos un valor diferente de la resistividad aparente, por lo que obtendremos una serie de medidas del tipo

$$\rho_a = \phi(L_r) \tag{3}$$

Si pretendemos modelar el terreno como de dos capas horizontales tendremos una expresión de la forma (4), figura II

$$\rho_a = \phi(L_r, d, \rho_1, \rho_2, h) \tag{4}$$

Las variables ρ_1 , ρ_2 , h corresponden a las resistividades de ambas capas respectivamente y a la profundidad de la primera capa; la segunda capa se considera de profundidad infinita. Utilizando cálculos numéricos se puede determinar el valor de la resistencia de la jabalina, a partir de tres valores ρ_1 , ρ_2 , h [6] y obtener la curva que mejor se aproxima al conjunto de valores medidos utilizando, por ejemplo, el método de mínimos cuadrados. En este caso buscaremos expresiones simples a través de las cuales se obtengan los mismos resultados.

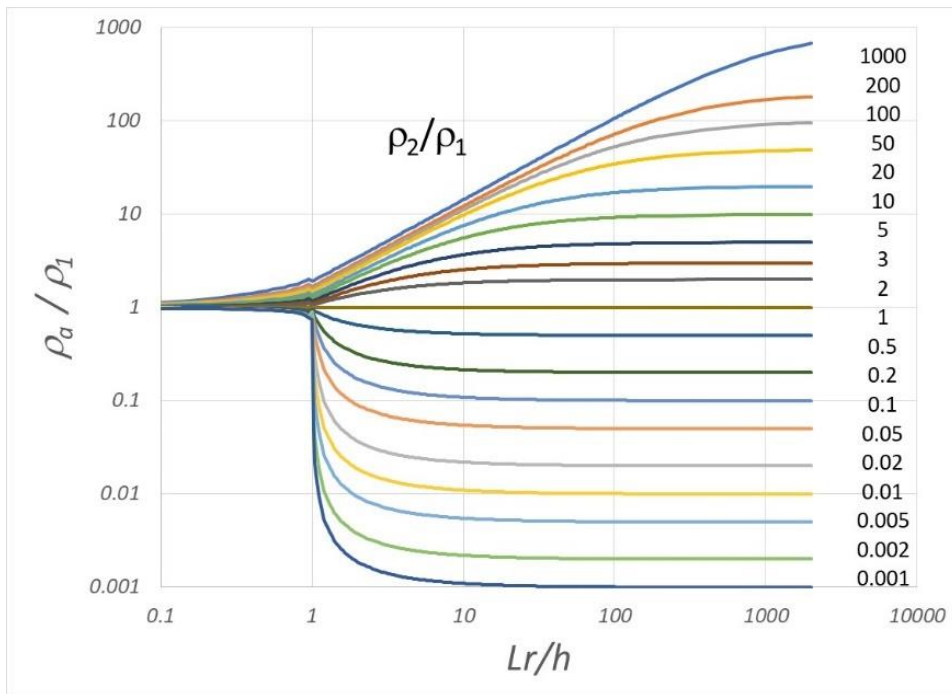


Figura II - resistividad aparente, método de enterrado de jabalina.

Para este análisis se utiliza un gráfico que represente en ordenadas la resistividad aparente, para una resistividad superficial de 1 Ωm, (ρ_a/ρ_1) y en abscisas el cociente entre la profundidad de enterrado de la jabalina y la profundidad de la primera capa (L_r/h). Las curvas son paramétricas en el cociente de la resistividad de la capa más profunda sobre la primera capa (ρ_2/ρ_1). Este gráfico se representa en la figura II y será utilizado solamente para el análisis de la situación. No se trata este de un método gráfico.

Existen varias expresiones para determinar la resistencia de una jabalina en un medio constituido por dos capas horizontales. La norma IEEE 81 [4] en su apéndice A incluye una expresión debida a Tagg [7] que se utiliza solamente para jabalinas enterradas en la parte superior del terreno ecuación (5), o en ambas capas, ecuación (6).

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln \left(\frac{nh+L_r}{nh-L_r} \right) \right], \quad L_r < h \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L_r} \left(\frac{1+K}{1-K+\frac{2Kh}{L_r}} \right) \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left(\frac{2nh+L_r}{(2n-2)h+L_r} \right) \right], \quad L_r > h \quad (6)$$

Donde K es el coeficiente de reflexión (7). Estas expresiones aparecen también en los trabajos de Caldecott y otros [8].

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (7)$$

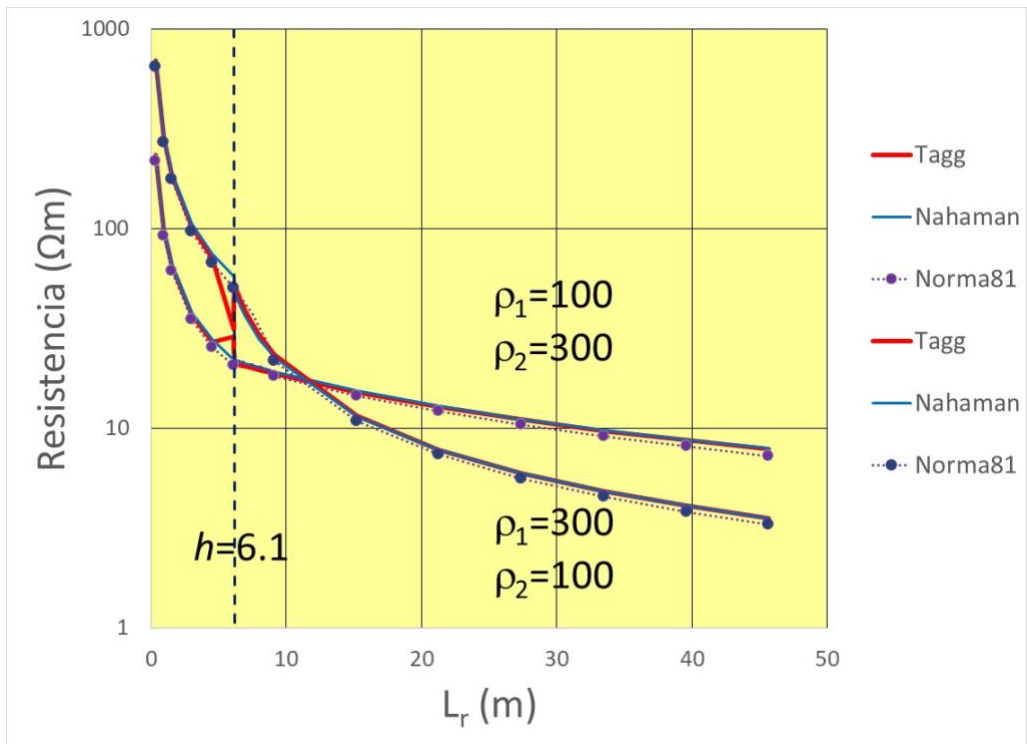


Figura III -Comparación de curvas de cálculo

Otras aproximaciones han sido sugeridas por Nahman y Salamon [9] que validaron utilizando cálculo numérico y que a su vez hemos vuelto a revisar utilizando nuestro software de cálculo [6]. Para la jabalina enterrada solo en la capa superior distinguen dos casos

Si $\rho_1 > \rho_2$ utilizan la expresión (8) para el cálculo de R y si $\rho_1 < \rho_2$ utilizan (9)

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L_r} \ln\left(\frac{4L_r}{d}\right) \quad , \quad \rho_1 > \rho_2 \quad (8)$$

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L_r} \ln\left(\frac{4L_r}{d}\right) + \frac{\rho_1}{2\pi h} \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \quad , \quad \rho_1 < \rho_2 \quad (9)$$

En el caso en que la jabalina abarca ambas capas

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi L_e} \ln\left(\frac{4L_e}{d}\right) \quad (10)$$

Dónde:

$$L_e = L_2 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h \quad , \quad L_r = L_2 + h \quad (11)$$

En las gráficas representadas en la figura III se puede apreciar una comparación de los valores de resistencia obtenidos por tres métodos: cálculo exacto, que corresponde a los datos del ejemplo de la norma IEEE81 y los calculados según las aproximaciones indicadas previamente según las expresiones de Tagg y Nahman.

Puede observarse que salvo para valores de Lr/h igual o próximos a uno, donde la dispersión es mayor, los valores son prácticamente coincidentes y la concordancia es mejor para valores de $\rho_2 < \rho_1$ que son los casos de mayor uso del método.

1.2. Métodos de cuatro puntos – Wenner. - Los métodos de cuatro puntos se basan en la utilización de cuatro electrodos iguales. Se utilizan dos electrodos para la inyección de corriente al terreno y otros dos para la medida de tensión. Estos cuatro puntos pueden ubicarse en diferentes posiciones entre sí, pero siempre alejados de otros conductores existentes, enterrados, que puedan falsear la medida.

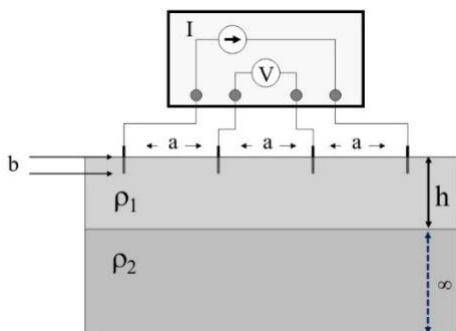


Figura IV.- método de Wenner

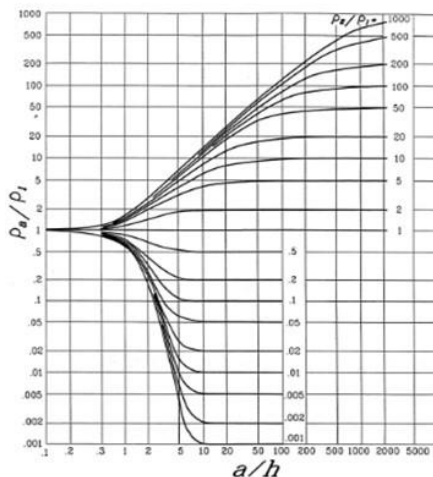


Figura V.- Curvas de Sunde (tomada de la norma IEEE 80)

Los métodos que vamos a considerar en este artículo utilizan los cuatro electrodos alineados. En el método de Wenner [2] se conectan cuatro electrodos auxiliares alineados, y separados entre ellos la misma distancia a como se representa en la figura IV. Se inyecta una corriente I entre los electrodos exteriores y se mide la tensión V entre los interiores. El resultado de la medida es el cociente V/I . El valor de la resistividad aparente se calculará a partir de (12)

$$\rho_{ai} = 2\pi a_i R_i \tag{12}$$

Se admite que la profundidad a la que se van enterrando las cuatro jabalinas b , es mucho menor que la separación entre los electrodos a .

Para el caso en estudio el problema consiste en encontrar los dos valores de resistividad y la profundidad de la primera capa a partir de la curva de valores obtenidos de las medidas en campo. Los procedimientos sugeridos por las normas IEEE 80 [5] e IEEE 81 [4] se discuten a continuación.

• **Recomendaciones de la norma IEEE80 - Wenner**

La norma IEEE 80 nos da una guía para obtener los valores que modelan el terreno utilizando un método gráfico y refieren a la norma IEEE81 para el caso de cálculos numéricos. De los varios métodos gráficos disponibles desarrolla el realizado por Sunde [8]. Las gráficas de este autor, incluidas en la norma mencionada se muestran en la figura V.

Los pasos que indica la norma para estimar los parámetros serían los siguientes:

- Graficar la serie de valores medidos por el método de Wenner: resistividad aparente en función de la separación de los electrodos auxiliares a

- Estimar ρ_1 para el valor más pequeño de a
- Estimar ρ_2 para los valores mayores de a . Extendiendo la curva en el sentido de obtener valores asintóticos.
- Con el valor de ρ_2/ρ_1 seleccionar una curva del gráfico o elegir la que más aproxime al valor obtenido. Si los valores medidos no son suficientes probar con la coincidencia de las curvas. Eventualmente interpolar y dibujar una nueva curva.
- Ajustar con ésta la curva medida y obtener el valor de ρ_a/ρ_1 del eje de ordenadas. Obtener a/h .
- De la serie de valores medidos obtener a y calcular h .

Se trata de un trabajo laborioso que conduce normalmente a resultados adecuados. La norma incluye un ejemplo.

• **Recomendaciones de la norma IEEE81 - Wenner**

La norma en su apéndice A incluye las expresiones de cálculo obtenidas utilizando el método de imágenes [4]. Se consideran las sucesivas reflexiones de los puntos emisores de corriente sobre las dos discontinuidades que aparecen, la que responde a la superficie del terreno y la que comprende al plano que limita las dos capas horizontales.

La figura VI muestra las primeras imágenes de la serie de reflexiones generada por uno de los electrodos de corriente. Estas ecuaciones conducen a un cálculo exacto para ese modelo.

El coeficiente de reflexión K se ha definido en (7)

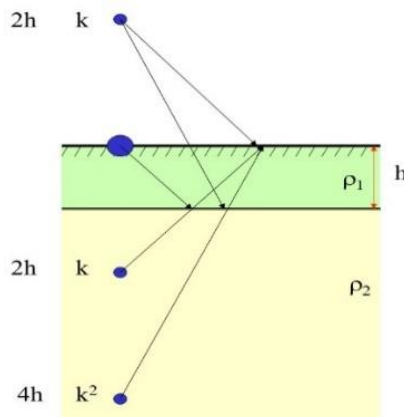


Figura VI. - Esquema del método de imágenes.

La serie para el cálculo toma la forma indicada en (13)

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1+(2nh/a)^2}} + \frac{K^n}{\sqrt{4+(2nh/a)^2}} \right) \right] \quad (13)$$

En el apéndice B la norma incluye como material informativo un criterio de iteración para el cálculo.

En el cuerpo de la norma se agregan varios consejos válidos para el análisis de las curvas que refieren fundamentalmente a intentar obtener a través de la forma del gráfico ideas acerca de la conformación de las capas del terreno y de su posible ubicación. Utiliza en particular algunos conocidos consejos, no demasiado generales como ubicar la zona de discontinuidad a los dos tercios de la separación de los electrodos de medida para los cuales se produce el punto de inflexión de la curva.

Incluye, por ejemplo, cinco axiomas de Zohdy [9] como una guía práctica para comprobar la consistencia de las curvas medidas, así como comentarios de otros autores.

En síntesis, comenta que los valores calculados de las resistividades aparentes son siempre positivos. A medida que la resistividad real aumenta o disminuye con la profundidad, las resistividades aparentes también aumentan o disminuyen con la mayor separación de los electrodos de prueba. El máximo cambio en los valores de la resistividad aparente ocurre a una separación de los electrodos mayor que la profundidad de la primera capa. La amplitud de la curva es siempre menor o igual que la amplitud de la resistividad real versus la profundidad.

1.3. Métodos de cuatro puntos – Palmer Schlumberger. - Es el otro de los métodos de cuatro puntos utilizado, forma parte de una gran cantidad de variaciones en la geometría de las medidas. En este método los electrodos continúan alineados, siendo la distancia entre los electrodos centrales diferente de la de los extremos, figura VII. Si bien hay dos variables posibles, es usual que la distancia entre los electrodos centrales permanezca constante para el conjunto de medidas. Es la disposición más utilizada en estudios geológicos. En general se toma la distancia entre los electrodos centrales igual a un metro. Esta configuración hace que solo se deban mover los electrodos extremos durante la medida, permaneciendo los centrales fijos. Dado que para la misma corriente inyectada al terreno la tensión a medir es menor que en el método de Wenner se necesita mejor sensibilidad del instrumento a utilizar.

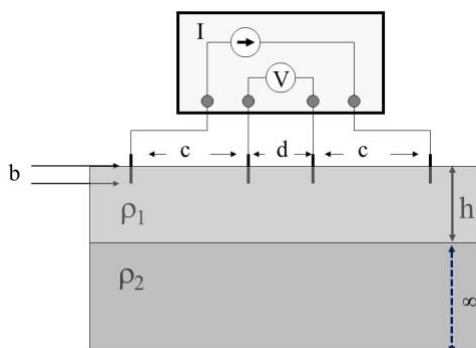


Figura VI Método de Palmer Schlumberger

Por el contrario, utilizando instrumentos convencionales, podría recurrirse a este método utilizando una mayor separación en los electrodos centrales que en los extremos, lo que aumenta la tensión a medir. Esto ocurre principalmente si se necesita realizar medidas en zonas de resistividad muy baja o medir a grandes valores de c .

La ecuación (14) indica la forma aproximada de cálculo de la resistividad aparente para esta disposición, puede observarse que se obtendrá una serie de valores formados por pares (c_i, ρ_{ai})

$$\rho_{ai} = \frac{\pi c_i (c_i + d) R_i}{d} \quad (14)$$

No hay en las normas que analizamos comentarios respecto a las curvas obtenidas por este método. Se verá en nuestro análisis que son muy similares a las obtenidas utilizando Wenner.

Sirviéndonos nuevamente del método de imágenes puede calcularse la resistencia a medir en un terreno de dos capas horizontales: ecuación (15). Esta nos permitirá realizar un conjunto de curvas similares a las de Sunde pero en lugar de derivarse del método de Wenner, basándose en el método de Schlumberger Palmer.

$$R_{Sch} = \frac{\rho_1}{\pi} \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{c+d} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2K_R^n}{\sqrt{c^2+(2nh)^2}} - \frac{2K_R^n}{\sqrt{(c+d)^2+(2nh)^2}} \right) \right) \quad (15)$$

1.4. Recomendaciones de la propuesta presentada. - En La propuesta presentada en [1] no se necesita realizar ningún tipo de estimación sobre la forma de la curva. Se procede a determinar los valores de ρ_1 y ρ_2 de acuerdo a lo indicado en la norma IEEE 80 y el valor de h se determina utilizando la nueva ecuación que se indicará más adelante.

Dependiendo del método empleado se utilizarán diferentes ecuaciones, si se realizaron las mediciones utilizando el método de Wenner la ecuación será (20) si se utilizó el método de Palmer con la relación de parámetros indicada más adelante ($d/c=4$) se utilizará (23).

Para el método de enterrado de jabalina la ecuación será (17).

Las nuevas ecuaciones hacen que el esfuerzo de cálculo se vea notoriamente disminuido. Aún en el caso en que se utilice un procedimiento iterativo los valores hallados servirán como un excelente conjunto de valores iniciales. Debe recordarse siempre que el terreno puede no responder estrictamente a un modelo de dos capas, en cuyo caso el punto de comienzo de las iteraciones se hace muy importante para lograr obtener una convergencia acertada.

2. Cálculo propuesto para el método de tres puntos. - El procedimiento empleado para la deducción de una ecuación que conecta los tres parámetros que definen el modelo de dos capas, a saber: ρ_1 , ρ_2 , y h , vinculándolo con la serie de medidas realizadas en campo aplicada al método de tres puntos es enteramente similar al empleado para el método de Wenner. Sucede que gráficamente es bastante más simple de apreciar en ese caso debido a la simetría de las curvas, como puede observarse en la figura XIV del punto 3.1 (compáresele por ejemplo con la figura IX). Donde no es intuitivo que tal relación exista por lo que repetir el procedimiento anterior e intentar obtener una expresión similar para el método de enterrado de jabalina fue sencillamente una aplicación sui generis del anterior. Adicionalmente en este caso, los valores hallados dependerán del diámetro d de la jabalina.

Si importa destacar que el intento valía la pena, ya que la existencia de una relación simple entre los tres parámetros a determinar: ρ_1 , ρ_2 , y h , facilitaría enormemente los cálculos para determinar los parámetros, como veremos a continuación. En el gráfico de la figura II se representó la resistividad aparente sobre la resistividad de la capa superior ρ_a/ρ_1 en función del largo de la jabalina sobre la profundidad de la primera capa L/h , las curvas están parametrizadas con ρ_2/ρ_1 . Las expresiones de Nahman son suficientemente aproximadas y simples, razón por la cual han sido utilizadas para trazar las curvas de la figura. Reiteramos que el procedimiento es similar al empleado anteriormente [1], ver 3.1.

Ahí se puede observar con más detalle el método empleado para obtener las ecuaciones, que consiste en trazar el lugar de los puntos correspondientes al conjunto de gráficos para los cuales la resistividad aparente coincide con la media de las resistividades de las dos capas.

En cada curva parametrizada en ρ_2/ρ_1 se halla el punto que corresponde a una resistividad aparente igual a $\rho_a/\rho_1 = (\rho_1 + \rho_2) / 2\rho_1$. Estos puntos se muestran por la línea de puntos rojos indicada en la figura VIII para un diámetro de jabalina de 0.01 m.

El lugar de estos puntos responde a la ecuación

$$\frac{\rho_m}{\rho_1} = 0.54 \frac{L_m}{h} \quad (16)$$

Dónde $\rho_m = (\rho_1 + \rho_2) / 2$ y L_m es el largo de la jabalina para el cual se obtiene una resistividad aparente de un valor igual a ρ_m . De (16) obtenemos el valor de h , (17)

$$h = \frac{L_m}{0.926 + 0.926 \frac{\rho_2}{\rho_1}} \tag{17}$$

Comparadas con los dos ejemplos de la norma IEEE 81 la ecuación presenta en el primer caso una desviación de 6% y en el segundo de 7%.

Si bien la curva trazada en la figura VIII ha sido realizada utilizando las expresiones aproximadas de Nahman, los valores empleados para obtener la ecuación (16) han sido calculados a partir del software a los efectos de obtener valores más precisos. Sin embargo, la misma curva obtenida a partir de las expresiones aproximadas no difiere demasiado.

Esta ecuación permite hallar la profundidad de la primera capa, h , de manera simple conociendo ambos valores de resistividad.

Para terrenos en que la capa inferior es más conductora, que son los casos en que realmente interesa que en el proyecto las jabalinas tengan un largo suficiente para penetrar la segunda capa, ocurre un cambio de pendiente importante cuando se accede a la capa inferior.

Una curva ejemplo se ha dibujado en la figura IX, mostrando los valores que toma la resistividad aparente en función del largo de la jabalina que se ha enterrado. Los límites para L_r pequeño y para L_r muy largo corresponden a las resistividades ρ_1 y ρ_2 respectivamente. Para valores de $\rho_2/\rho_1 < 1$, que corresponde al caso de la figura, el punto de resistividad media se sitúa para una longitud de la jabalina poco mayor que la profundidad de enterrado $L_r/h \approx 1$. Las líneas corresponden a las dos aproximaciones indicadas más arriba (1,1).

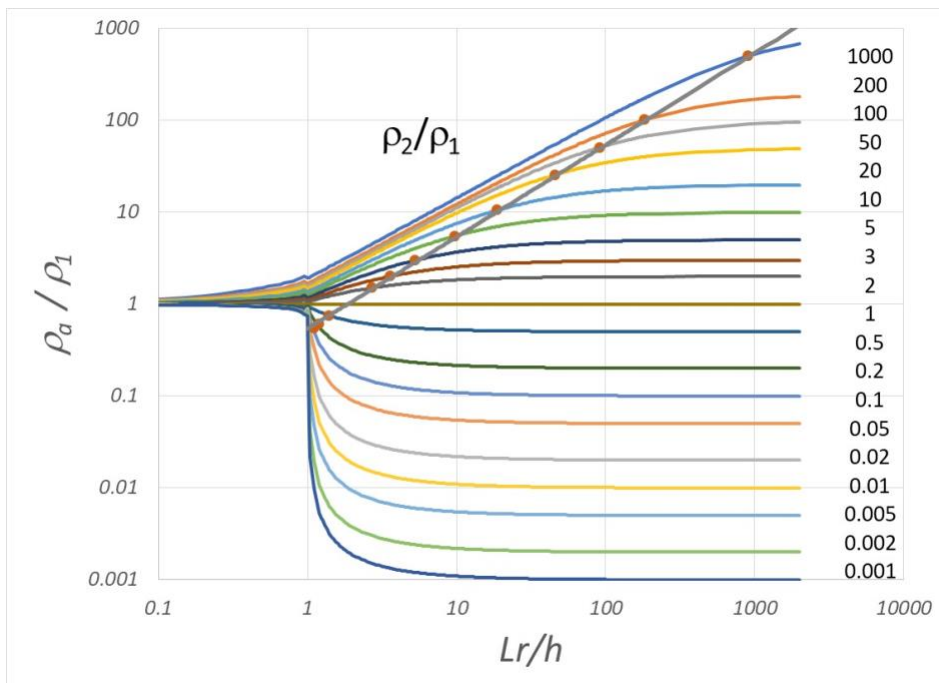


Figura VII Lugar geométrico de los puntos para los cuales $\rho_a = \rho_m = (\rho_1 + \rho_2) / 2$. Método de enterrado de jabalina.

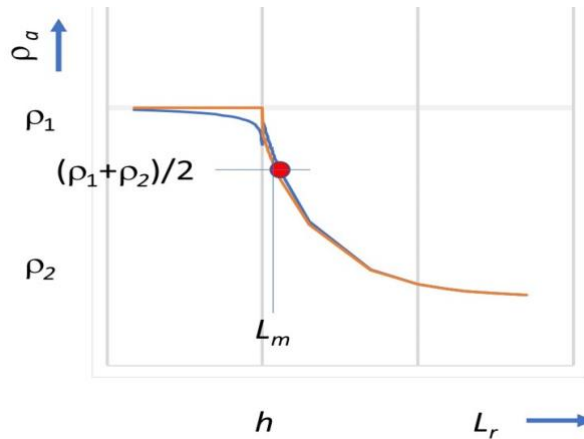


Figura VIII Gráfica semilogarítmica de resistividad aparente en un suelo de dos capas horizontales.

2.1. Procedimiento para la determinación de los parámetros del modelo. -

El primer caso corresponde a la situación considerada en las normas IEEE 80 y 81 cuando la serie de valores medidos es suficiente para estimar el límite asintótico.

- a) Se realiza un gráfico de resistividad aparente ρ_a en función del largo de enterrado de la jabalina L_r .
- b) Se obtiene el valor de ρ_1 para los valores menores de L_r (puede ser de ayuda un gráfico semilogarítmico).
- c) Se obtiene el valor de ρ_2 como asíntota para los valores mayores de L_r .
- d) Se calcula ρ_m , promedio de las dos resistividades ρ_1 y ρ_2 .
- e) Del gráfico se obtiene el valor de L_m para el largo de la jabalina que corresponde a ρ_m .
- f) De la expresión 17 se obtiene h . Representación figura X con puntos de la tabla II de la norma IEEE 81.

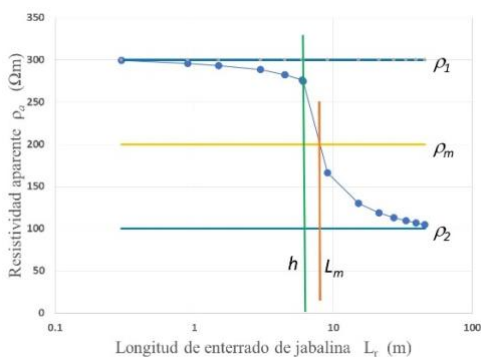


Figura IX.- Procedimiento para el primer caso

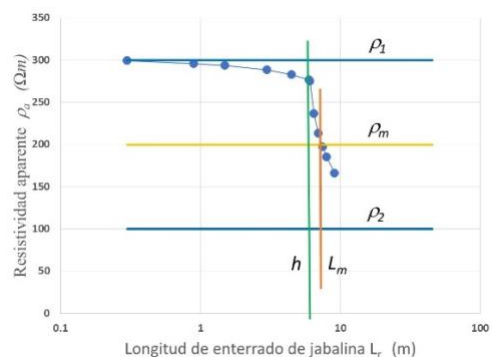


Figura X.- Procedimiento para el segundo caso. Se agregan a los valores de la norma puntos calculados en las cercanías de $L_r=h$ mientras que no se consideran valores grandes de L_r .

En el caso de que solo sea posible obtener unos pocos valores de resistividad aparente para valores de L_r mayores que h y no sea posible determinar la resistividad de la capa inferior puede procederse

de manera inversa, es decir obtener h de las medidas y calcular ρ_2 . Se realizan varias medidas para detectar el cambio abrupto de la resistividad aparente cuando se penetra la segunda capa y determinar primero el valor de h . El procedimiento es el siguiente:

- a) Se obtiene el valor de ρ_1 para los valores menores de L_r (puede ser de ayuda un gráfico semilogarítmico).
- b) Se determina h aproximando el punto de cambio de pendiente
- c) Dado que no se conoce ρ_2 y por lo tanto ni ρ_m ni L_m no se puede aplicar 17 de manera directa. Por lo tanto será necesario un simple proceso iterativo, como sigue:
 - a. Se toma un valor inicial de ρ_2 y se calcula ρ_m
 - b. De la gráfica se obtiene L_m
 - c. Utilizando la expresión 17 se determina ρ_2
 - d. Se continúa hasta que el valor de ρ_2 calculado coincida con el valor inicial

Al tratarse de identificar una variable a través de una simple ecuación, el número de iteraciones es muy limitado.

La figura XI indica el procedimiento. Se han agregado, a los datos de la tabla 2 de la norma IEEE 81, valores calculados por métodos numéricos para largos de jabalina próximos a h .

2.2. Consideraciones prácticas. - Las mediciones realizadas en el campo, por años se han ejecutado de la siguiente forma: se utilizaron varillas de hierro redondo de construcción, la unión entre tramos se realizó por soldadura a tope y pulido de la superficie circundante.

El método de enterrado de jabalina también adolece de limitaciones prácticas:

- Puede realizarse solamente en determinados tipos de terrenos
- La profundidad máxima de enterrado es limitada
- Debe cuidarse el contacto entre la jabalina y el terreno a lo largo de toda su extensión

El método de enterrado de jabalina tiene el inconveniente de que es dificultoso enterrar una jabalina a una profundidad varias veces superior que h , para lograr medir valores de resistividad próximos a los de la capa inferior. En ese caso, si se realizan medidas suficientemente próximas como para poder determinar el valor de h , y se llega a una profundidad L_r que supere el correspondiente a la resistividad media, entonces el procedimiento permitirá determinar la resistividad de la segunda capa. Es necesario con este procedimiento, como con cualquier otro realizar los cálculos y gráficos mientras se realizan las medidas. Situación que con los medios disponibles hoy día es muy sencilla. También existe la posibilidad de utilizar este método complementando un método de cuatro puntos y determinar de esta forma la resistividad de la capa inferior.

2.3. Ejemplos de aplicación

Ejemplo 1: A fines de la década del 80 se construyó una subestación 150-110/15 kV en la planta industrial de EFICE, situada alrededor de un kilómetro del Río de la Plata, sobre la desembocadura del Santa Lucía, una zona con una capa superficial de arena muy importante. Previamente se habían intentado realizar algunas medidas utilizando el método de Wenner. Se empleó en consecuencia el método de enterrado de jabalina con buenos resultados.

En su momento se empleó un software de cálculo y se halló un modelo de terreno en dos capas. Los valores encontrados fueron:

$$\rho_1=3500 \Omega\text{m}, \rho_2=35 \Omega\text{m}, h=2.7 \text{ m}$$

Si se aplica la ecuación (17) se obtiene $h=2.14\text{m}$. Lo que significa una aproximación

perfectamente razonable.

L_r m	R medida Ω	resistividad aparente ρ_a
2	1620	3045.43
3	107	284.47
3.8	30	97.77
4.2	25	88.83
5.4	12.8	56.56
6	10.5	50.86
6.6	9	47.37
7	8.5	47.10
7.8	6.6	40.20

Tabla I - medidas de resistividad $\rho_a(L_r)$

La figura XII nos muestra un gráfico de resistividad aparente calculado para los valores de resistividad de cada capa indicados y para diferentes valores de h . Esto se compara con los puntos medidos.

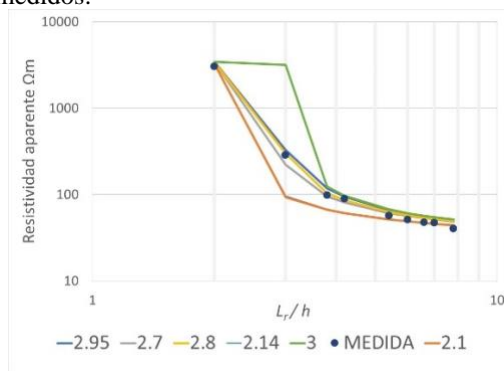


Figura XI - Comparación de curvas de resistividad aparente

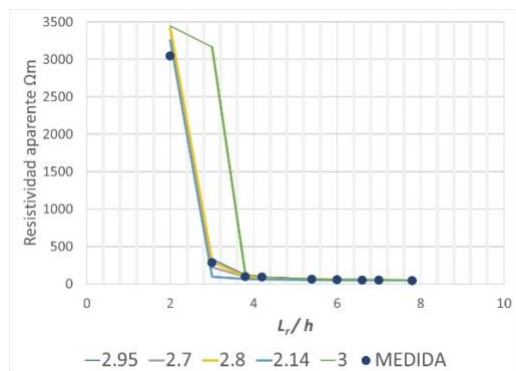


Figura XII - Gráfico de la figura XII con escala lineal

En la figura XIII se repite el gráfico con escalas lineales de los ejes. Es muy claro que el cambio de pendiente ocurre antes del punto $h=3$. Sin embargo, la falta de medidas hace que no se pueda conocer con más precisión el cambio abrupto de la pendiente.

También puede observarse en la figura XII que si bien la mejor aproximación por mínimos cuadrados corresponde a un ajuste de los primeros puntos (cuyo peso es mayor), el gráfico para el valor de h hallado a través de la ecuación (17) aproxima mejor los puntos medidos para los largos mayores de la jabalina.

Ejemplo: Si se utiliza este método para los dos ejemplos de la norma IEEE 81 documentados en la tabla II se hallan los valores de h como 6.3 y 6.6 respecto al valor indicado de 6.1 para los casos de $\rho_1=300$, $\rho_2=100$ y para $\rho_1=100$, $\rho_2=300 \Omega\text{m}$, lo que significa una muy buena aproximación.

3. Cálculo propuesto para el método de cuatro puntos - Wenner. - Se refiere esencialmente a la publicación anterior [1], cuyo trabajo se ha complementado en esta obra. Las modificaciones son menores, pero se adaptan mejor al contenido presentado en esta publicación.

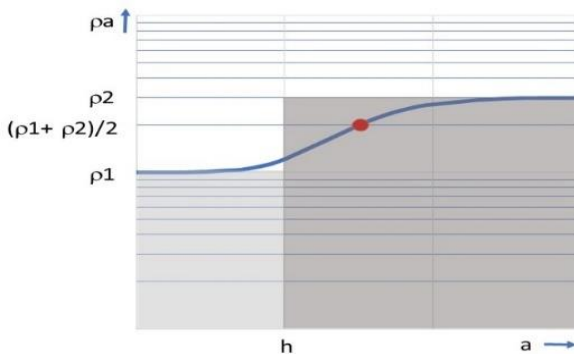


Figura XIII - Gráfica de resistividad aparente en un suelo de dos capas horizontales.

3.1. Ecuación simplificada para el método de Wenner. - En la figura XIII se pueden observar con claridad las propiedades del modelo de terreno que estamos manejando: la curva de resistividad aparente, en ningún punto coincide con el valor de resistividad que presenta el terreno a diversas profundidades, con excepción de las asíntotas naturalmente. Sin embargo, hay un punto que presenta una posición particular en la curva, es aquel cuya resistividad aparente coincide con el valor medio de las resistividades de las dos capas. Esto es consecuencia de su dependencia de la constitución del terreno y no de los puntos de medida. Del modelo del terreno podríamos decir con mayor precisión. Con este análisis trazamos el lugar geométrico de todos los puntos cuyo valor de resistividad aparente coincide con el valor medio de la resistividad de ambas capas, para todas las curvas, parametrizadas en ρ_2/ρ_1 .

La curva responderá a una relación entre ρ_a , ρ_1 , ρ_2 , a y h como la indicada en la ecuación (18)

$$\frac{\rho_m}{\rho_1} = \frac{\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}}{\rho_1} = F\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{a}{h}\right) \tag{18}$$

Entonces buscamos una curva que satisfaga que el valor de la resistividad aparente iguale al valor medio de las resistividades de ambas capas. El lugar de los puntos así definidos es mostrado en la figura XIII mediante puntos de color rojo indicados sobre los gráficos de Sunde.

La ecuación de la curva así definida se indica en (19).

De esta forma, una vez estimados los dos valores de resistividad, y obtenido de la curva de resistividades medidas el valor de a que responde al valor medio de las resistividades, la ecuación (20) nos da de forma directa el valor de h , profundidad de la primera de las dos capas del terreno.

$$\frac{\rho_m}{\rho_1} = -0.54 + 0.78 \frac{a(\rho_m)}{h} \tag{19}$$

Donde $a(\rho_m)$ es el valor de a para el cual la resistividad aparente medida es ρ_m

$$h = \frac{a(\rho_m)}{1.33 + 0.64 \frac{\rho_2}{\rho_1}} \tag{20}$$

Comparadas con los ejemplos de la norma IEEE 81 la ecuación presenta en el primer caso una desviación de 0.06% y en el segundo de 2.46%.

Con respecto al ejemplo de la norma 80, aunque no se conocen con exactitud los valores de cálculo, sino que solo se dispone de un gráfico, el error aproximado es de 4.4%.

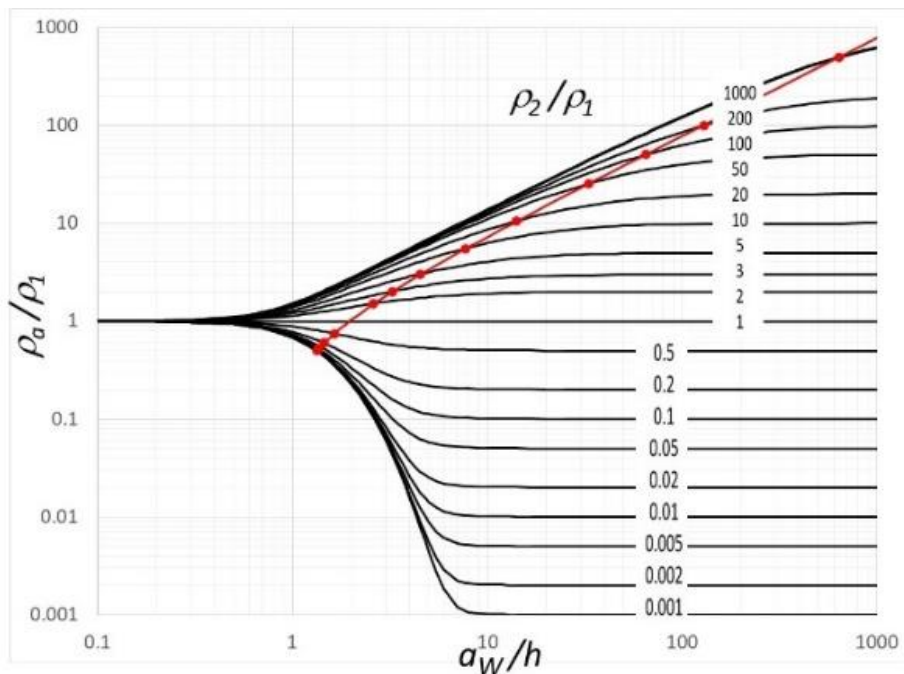


Figura XV – Método de Wenner, lugar geométrico de los puntos para los cuales $\rho_a = (\rho_1 + \rho_2)/2$. a_W es la separación de electrodos para el método de Wenner, a los efectos de diferenciarla en los gráficos de a_P , separación equivalente para el método de Palmer.

3.2. Ecuación simplificada para el método de Palmer-Schlumberger. -El mismo procedimiento permite obtener una curva similar para mediciones realizadas utilizando el método de Schlumberger.

El conjunto de curvas de la figura XIII se representa para estas medidas en la figura XIV y la ecuación resultante es la 22, para mediciones realizadas con un valor de c/d constante e igual a cuatro. Para trabajar de un modo equivalente al usado con el método de Wenner, los gráficos se calculan en función de un valor de separación de los electrodos correspondiente a un tercio de la separación entre los electrodos externos:

$$a_P = (2c + d)/3 \tag{21}$$

$$\frac{\rho_m}{\rho_1} = -0.57 + 0.531 \frac{a_P(\rho_m)}{h} \tag{22}$$

$$h = \frac{a_P(\rho_m)}{2.02 + 0.94 \frac{\rho_2}{\rho_1}} \tag{23}$$

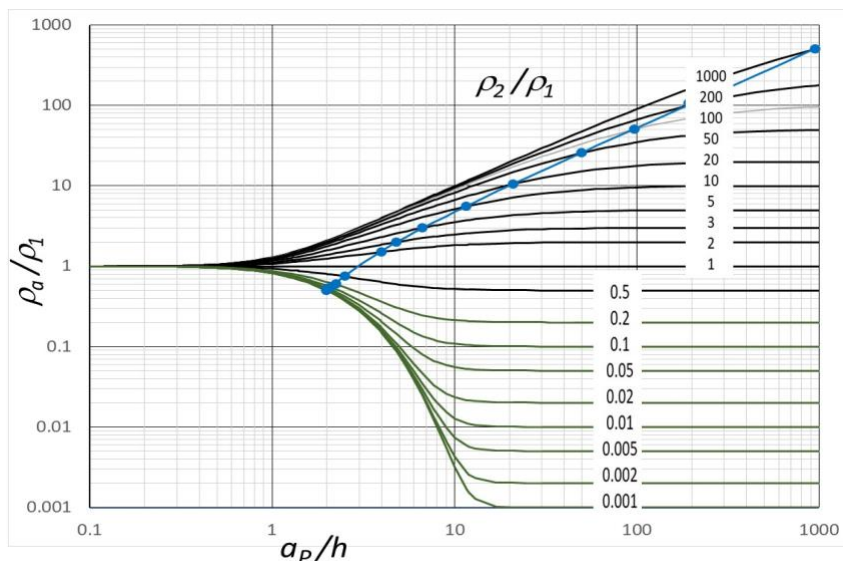


Figura XIV - Método de Palmer, lugar geométrico de los puntos para los cuales: $\rho_a = (\rho_1 + \rho_2) / 2$

4. Conclusiones. - Se ha presentado una nueva ecuación simple que permite calcular la profundidad de la capa superior para el modelo de terreno de dos capas horizontales cuando la serie de medidas se realiza utilizando el método de enterrado de jabalina (método de tres puntos).

Se ha detallado el procedimiento para aplicación de esta nueva expresión, particularmente interesante debido a las dificultades intrínsecas del método.

Esta ecuación se ha comparado con los resultados obtenidos a través de publicaciones de las normas IEEE vigentes mostrando una muy buena aproximación. También se ha comparada con modelos realizados a partir de medidas de campo.

Si bien este procedimiento es preciso, para el caso en que se utilicen métodos numéricos a los efectos de mejorar la precisión del cálculo, los valores hallados pueden constituirse en inmejorables valores como punto de partida de la serie de iteraciones a ejecutar, que es siempre de difícil convergencia.

Esta ecuación es una extensión de las presentadas anteriormente para los métodos de medida de resistividad de cuatro puntos, Wenner y Schlumberger-Palmer. En ese caso se ha sugerido [1] que la ecuación presentada para el método de Wenner (20) sea incluida en la norma IEEE 80 reemplazando el método gráfico como forma de determinar h . Esta sugerencia se extiende ahora para la ecuación (17) para medidas utilizando el método de tres puntos en la norma IEEE 81.

Se entiende que el procedimiento que se han simplificado tanto a través de la presentación de la nueva ecuación (17) y que se detalla en 2.1 podría ser incluido como parte de las normas IEEE 80 y 81 cuando se realice una nueva revisión.

5. Referencias

- [1] Andrade M T; *UN NUEVO MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MODELADO DEL TERRENO EN DOS CAPAS HORIZONTALES*, 2021, IEEE – URUCON – Montevideo, Uruguay, pp. 476-480.
- [2] Wenner F; *A METHOD OF MEASURING EARTH RESISTIVITY*. U S Bulletin of the Bureau of Standards \vol.12 Washington, July 15, 1915
- [3] Palmer, L. S., *EXAMPLES OF GEOELECTRIC SURVEYS*, IEE, paper No 2791 Dec. 1958.
- [4] IEEE Std 81™-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System.
- [5] IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986) IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- [6] Andrade M T; *Cálculo de potenciales en mallas de tierra*, CIER, SDEE, Viña del Mar, Chile, 1987. Revista de Ingeniería Nro 2, 1989.
- [7] Tagg, G. F., *Earth Resistances*. London: Georges Newnes Limited, 1964.
- [8] Caldecott, Kasten, Minkara, *INVESTIGATION OF SOIL RESISTIVITY MEASURING TECHNIQUES USING AN ELECTROLYTIC TANK*. IEEE Transaction PAS- 103. October 1984.
- [9] Nahman J, Salamon D; *A PRACTICAL METHOD FOR THE INTERPRETATION OF EARTH RESISTIVITY DATA OBTAINED FROM DRIVEN ROD TESTS*. IEEE TPWD October 1988.
- [10] Sunde, E. D.; *Earth conduction effects in transmission systems*, New York: McMillan, 1968.
- [11] Zohdy, Adel A. R.; *A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves*, Geophysics, vol. 54, no. 2, pp. 245-253, Feb. 1989.

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

MA 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.

La presión atmosférica y los protagonistas del cambio de percepción

Atmospheric pressure and the protagonist of the perception change

A pressão atmosférica e os protagonistas da mudança de percepção

Ronnie Torres Hugues¹, Yudeimys Ymas Dávila²

Recibido: Junio 2022

Aceptado: Julio 2022

Resumen. - El presente trabajo expone un capítulo dentro de la historia de la ciencia en el que se mencionan las personalidades científicas involucradas, y se describen las relaciones y escenarios en los cuales tuvo lugar la evolución de varios aspectos vinculados con la presión atmosférica. Se muestran las principales concepciones acerca del vacío desde la Antigua Grecia. Además, se refleja la situación práctica que dio lugar al cuestionamiento de los preceptos establecidos, así como, los experimentos realizados que dieron lugar a las concepciones actuales acerca del peso del aire, la presión atmosférica y el vacío. Se aprecia también los métodos científicos que más influencia tuvieron en cada etapa. Por último, se concluye cómo el trabajo colectivo y continuado ha sido clave para el avance científico.

Palabras clave: barómetro; peso del aire; presión atmosférica; vacío.

Summary. - *The present work exposes a chapter within the history of science in which the scientific personalities involved are mentioned, and the relationships and scenarios in which the evolution of various aspects related to atmospheric pressure took place are described. The main conceptions about the void from Ancient Greece are shown. In addition, the practical situation that gave rise to the questioning of the established precepts is reflected, as well as the experiments carried out that gave rise to the current conceptions about the weight of air, atmospheric pressure and vacuum. The scientific methods that had the most influence at each stage are also appreciated. Finally, it is concluded how collective and continuous work has been key to scientific progress.*

Keywords: barometer; air weight; atmospheric pressure; vacuum.

Resumo. - *O presente trabalho expõe um capítulo da história da ciência no qual são mencionadas as personalidades científicas envolvidas, e são descritas as relações e cenários em que ocorreu a evolução de vários aspectos relacionados à pressão atmosférica. São apresentadas as principais concepções sobre o vácuo na Grécia Antiga. Além disso, é refletida a situação prática que deu origem ao questionamento dos preceitos estabelecidos, bem como os experimentos realizados que deram origem às concepções atuais sobre o peso do ar, pressão atmosférica e vácuo. Os métodos científicos que tiveram mais influência em cada etapa também são apreciados. Por fim, conclui-se como o trabalho coletivo e contínuo tem sido fundamental para o progresso*

¹ Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción (Cuba), torresymas79@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7206-6346>

² Magister en Ciencias. Departamento BIOSAVE, Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez (Cuba), ymastorres79@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0899-3241>

científico.

Palavras-chave: *barômetro; peso do ar; pressão atmosférica; vazio.*

1. Introducción. - Motivado por lo educativo y trascendental del estudio de la historia en la rama de la Hidráulica, específicamente en la Hidrostática, donde unos de los primeros conceptos que se aborda es el de la presión atmosférica mencionando, en el mejor de los casos, a alguna figura clave, el objetivo del presente trabajo es relacionar de forma cronológica el papel que jugaron varios hombres de ciencia en la evolución de la concepción de las propiedades del aire y el vacío a través de la experimentación científica.

Cuando se aborda el tema inmediatamente se menciona el barómetro de Torricelli, y a este como el primero en crear uno en el siglo XVII. Además, en algunos textos se menciona a Galileo Galilei como su maestro y con el que entró en contradicción respecto a determinadas propiedades del aire y a Blaise Pascal como continuador de la obra. Por tanto, se ha dejado a un lado sucesos y personalidades también protagonistas, no estableciendo en toda su magnitud el significado histórico y científico que ha tenido el descubrimiento de la presión atmosférica en la concepción del mundo circundante y en ocasiones se ha distorsionado el relato, como es expuesto por Hidalgo 2018 [1].

Cuestiones relacionadas con el ¿por qué? ¿cómo? y ¿a qué hubo que enfrentarse? quedan limitadas a materiales sobre historia de la ciencia. Los libros dirigidos a la enseñanza que dejen de tratar el espíritu científico, la colaboración y el coraje de los involucrados permiten que se escape una gran oportunidad de exaltar importantes cualidades humanas necesarias para los futuros profesionales. En este sentido, Hidalgo 2021, trabaja la formación de valores en la Enseñanza Media en Brasil a partir de relacionar estos aspectos en el tema abordado en este trabajo [2].

El descubrimiento del peso del aire, la presión atmosférica y el vacío es uno de aquellos en los que se rompe con concepciones bien arraigadas en el mundo científico y religioso, dominante en Europa del siglo XVII, por lo que su presentación pública inicialmente fue cuestionada, criticada y mal juzgada. Solo a base de ímpetu es que la verdad relució por encima de las falsas ideas.

El trabajo presenta tres momentos fundamentales: desde la Antigüedad hasta 1630, en donde se exponen las concepciones iniciales a partir de la observación como método científico; desde 1630 hasta 1644, donde surge el conflicto entre lo establecido y el resultado práctico de un caso concreto y; por último, desde 1644 hasta 1654, en el que basado en la experimentación se obtienen los fundamentos que son empleados en la actualidad.

2. Galileo Galilei, el horror al vacío y las bombas hidráulicas. - En la antigüedad no se concebía que el aire tuviera peso. Se consideraba como un elemento que, por su naturaleza, tendía a elevarse. En tal sentido, en Grecia sobre el siglo IV a.C. se manejaban dos teorías: la atomista, de Demócrito, que consideraba que la materia estaba compuesta por pequeñas partículas indivisibles: los átomos, que se movían en un espacio vacío y que con su distinto ordenamiento daban lugar a los distintos estados físicos y la plenista, de Aristóteles, que excluía la noción de vacío exponiendo que la naturaleza no tolera la ausencia de aire, o sea, no se concebía un espacio sin materia, más conocida como horror vacui (horror al vacío) [3, 4].

Este último afirmaba que el aire tenía cuerpo, pero no peso, y para demostrar su punto, pesó una vejiga vacía y luego llena de aire exhibiendo que no había diferencia [5], ya que para él cuando un cuerpo se mueve le cede su lugar a otro [6]. Esta perspectiva daba respuestas a fenómenos comunes como el accionamiento de un fuelle para avivar el fuego en las forjas y la absorción de líquidos por un absorbente, entre otros, ya que la tendencia de la naturaleza sería la de llenar los espacios vacíos. Por su parte, desde el punto de vista de la religión católica, el vacío no podía existir, puesto que

Dios no puede actuar en la nada y es, por naturaleza, omnipresente [7]. Por todo esto, la teoría plenista resultó ser la dominante durante más de 1800 años. El término también se ha aplicado en el arte. Aunque durante todo este tiempo se mantuvo la reflexión y la discusión por algunos pensadores como Lucrecio, Herón de Alejandría, Avicena, Jean Buridan, Giordano Bruno, Francis Bacon y René Descartes, entre otros, unos a favor y otros en contra de las ideas aristotélicas [6].

Este concepto fue utilizado por Galileo Galilei, a comienzos del siglo XVII, para explicar que el ascenso de los líquidos en las bombas se debía al horror al vacío que experimenta la naturaleza. Además, al ver lo que pasaba en algunos casos, añadió que este se limitaba con una fuerza equivalente al peso de 10 m de agua, y denominó a dicha altura *altezza limitatissima*. En tal sentido pensó que la columna de agua que subía por el tubo de la bomba debía acabar rompiéndose por su propio peso y esta distancia era la máxima longitud que podía alcanzar el cilindro de agua [8].

Respecto a las bombas de agua, por el año 300 a.C. y a la par del desarrollo de las máquinas gravimétricas comenzó la utilización de las bombas de desplazamiento positivo, que consisten en un pistón ajustado a un cilindro metálico con un par de lengüetas de cuero que permitían o cerraban el paso del agua según el recorrido del mismo. Al subir el pistón, el agua acompañaba el recorrido de éste llenando el espacio vacío, ver figura I. Fue inventada por Ctesibus de Alejandría, Egipto en el siglo III a.C., tomando como principio el “horror al vacío” del agua [7]. Para que funcionen deben manipularse manualmente.

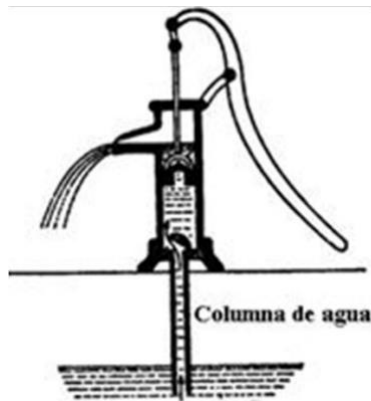


Figura I.- Interior de una bomba de desplazamiento positivo.

Este concepto ha sobrevivido durante varios siglos y era el mecanismo de las bombas usadas en Italia en la primera mitad del siglo XVII [7]. Por otra parte, la evolución de los equipos de bombeo no se detuvo.

3. Planteamiento del problema técnico y su repercusión

3.1. La problemática de Baliani. - El problema que dio origen al derrocamiento de la teoría del horror al vacío con el descubrimiento de la presión atmosférica fue una cuestión eminentemente práctica relacionada con las infraestructuras urbanas. En 1630 el ingeniero italiano Gianbattista Baliani se encontraba a cargo de la ampliación de un acueducto de Génova y, con el objetivo de elevar el agua sobre una colina de aproximadamente 20 m de altura, se construyó un sifón. Pero este no funcionaba y no se debía a problemas estructurales o accidentales. Para encontrar una

explicación a este fenómeno el jefe de obras dedicó mucho tiempo reflexionando [8]. Por eso, al no encontrar nada satisfactorio, se comunicó con Galileo, mediante correspondencia, sobre las condiciones de esta instalación y la explicación del fenómeno.

En una misiva escrita en julio de 1630 le planteaba que "... si luego de obturarlo por arriba, se abre, el agua sale por ambas partes; y si se mantiene cerrado por un lado y se abre el otro, de este último sale agua de todos modos. No puedo admitir que en esta ocasión el agua haya querido apartarse de sus propiedades naturales [...*fluir de un lado al otro en el primer caso y permanecer inmóvil en el segundo*]; por tanto, es forzoso que, al salir agua, se meta aire en la parte superior [...*interrumpiendo el fluido*]; pero no veo por dónde. Ocurre además otra cosa que me deja pasmado; a saber, que si se abre la boca A, el agua sale hasta que haya bajado desde D hasta aproximadamente la mitad, o sea hasta F, y luego se para... Quiero relatarle todo, para que Ud, con más facilidad pueda descubrir en que consiste mi error y haga el favor de avisarme" [9]. En la figura II se muestra el esquema enviado. Debe aclararse que el punto de salida es B.

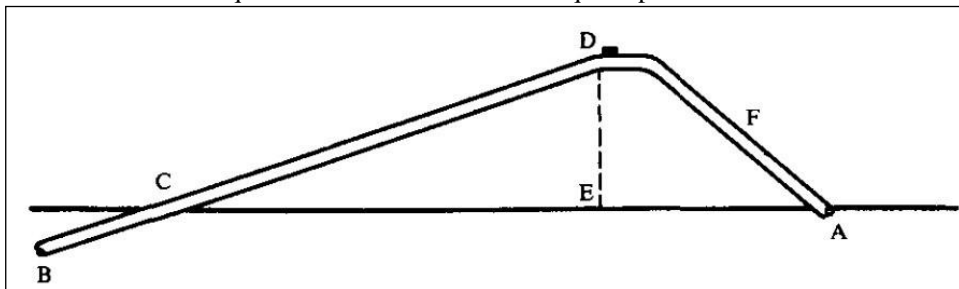


Figura II.- Esquema del sifón objeto de problema [9].

Para dar una respuesta, el sabio pisano se basó en la Fuerza del vacío, concepto al que había arribado a partir de estudios que hace tiempo realizó con fontaneros florentinos, y en los que comprobó que la extracción de agua está limitada a una columna con una altura máxima de aproximadamente de 10,5 metros [9, 1]. Por tanto, le contestó explicándole que "...Entonces, si se rompen cuerdas de cañamo y (hasta) de acero cuando tienen que aguantar un peso excesivo, ¿qué duda debe quedarnos de que también una cuerda (hecha) de agua tenga que reventarse? Más bien, esta se romperá con tanta más facilidad en cuanto las partes de agua, para separarse la una de la otra, no tienen que vencer otra fuerza sino la del vacío que resulta luego de la partición." [9, 3].

Desde esta concepción lo que se interpreta es que el vacío se resiste a formarse en la naturaleza y, para el caso del agua, esta solo puede subir dicha cantidad, porque más allá se rompe y esto no puede suceder.

El ingeniero no estaba conforme con esta explicación, ya que el agua se había separado dando paso a un vacío. Este creía que el aire empuja, mediante su peso, la masa de agua provocando que se eleve por el tubo del sifón hasta la altura de equilibrio, como un contrapeso y así se lo hizo saber al maestro [8], pero Galileo no compartía la idea que el aire pesara en el aire, ya que está en su lugar natural. En octubre de 1630 vuelve a contestar mediante una analogía estableciendo que el ser humano vive en el fondo de un océano de aire: "y así como situados en el fondo del mar los seres humanos –eliminando la necesidad de respirar– no advertiríamos el peso del agua, sobre la superficie terrestre tampoco nos es dado percibir este efecto, porque nuestro cuerpo está hecho de tal manera que soporta bien esa uniforme compresión." [9].

Así parece terminar este asunto práctico y teórico, al menos en la documentación consultada no se

hacen otras aclaraciones. El ingeniero no pudo resolver su problema (imposible con la tecnología de la época) y el físico mantuvo sus concepciones. Estas fueron plasmadas en su obra “*Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*”, de 1638 y explicadas a sus discípulos Vincenzo Viviani, Evangelista Torricelli y Peri, entre otros en el retiro de Arcetri cuando se refería al hecho de que las bombas aspirantes-impelentes, órgano hidráulico inventado por Ctesibio, no podían hacer subir el agua de los pozos a una altura superior a los 10 m. La documentación y discusiones sostenidas con Baliani fueron compartidas con Torricelli, que supo aprovechar en sus propios estudios [8].

Antes de que Baliani hablara sobre el peso del aire lo hizo el científico holandés Isaac Beeckman, que investigaba sobre la existencia del vacío en el funcionamiento de la bomba neumática. Las notas que publicó entre 1614 y 1616 señalan que le atribuía peso al aire, y que este es el causante del ascenso del agua en los sifones, en los que se hace el vacío mediante una máquina aspiradora [3, 2].

Por su parte, también en 1631 en carta escrita Rene Descartes afirmaba que el aire es pesado, se le puede comparar a un vasto manto de lana que envuelve la Tierra hasta más allá de las nubes. Ambos científicos mantuvieron una intensa y estrecha amistad [8].

3.2. El experimento con agua de Gasparo Berti. - En 1640 el italiano Gasparo Berti junto con su colega Raffaello Magiotti, que también fue discípulo de Galileo, estudiaron lo que ocurría con los sifones, tema ampliamente tratado en el material ya mencionado de Galileo, y decidieron comprobar los aspectos abordados. Por tanto, al año siguiente montaron un experimento público en la ciudad de Roma. Para ello contaron con un tubo hermético de plomo de 12 metros de longitud que instalaron en la fachada de un edificio propiedad de su familia. En la parte superior se colocó una bola de vidrio. La parte baja descansaba dentro de un recipiente con agua, ver figura III [8].

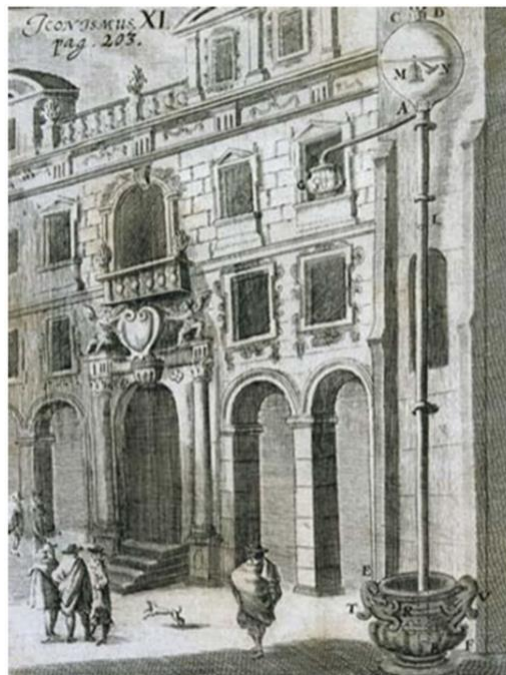


Figura III.- Ilustración del experimento de Berti en Roma [5].

El agua se introdujo inicialmente de forma simultánea por los extremos superior e inferior, luego se garantizó que solo entrara por la base, para que ascendiera y lo hizo confirmando las afirmaciones de Galileo. Este espectáculo fue interpretado de diversas maneras, partiendo de las propias creencias de los observadores. Unos apostaban con convencimiento que el tramo que se quedaba sin agua contenía aire y otros sostenían que en la tubería había solo agua y el resto era vacío [8].

En el interior de la bola de vidrio se había colocado una campanilla que se accionaba desde el exterior con la finalidad de escuchar su sonido, que fue escuchado tenuemente por los asistentes. Unos, los seguidores de Aristóteles, reafirmaron que había aire, pues se había propagado el sonido y otros sugirieron la posibilidad de que el cristal hubiese transmitido al exterior las vibraciones causadas por cualquier roce de la campana con la bola. Respecto a la altura de la columna de agua, también hubo diferencia de criterios. Unos afirmaban que se debía a la fuerza del vacío y otros al peso del aire [8].

4. Cambio de concepto

4.1. El tubo de Torricelli. - En 1643 Berti muere, pero Magiotti trataba de organizar nuevos experimentos con líquidos más pesados para disminuir la altura del tubo, contacta con Torricelli y le propone repetir el experimento. Este no pudo asistir al experimento inicial por encontrarse esos días en Arcetri acompañando al anciano y enfermo Galileo y estudiando con él.

Torricelli había tenido acceso a la correspondencia entre Baliani y su difunto maestro, lo que complementaba sus reflexiones sobre el tema [9], por lo que lo comentó por su discípulo era un excelente complemento para sus ideas.

En 1644 se le encargó a Vicenzio Viviani, que también cuidaba al sabio desde 1639, la realización de los dispositivos experimentales, que consistían en tubos de vidrio de aproximadamente un 1,17 m de longitud con un extremo cerrado y el otro abierto, que serían llenados con mercurio, 13,6 veces más denso que el agua (ver figura IV). Entre estos cabe destacar que uno tenía un gran bulbo en el extremo cerrado, con el cual se pretendía identificar si la fuerza que incide sobre la columna de líquido es interna o externa, ya que de ser interna habría mayor resistencia en que esta bajara por haber mayor volumen con relación al otro diseño [3].

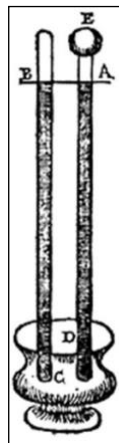


Figura IV. Esquema empleado por Torricelli para explicar su experimento [3].

En la primavera de ese año se llevan a cabo los experimentos cuyos resultados se los comunicó a su amigo Michelangelo Ricci en una carta con un esquema como el de la figura IV planteándole lo siguiente: “Hemos construido muchos tubos de vidrio como los designados con A, B, gruesos y con cuello de dos codos de largo. Llenados estos de mercurio, cerrada con un dedo su boca y volteados en una cubeta C que contenía mercurio, se veían vaciar sin que en los tubos pasara nada; porque el cuello AD quedaba siempre lleno hasta la altura de un codo y cuarto, y un dedo más. Para comprobar que el tubo en su parte superior fuese perfectamente vacío, se llenaba la cubierta inferior con agua hasta D; y levantando poco a poco el tubo, en cuanto su boca alcanzaba el agua se veía el mercurio bajar del cuello y esta llenarse con horrible ímpetu totalmente de agua hasta E.” [9, 4].

A partir de esta observación reflexionaba sobre si era el horror al vacío la verdadera causa de la detención de la columna, ya que, de ser así, donde más vacío hubiera mayor debería ser la columna de líquido, y comentaba en la misiva: “Hasta ahora se ha creído que, estando el espacio EA vacío, y sosteniéndose el mercurio, aun siendo pesadísimo, en el tramo AC, la fuerza que sostiene al mercurio en contra de su tendencia natural a caer haya sido interior al espacio AE, o sea de vacío... Pero yo pretendo que ella sea externa, que la fuerza venga de afuera. Sobre la superficie del líquido que está en la cubeta gravita la altura de cincuenta millas de aire. ¿Qué hay pues de raro si en el vidrio CE, en el cual por no haber nada el mercurio no tiene ni propensión ni repugnancia, éste entre y se levante hasta equilibrar el peso del aire exterior que lo empuja? Por su parte el agua en un tubo semejante, pero mucho más largo, subiría casi hasta dieciocho codos, o sea tanto más de lo que sube el mercurio cuanto éste es más pesado que el agua, para equilibrarse con la misma causa que los empuja a ambos”. [9].

A partir de esta correspondencia se realizó un intercambio de ideas cuestionando y aclarando varios aspectos del experimento y de la interpretación de los resultados [9]. Por tanto, así se demostró que la altura de la columna de mercurio no dependía de la altura total del tubo empleado, ni de su forma y sí de un agente externo como el aire, cuya fuerza es equilibrada con el peso de la columna de estos. Mientras más pesados o densos menor será esta altura. Más sorprendente aun resultó el hecho de la formación del vacío en el extremo superior de los tubos como fenómeno natural, contradiciendo así al conocimiento de ese momento y a la religión.

En este sentido, Pelkowski hace alusión a la situación social que envolvía a toda esta cuestión, ya que los jesuitas eran recelosos con todo que pudiera poner en peligro sus concepciones establecidas. Por lo que no podían concebir el vacío en un mundo creado por una Divinidad y conformado por esferas concéntricas. Decir lo contrario se tomaría como un acto de herejía. Por tanto, Torricelli siempre se mostró muy prudente y no tomó posición filosófica alguna [10].

Con esto se comenzaba a gestar un importante cambio de concepto, tanto científico como filosófico. En honor a lo ideado y protagonizado por Evangelista Torricelli, se nombró una unidad de presión el torr, que equivale a 1 mmHg. Por otra parte, con el tiempo se vio la utilidad de esta instalación, ahora convertida en barómetro, como instrumento para medir la variación de la presión atmosférica, y a este científico como uno de los pioneros de la Meteorología. Muchos modelos le siguieron al “tubo de Torricelli” [5], nombre que se le atribuyó durante decenas de años, pues el término barómetro aparece por primera vez en un listado del instrumental de una expedición astronómica a Madagascar, organizada por la Academia de Ciencias de París [8]. Fue a partir de 1831 cuando varios países de Europa, comenzando por Bélgica, crearon centros oficiales sobre la meteorología [11]

4.2. Blaise Pascal sube el barómetro. - Los resultados anteriores rápidamente llegaron a manos del matemático y fraile francés Marin Mersenne, importante estudioso y divulgador de la ciencia,

quien se encargó de darlos a conocer. Por eso, en 1646 se repite este experimento en París y en Ruan. En esta última participa como espectador Blaise Pascal, quien, al año siguiente, decide encaminar sus propios experimentos no sólo con mercurio, sino también con agua y vino, mostrando en público cómo la altura alcanzada por la columna líquida era inversamente proporcional a la densidad de la sustancia empleada [10].

También probó encerrando un tubo dentro de otro para comprobar que la altura de la columna de líquido sería cero en un ambiente en el que el espacio circundante estuviera vacío. Aun así, no estaba satisfecho [4] y en 1647 establece comunicación con René Descartes sobre la posible causa de los vacíos, quien le sugiere un experimento: observar la variación de la columna en la cima y al pie de una montaña [10].

Esta sugerencia derivó en una carta que le envió Pascal a su cuñado Florin Périer ese mismo año, en la misma se aprecian las reflexiones sobre el tema. Esta decía: “He ideado un experimento que bien podría darnos la luz que buscamos si pudiéramos llevarlo a cabo con precisión. Se trata de realizar el habitual experimento del vacío varias veces en el mismo día, en el mismo tubo y con el mismo mercurio, pero unas veces al pie de una montaña de al menos 500 ó 600 toesas (unos 1000 a 1200 metros) y otras en su cima, con el objeto de comprobar si la altura del mercurio suspendido en el tubo es parecida en una y otra situación o, por el contrario, difiere. Sin duda habréis advertido ya que este experimento es decisivo para la cuestión y que, si resultara que la altura del mercurio es menor en la cumbre que al pie de la montaña (conforme tengo muchas razones para creer, por más que cuantos han reflexionado sobre el problema piensen lo contrario), entonces se seguirá necesariamente que el peso y la presión del aire constituyen la única causa de la suspensión del mercurio, y no así el horror al vacío, pues es evidente que al pie de la montaña hay mucho más aire que pese que en lo alto de la misma y, sin embargo, no cabría decir que la naturaleza aborrece más al vacío abajo que en la cima.” [10].

Un año después el familiar del científico contesta con una misiva confirmando las sospechas de este, una vez realizadas las pruebas con 4 kg de mercurio en la montaña Puy-de Dôme, de unos 1000 metros de altura. En esta ocasión se comparó la medida realizada en la cima con las de la base, tomada por el padre Chastin, y hallaron una diferencia de tres líneas y media entre ambas [10]. Posteriormente, el propio científico lo repitió en la torre Saint Jacques. Se trataba de observar las variaciones de la columna de mercurio a diferentes alturas, haciendo anotaciones sobre las modificaciones de temperatura, hora, etc., y comparando 108 distintos barómetros [12].

Sus comentarios fueron concluyentes para aclarar tan polémica cuestión, ya que estableció que la presión atmosférica es la que sostiene la columna de mercurio y que esta varía con las diferentes alturas. Se demostró así que el llamado horror al vacío era solo producto del desconocimiento de los efectos de la presión atmosférica [12]. En honor a su aporte se estableció otra unidad para medir la presión el Pascal (Pa), $1\text{Pa} = 0,0075\text{ Torr}$.

Este gran científico dio una serie de reglas que lo convierten en uno de los fundadores de la ciencia experimental. Es de aclarar que también en 1647 las ideas de Pascal pasaron por una gran polémica con los jesuitas, los cuales emprendieron una guerra abierta contra este y su padre. Otro dato interesante es que los dos tratados de Pascal “*El equilibrio de los líquidos*” y “*La pesadez de la masa de aire*” serían publicados por Florin Périer en 1663, tras la muerte del autor [3].

4.3. Otto von Guericke pone a prueba la teoría. - No obstante, el concepto de presión atmosférica no empezó a extenderse hasta la demostración, en 1654, del burgomaestre e inventor Otto von Guericke quien, con sus hemisferios de Magdeburgo, cautivó al público y a personajes ilustres de la época [10].

Este alemán ideó una espectacular demostración de la inmensa fuerza que la atmósfera podía ejercer. Se agenció dos semiesferas de cobre de 50 centímetros de diámetro perfectamente ajustadas, de forma tal que al unir las se formara una esfera y una máquina para extraer el aire de su interior, inventada por el mismo (ver figura V). Para facilitar el cierre hermético de las semiesferas metálicas o hemisferios se disponía de un aro de cuero que se colocaba entre las superficies que se tocaban. Cada hemisferio disponía de varias argollas para pasar cuerdas o cadenas por ellas y así poder tirar hacia los lados opuestos. Se escogió la ciudad de Magdeburgo para esta prueba [10].

Tras extraer el aire del interior, dos escuadras de ocho caballos cada una tiraron por cada lado, y la multitud observó como por más fuerza que hicieran estos animales no pudieron separar las partes [10].

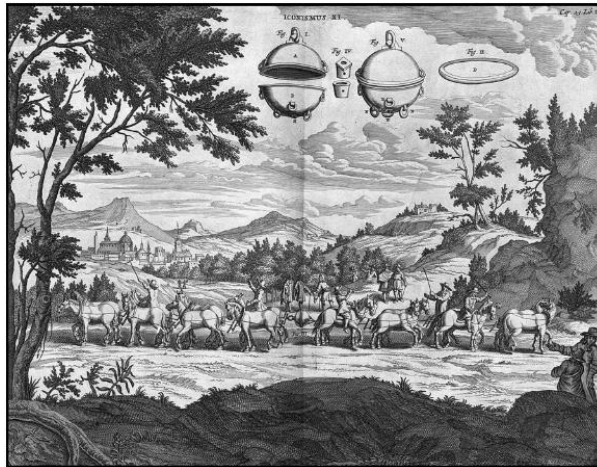


Figura V. El experimento de los hemisferios de Magdeburgo.

Desde un punto de vista técnico las semiesferas han formado un cuerpo hueco, que se encuentra sumergido en el aire atmosférico. Esto genera una gran diferencia de presiones entre el interior y el exterior, donde la resultante, dirigida hacia adentro, favorece la unión de las partes. Por su parte, la acción conjunta de los caballos, que se dirigía hacia afuera, no era superior.

5. Conclusiones. - La diferencia de enfoques ante el problema de ascensión del agua por conductos trajo como consecuencia una serie de estudios y experimentos que desembocaron en el descubrimiento del peso del aire, la presión atmosférica y la existencia del vacío. Cuestiones que forzosamente tuvieron que admitir científicos y religiosos.

La divulgación pública de los resultados científicos fue un factor importante en el cambio de concepción del aire como un elemento y de la presencia del vacío.

Muchas personalidades incidieron en el descubrimiento y la aceptación de la opinión pública del peso del aire, la presión atmosférica y la existencia del vacío. Así que no se deben dejar de mencionar por orden cronológico a Isaac Beeckman, Rene Descartes, Gianbattista Baliani, Galileo Galilei, Gasparo Berti, Magiotti, Evangelista Torricelli, Vincenzo Viviani, Marin Mersenne, Blaise Pascal, Florin Périer y Otto von Guericke.

6. Referencias

- [1] Hidalgo, J. M. *A História da Ciência (Distorcida ou Ausente) em Livros Didáticos: O Conteúdo sobre o “Experimento de Torricelli” como Estudo de Caso*, Alexandria: Revista em Educação em Ciência e Tecnologia, 2018. nº 1, v. 11: p. 101-124.
- [2] Hidalgo, J. M., Martins, J. & de Medeiros, D. *Física e História: Experimento de Torricelli – uma proposta didáctica multicontextual*, História da Ciência e Ensino, 2021. V.23: p. 60-91.
- [3] Festa, E. *Torricelli, Pascal y el problema del vacío*, Boletín de la Asociación Meteorológica de España, 2006. nº 4, Julio: p. 1-17.
- [4] Rouse, H. and Ince, S. *History of hydraulics*, 1957. Iowa Institute of Hydraulic Research. State University of Iowa. Iowa. USA.
- [5] Prieto, J.I. *Barómetros de Salón*, Boletín de la Asociación Meteorológica de España, 2003, nº 1, Julio, p.12-14.
- [6] Martins, M. *História e Filosofia da Ciência no Ensino: um caminho para o uso de Novas Tecnologias*, 2018, Universidad Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.
- [7] Pérez, J. R. *Evangelista Torricelli. De la bomba de agua a la invención del barómetro*, El Día, 2005, nº 3, Abril p. 1-3.
- [8] Herrera, R. M. *Historia del experimento barométrico*, Pensamiento Matemático, 2012. No. 2, p. 1-14.
- [9] Levi, E. *El agua según la ciencia*, 2001, Avances en Hidráulica 8. AMH, IMTA, México
- [10] Pelkowski, J. *El vacío de Guericke y sus virtudes*, Meteorología Colombiana, 2001. No. 4, octubre 2001, p. 127-138.
- [11] Navarro, J. *Tours verniens. Géographie, langue et textes littéraires. Oteando tempestades. Dos instrumentos meteorológicos en la obra de Verne*, 2019, Éditions Le Manuscrit, Paris.
- [12] Holguín, C. *Universalidad del genio de Pascal*, 1962, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

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

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

YYD 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.

Riesgos Ergonómicos asociados a molestias musculoesqueléticas en trabajo remoto en docentes de la UGEL de Picota.

Ergonomic risks associated with musculoskeletal discomfort in remote work in teachers of the UGEL de Picota.

Riscos ergonómicos associados ao desconforto musculoesquelético no trabalho remoto em docentes da UGEL de Picota.

William Yoel Cano Moreto ¹

Recibido: Junio 2022

Aceptado: Agosto 2022

Resumen. - Dentro de nuestros ambientes laborales existen muchos peligros y riesgos hacia nuestra salud, pues anualmente ocurren millones de lesiones relacionados con el trabajo no mortal, este estudio busca determinar la asociación del Riesgo Ergonómico con las molestias musculoesqueléticas en el trabajo remoto. En total fueron 91 docentes que se evaluaron mediante el método ergonómico rosa y nórdico. Los resultados muestran una asociación estadísticamente significativa, además en relación al malestar musculoesquelético de todos los docentes evaluados el 61.5% tienen molestia en el cuello, 51.6% en el hombro, 49.5 % en el dorsal lumbar, 53.8% codo antebrazo, 74.7% mano muñeca en el último mes, por otro lado en cuanto a la evaluación ergonómica por el método Rosa en silla y pantalla, existen docentes que se ven afectados en todos los aspectos evaluados, ubicándose en un nivel de riesgo muy alto (53.8%), nivel alto (44%) y nivel bajo (2.2%), lo que significa que se debe intervenir para prevenir problemas en su salud; dentro de este marco se concluye que existe molestias musculoesqueléticas en 53 docentes y riesgos ergonómicos en 49 docentes.

Palabras clave: Riesgo ergonómico, musculoesquelético, prevención, método rosa.

Summary. - Within our work environments there are many dangers and risks to our health, since millions of injuries related to non-fatal work occur annually, this study seeks to determine the association of Ergonomic Risk with musculoskeletal discomfort in remote work. In total there were 91 teachers who were evaluated using the pink and Nordic ergonomic method. The results show a statistically significant association, also in relation to the musculoskeletal discomfort of all the teachers evaluated, 61.5% have neck discomfort, 51.6% in the shoulder, 49.5% in the dorsal threshold, 53.8% elbow forearm, 74.7% hand wrist In the last month, on the other hand, in terms of the ergonomic evaluation by the Rosa method in chair and screen, there are teachers who are affected in all the aspects evaluated, placing themselves at a very high level of risk (53.8%), high level (44%) and low level (2.2%), which means that it is necessary to intervene to prevent health problems; Within this framework, it is concluded that there is musculoskeletal discomfort in 53 teachers and ergonomic risks in 49 teachers.

Keywords: Ergonomic risk, musculoskeletal, prevention, pink method.

¹ Ingeniero Ambiental. Universidad Peruana Unión Sede Tarapoto (Perú), williamcanomoreto@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3717-574X>

Resumo. - Dentro de nossos ambientes de trabalho existem muitos perigos e riscos à nossa saúde, uma vez que milhões de lesões não fatais relacionadas ao trabalho ocorrem anualmente, este estudo busca determinar a associação do Risco Ergonômico com desconforto musculoesquelético no trabalho remoto. Um total de 91 professores foram avaliados por meio do método ergonômico rosa e nórdico. Os resultados mostram associação estatisticamente significativa, também em relação ao desconforto musculoesquelético de todos os professores avaliados, 61,5% apresentam desconforto no pescoço, 51,6% no ombro, 49,5% no dorsal lombar, 53,8% cotovelo antebraço, 74,7% mão punho No último mês, por outro lado, quanto à avaliação ergonômica pelo método Rosa em cadeira e tela, há professores que são afetados em todos os aspectos avaliados, colocando-se em um nível de risco muito alto (53,8%), nível alto (44%) e nível baixo (2,2%), o que significa que deve haver intervenção para prevenir problemas de saúde; Neste enquadramento conclui-se que existe desconforto musculoesquelético em 53 professores e riscos ergonômicos em 49 professores.

Palavras-chave: Risco ergonômico, musculoesquelético, prevenção, método rosa.

1. Introducción. - Cada día mueren personas a causa de accidentes o enfermedades relacionadas con el trabajo, más de 2,78 millones de muertes por año y anualmente ocurren unos 374 millones de lesiones a nivel mundial relacionadas con el trabajo no mortal, ya que muchos trabajadores se encuentran expuestos a diferentes riesgos que perjudican su salud [1]. La Organización Internacional del Trabajo (OIT) estima que 2,02 millones de personas mueren cada año a causa de enfermedades y accidentes del trabajo y recomienda garantizar condiciones laborales seguras y saludables; prevenir accidentes de trabajo, enfermedades profesionales y otros daños a la salud mediante la identificación, evaluación y control de los factores de riesgos ocupacionales [2]. Dentro de este marco es necesario mencionar que la relación entre el hombre y su entorno laboral se ha convertido en objeto de quejas por condiciones demasiado duras relacionados con el área de trabajo, una de las consecuencias de las enfermedades que está relacionado es la ergonomía que se asocia con trastornos musculoesqueléticos [3].

La pandemia ha conllevado a una revolución educativa, a causa del confinamiento se ha implementado la educación a distancia virtual por lo cual muchos docentes han improvisado un ambiente de trabajo, pero no tomaron en cuenta los riesgos a corto y largo plazo a consecuencia de la exposición de factores de riesgo ergonómico y musculoesquelético [4]. Los trastornos musculoesqueléticos están relacionados con la patología que afecta la salud de los teletrabajadores debido a los factores de riesgos ergonómicos a consecuencia de trabajos prolongados y largas jornadas laborales [5]. En la actualidad cada 15 segundos, 153 trabajadores tienen un accidente laboral y 160 millones de casos de enfermedades profesionales no mortales se registran anualmente en el mundo [6].

Según la *European Agency for Safety and Health at Work* explicaron que los peligros de trabajo de las empresas se deben detectar a tiempo a través de una inspección, pero a su vez es difícil de averiguar como el trabajo perjudica la salud de los trabajadores dañando todo el cuerpo, se debe realizar una campaña para poder concientizar de los problemas que se producen a consecuencia del trabajo relacionados con los trastornos musculoesqueléticos [7]. En Europa existe más de 120 millones de personas que se ven afectados por trastornos musculoesqueléticos teniendo impactos negativos en la calidad de vida de todas las personas. Estos problemas perjudican su salud convirtiéndose en problemas crónicos como: dolor de espalda, articulaciones, problemas de extremidades superiores entre otras, todo a consecuencia de malas posturas relacionados con el trabajo.[8]

1.1. Seguridad y salud en el trabajo en Perú. - Según el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo de acuerdo al sistema de información de accidentes de trabajo, incidentes peligrosos y

enfermedades ocupacionales, se registraron 2400 accidentes de trabajo en el mes de enero de las cuales las formas de trabajo no mortales más frecuentes son esfuerzos físicos o falsos movimientos; golpes por objetos (excepto caídas); caída de personas a nivel; entre otras formas [9]. La superintendencia nacional de fiscalización laboral es el ente fiscalizador que se encarga de inspeccionar a las empresas y hacer cumplir las leyes y reglamentos nacionales de seguridad y salud en el trabajo, deben establecer y aplicar de manera efectiva sanciones adecuadas para los casos de violación de las disposiciones legales [10].

Según Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo N° 29783, en el artículo 1 y 6 indica que el empleador es responsable en materia de seguridad y salud en el trabajo con respecto a los trabajadores y tienen como objetivo promover una cultura de prevención de riesgos laborales en el país [11]. Según el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, en el artículo 33 inciso c) menciona que los registros obligatorios a presentar son: Registro del monitoreo de agentes físicos, químicos, biológicos, psicosociales y factores de riesgo disergonómicos [12].

Esta investigación tiene mucha relevancia debido a que la salud es un elemento primordial en el bienestar docente tanto en la salud física y mental, para ello se debe conocer cuáles son los riesgos expuestos en relación a su actividad laboral y que se puede hacer para prevenirlo, uno de los problemas que provocan trastorno musculoesquelético es el trabajo prolongado. Es muy importante realizar esta investigación ya que no existe una data de resultados en el Ministerio de Educación con respecto a esta problemática en trabajo remoto a consecuencia de la pandemia, solo cuentan con cartillas de salud docente del año 2018 cuando aún no estábamos en pandemia, en la actualidad existen factores de riesgo que derivan de movimiento repetitivo de todo los miembros de la mano, muñeca, antebrazos y postura sentado por largo tiempo incrementando la fatiga musculoesquelética.

2. Metodología. - En este estudio se utilizó la asociación entre las variables de riesgo ergonómico y molestias musculoesqueléticas; por otro lado, en cuanto al diseño es de tipo no experimental porque no se manipula deliberadamente las variables de estudio [13].

2.1. La población. - La Unidad de Gestión Educativa Local de Picota es una instancia de ejecución descentralizada que depende de la Dirección Regional de Educación de San Martín (DRE-San Martín), dentro de su jurisdicción administra a 32 instituciones educativas públicas de nivel secundaria, para los cuales se requiere a 343 docentes en este nivel, dato que fue considerado como población, a partir de este dato se realizó los cálculos y se aplicó algunos criterios de selección de muestra por conveniencia, representatividad y por acceso, conformando una muestra de 91 docentes que laboran de manera remota en el nivel secundaria. De estos 91 docentes 46 son de

sexo masculino (50.5 %) y 45 son de sexo femenino (49.5%), también como datos tenemos que 5 son menores de 25 años, 29 tienen una edad entre 26 a 35 años, 37 tienen entre 36 y 45 años, 15 docentes tienen una edad entre 46 a 55 años y 5 docentes tienen de 55 años a más. Otro dato importante de la población es que la mayoría (44 %) viene trabajando entre 6 a 15 años como docentes. Seguidamente para la recolección de información se usó fotografías e instrumentos los cuales se describen a continuación:

2.2. Método ROSA. - El método Rosa se usa con el objetivo de evaluar puestos de trabajo en personas que trabajan frente a una computadora, el método permite evaluar las posturas inadecuadas sentado y movimiento repetitivo de mano, muñeca, antebrazos obteniéndose una valoración de riesgo y nivel de actuación para disminuir el riesgo [14]. La aplicación de este se basa en observar el puesto de trabajo mientras el docente se encuentra desarrollando su actividad, se toma los datos in situ empleando la hoja de campo del método Rosa [15]. Dicho instrumento resulta muy efectivo y confiable para identificar los factores de riesgo relacionados con el uso de computadoras en los puestos de trabajo, para su evaluación se procedió de la siguiente manera:

SECCIÓN A. Evaluación en la silla: En primer lugar, se evalúa el riesgo postural asociado a la altura del asiento y el espacio libre bajo el tablero (A). La puntuación de la altura oscila entre 1 y 5 (3+1+1). A mayor puntuación corresponde mayor riesgo.

Grupo A	1	2		3	+1	
Altura del asiento	 Rodillas a 90º	 Silla muy baja Rodillas < 90º	 Silla muy alta Rodillas > 90º	 Sin contacto con el suelo	 Sin suficiente espacio bajo la mesa	Altura no ajustable
Grupo B	1		2		+1	
Longitud del asiento	 8 cm. 8 cm. de espacio	 menos de 8 cm. de espacio	 más de 8 cm. de espacio	Longitud no ajustable		

Figura 1.- Evaluación método rosa en silla parte 1.

A la puntuación obtenida por la altura se le añade la que le corresponda por la longitud del asiento (B), con una puntuación que oscila entre 1 y 3. La puntuación obtenida al sumar estos dos ítems será la que se debe introducir en el eje horizontal de la tabla.

Por otra parte, se analiza las características del reposabrazos (con una puntuación entre 1 y 5) y del respaldo, con una puntuación que oscila entre 1 y 4. La puntuación combinada se introduce en el eje vertical de la tabla de la sección A

Grupo C	1		2		+1				
Reposabrazos		en línea con el hombro, relajado		muy alto o con poco soporte		muy separados		superficie dura o dañada en el reposabrazos	No ajustable
Grupo D	1		2		+1				
Respaldo						Mesa trabajo muy alta	No ajustable		

Figura II.- Evaluación método rosa en silla parte 2.

		Puntuación de reposabrazos + respaldo							
		2	3	4	5	6	7	8	9
Puntuación	2	2	2	3	4	5	6	7	8
	3	2	2	3	4	5	6	7	8
Altura + Profundidad	4	3	3	3	4	5	6	7	8
	5	4	4	4	4	5	6	7	8
	6	5	5	5	5	5	7	8	9
	7	6	6	6	7	7	8	8	9
	8	7	7	7	8	8	9	9	9

Tabla I.- Valoración de silla del nivel de riesgo método Rosa

Al resultado obtenido de la tabla se le añade el posible riesgo por la DURACIÓN de la postura para obtener la puntuación final del grupo A de la silla:

- Si permanece sentado <1 hora/día o <30 minutos ininterrumpidamente -1
- Si se permanece entre 1 y 4 horas al día o entre 30 minutos y 1 hora seguida 0
- Si permanece sentado >4 horas/día o más de una 1 hora ininterrumpidamente +1

SECCIÓN B. Evaluación en la Pantalla y los Periféricos: En este grupo se sigue la misma dinámica, pues se analizan por un lado la distribución y el uso del monitor y del teléfono; y de los periféricos, ratón y teclado. Antes de entrar en la tabla correspondiente, al valor obtenido por el uso de cada uno de ellos se le debe adicionar el de la duración.

MONITOR Y PERIFÉRICOS										
Grupo E	1		2			+1				
Uso del Monitor										
	Duración	-1	0	+1	PUNTUACIÓN MONITOR					
Grupo F	1			2		+2		+1		
Uso del Teléfono								Sin opción de manos libres		
	Duración	-1	0	+1	PUNTUACIÓN TELÉFONO					
Grupo G	1			2		+2		+1		
Uso del Ratón										
	Duración	-1	0	+1	PUNTUACIÓN RATÓN					
Grupo H	1			2		+1				
Uso del Teclado										
	Duración	-1	0	+1	PUNTUACIÓN TECLADO					

Figura III.- Evaluación método rosa en monitor y periféricos.

		Periféricos							
		Monitor							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Teléfono	0	1	1	1	2	3	4	5	6
	1	1	1	2	2	3	4	5	6
	2	1	2	2	3	3	4	6	7
	3	2	2	3	3	4	5	6	8
	4	3	3	4	4	5	6	7	8
	5	4	4	5	5	6	7	8	9
6	5	5	6	7	8	8	9	9	
		0	1	2	3	4	5	6	7
Ratón	0	1	1	1	2	3	4	5	6
	1	1	1	2	3	4	5	6	7
	2	1	2	2	3	4	5	6	7
	3	2	3	3	3	5	6	7	8
	4	3	4	4	5	5	6	7	8
	5	4	5	5	6	6	7	8	9
	6	5	6	6	7	7	8	8	9
	7	6	7	7	8	8	9	9	9

Tabla II.-Valoración de periféricos del nivel de riesgo método Rosa

Una vez conocidos los índices parciales de las tablas con los ítems a estudio, el riesgo postural B se obtiene conforme a la siguiente tabla.

		Puntuación del monitor y teléfono								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Puntuación teclado + ratón	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9
	3	3	3	3	4	5	6	7	8	9
	4	4	4	4	4	5	6	7	8	9
	5	5	5	5	5	5	6	7	8	9
	6	6	6	6	6	6	6	7	8	9
	7	7	7	7	7	7	7	7	8	9
	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9
	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla III.-Valoración de monitor y teclado del nivel de riesgo método Rosa

Evaluación Final del método Rosa: Conocidas las puntuaciones de la sección A y de la sección B sólo resta entrar en la tabla siguiente para conocer la puntuación final ROSA y el nivel de actuación.

		Puntuación A									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Puntuac. B	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	3	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10
	4	4	4	4	4	5	6	7	8	9	10
	5	5	5	5	5	5	6	7	8	9	10
	6	6	6	6	6	6	6	7	8	9	10
	7	7	7	7	7	7	7	7	8	9	10
	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9	10
	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	10
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabla IV.-Valoración final del nivel de riesgo método Rosa

- Un nivel de riesgo 1 a 4 indica situaciones de trabajo aceptables.
- Una puntuación igual o superior a 5 indica situaciones de prioridad de intervención ergonómica

PUNTOS ROSA	NIVEL DE RIESGO
1-2	Inapreciable
3-4	Bajo
5-6	Medio
7-8	Alto
9-10	Muy alto

Tabla V.-Valoración del nivel de riesgo método Rosa

2.3. Cuestionario Nórdico. - El método nórdico consta de 11 preguntas donde se evalúa la postura corporal como: Cuello, hombro, dorsal o lumbar, codo o antebrazo, muñeca o Brazo; aquí se obtiene como resultado los síntomas de trastorno musculoesquelético [16]. Para la aplicación del cuestionario nórdico se realizó una encuesta a los docentes donde se monitorea de manera in situ el movimiento repetitivo de los dedos, las manos y las muñecas, mantenimiento del antebrazo y la muñeca de la misma manera, se evaluó la postura sentada durante largo tiempo con la hoja de

campo. Este método es muy utilizado para evaluar riesgos ergonómicos en centros de computación puesto que cuenta con una alta confiabilidad (0.80) [17]. La evaluación principalmente consiste en la percepción de molestias musculoesqueléticas de las zonas corporales como: Cuello, hombro, dorsal o lumbar, codo o antebrazo, muñeca o brazo.

2.4. Análisis estadístico. - Para realizar el análisis estadístico se usó el software SPSS, mediante el análisis de frecuencias, y para medir el grado de asociación se usó el estadístico de Chi Cuadrada, para el nórdico se trabajó con el primer enunciado basado en los síntomas o en la existencia o no de molestias musculoesqueléticas, y en el método rosa se basó en el nivel de riesgo con una escala tipo Likert, a un 95 % de confianza.

3. Resultado y Discusión. - A continuación, se presentan los resultados descriptivos de las molestias musculoesqueléticas de los docentes evaluados en la investigación.

Componente de evaluación	Último mes		Últimos 3 meses		Últimos 12 meses	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Cuello						
SI	56	61.5	55	60.4	48	52.7
NO	35	38.5	36	39.6	43	47.3
Total	91	100.0	91	100.0	91	100.0
Hombro						
SI	47	51.6	44	48.4	47	51.6
NO	44	48.4	47	51.6	44	48.4
Total	91	100.0	91	100.0	91	100.0
Dorsal Lumbar						
SI	45	49.5	40	44	47	51.6
NO	46	50.5	51	56	44	48.4
Total	91	100.0	91	100.0	91	100.0
Codo- antebrazo						
SI	49	53.8	38	41.8	44	48.4
NO	42	46.2	53	58.2	47	51.6
Total	91	100.0	91	100.0	91	100.0
Mano – Muñeca						
SI	68	74.7	44	48.4	48	52.7
NO	23	25.3	47	51.6	43	47.3
Total	91	100.0	91	100.0	91	100.0

Tabla VI. - Resultado de la Evaluación Musculoesquelético de problemas en el último mes, 3 meses y 12 meses

En la tabla 6 se puede observar el comparativo de problemas que sufren los docentes a lo largo del último año laborable, por ejemplo, la mayoría de los docentes presentan dolores a nivel de mano – muñeca (74.7%) y cuello (61.5%) en el último mes, en los últimos 3 meses la mayoría de los docentes presenta problemas a nivel de cuello (60.4%), finalmente en los últimos 12 meses también se registra mayores problemas a nivel de cuello (52.7%) y mano – muñeca (52.7%),

además se resalta también problemas a nivel de dorsal lumbar, por lo que se necesita intervenir para mejorar el riesgo que está afectando la salud de los docentes principalmente en el último mes.

Componente de evaluación	Frecuencia	Porcentaje %
Tiempo duración en silla		
Permanece <1 hora/día o < 30 min. Ininterrumpidos	13	14.3
Permanece entre 1 y 4 Hrs. al día o entre 30 min y 1 Hrs seguida.	50	54.9
Más de 4 Hrs./día o más de 1 hora ininterrumpidamente	28	30.8
Total	91	100.0
Altura de silla		
Rodillas a 90°	16	17.6
Demasiado bajo-Angulo de la rodilla < a 90°	42	46.2
Demasiado alto-Angulo de la rodilla > a 90°	23	25.3
Sin contacto del pie con el suelo	10	11.0
Total	91	100.0
Profundidad del asiento		
A 8 cm. de espacio entre el asiento y la parte trasera de las rodillas	6	6.6
Demasiado largo-menos de 8 cm. de espacio el asiento y la parte trasera de las rodillas	59	64.8
Asiento corto-más de 8 cm. de espacio el asiento y la parte trasera de las rodillas		
Total	26	28.6
Total	91	100.0
Reposabrazos de la silla		
En línea con los hombros- relajados	11	12.1
Reposabrazos demasiado altos. Hombros encogidos	57	62.6
Reposabrazos demasiado bajos. Los codos no se apoyan	23	25.3
Total	91	100.0
Soporte para la espalda de la silla		
Soporte lumbar adecuado 95°-110°	11	12.1
Sin soporte lumbar o no está situado en la parte baja de la espalda	36	39.6
Respaldo reclinado menos de 95° o más de 110°	28	30.8
Sin respaldo o respaldo no utilizado para apoyar la espalda	16	17.6
Total	91	100.0

Tabla VII. Resultado descriptivo de Evaluación ergonómica método Rosa - silla

En la tabla 7 se muestran los resultados de la evaluación ergonómica del método Rosa en silla (Tiempo, silla, reposabrazos, respaldo), en primer lugar tenemos que la mayoría de los docentes (54.9 %) permanece entre 1 y 4 horas al día haciendo uso de la silla, la silla que utilizan en su centro de trabajo es demasiado bajo con un Angulo menor a 90 grados, en relación a la profundidad del asiento también es demasiado largo-menos de 8 cm. de espacio al asiento y la parte trasera de las rodillas (64.8%), con respecto a los reposabrazos pues algunos no tienen y la mayoría son fijos y demasiado alto (62.6%) y el soporte es muy lejos de la espalda. Viéndose así afectados un 51.6% con dolor lumbar en los últimos 12 meses, representando a más de la mitad de los docentes.

Componente de evaluación	Frecuencia	Porcentaje %
Tiempo duración en pantalla		
Permanece <1 hora/día o < 30 min. Ininterrumpidos	16	17.6
Permanece entre 1 y 4 Hrs. al día o entre 30 min y 1 Hrs seguida.	43	47.3
Más de 4 Hrs./día o más de 1 hora ininterrumpidamente	32	35.2
Total	91	100.0
Altura de la pantalla		
Pantalla entre 45-75 cm. A la altura y borde de los ojos	13	14.3
Pantalla muy baja 30° por debajo del nivel de los ojos	54	59.3
Pantalla demasiado alta. Provoca extensión del cuello	24	26.4
Total	91	100.0
Tiempo de duración en teléfono		
Permanece <1 hora/día o < 30 min. Ininterrumpidos	18	19.8
Permanece entre 1 y 4 Hrs. al día o entre 30 min y 1 Hrs seguida.	49	53.8
Más de 4 Hrs./día o más de 1 hora ininterrumpidamente	24	26.4
Total	91	100.0
Uso de teléfono		
Auriculares o con una mano. Teléfono cerca \leq 30 cm.	46	50.5
Teléfono lejos \geq 30 cm	45	49.5
Total	91	100.0
Tiempo de duración en mouse		
Permanece <1 hora/día o < 30 min. Ininterrumpidos	12	13.2
Permanece entre 1 y 4 Hrs. al día o entre 30 min y 1 Hrs seguida.	47	51.6
Más de 4 Hrs./día o más de 1 hora ininterrumpidamente	32	35.2
Total	91	100.0
Uso del Mouse		
Mouse alineado con el hombro	47	51.6
Mouse no está alineado con el hombro o está lejos	44	48.4
Total	91	100.0
Tiempo de duración en el teclado		
Permanece <1 hora/día o < 30 min. Ininterrumpidos	15	16.5
Permanece entre 1 y 4 Hrs. al día o entre 30 min y 1 Hrs seguida.	50	54.9
Más de 4 Hrs./día o más de 1 hora ininterrumpidamente	26	28.6
Total	91	100.0
Uso del teclado		
Muñecas están rectas y hombros relajados	58	63.7
Muñecas extendidas más de 15°	33	36.3
Total	91	100.0

Tabla VIII. Resultado descriptivo de Evaluación ergonómica método Rosa – pantalla y periféricos

Por otro lado en la tabla 8 con relación al monitor se observa que la mayoría pasa entre 1 y 4 horas frente a su monitor, un 59.3% utilizan una pantalla muy baja o por debajo del nivel de los ojos, ocasionando esto problemas en el cuello de los docentes viéndose mayormente afectados en el último mes, con respecto al teléfono se ha considerado el teléfono celular ya que es el más utilizado por los docentes, y el tiempo de uso es igual entre 1 y 4 horas al día, un 49.5% mantiene el teléfono fuera o lejos de su alcance ocasionando así problemas en el codo antebrazo al mantener estirándose a cada momento para su uso, igual es el mismo tiempo de uso del mouse y teclado, se observa que más del 50% utiliza correctamente el mouse y teclado pero existe un porcentaje (40%) de docentes que emplean estos periféricos de una manera incorrecta; como consecuencia de ello existen docentes que se ven afectados en todos los aspectos evaluados ubicándose en un nivel de riesgo muy alto, lo que significa que se necesita intervenir para mejorar algunos

elementos del puesto de trabajo. Con respecto a los trabajos en silla y pantalla. También en modo de resumen se ha logrado constatar lo siguiente:

Puntos Rosa	Nivel de riesgo	Cantidad	Porcentaje	Actuación
1	Inapreciable	0	0	No es necesario actuación
2-3-4	Bajo o mejorable	2	2.2	Pueden mejorarse algunos elementos
5	Alto	40	44.0	Es necesario la actuación
6-7-8	Muy Alto	49	53.8	Es necesario la actuación cuanto antes
9-10	Extremo	0	0	Es necesaria la actuación urgentemente
Total		91	100	

Tabla IX. Resultado de nivel de riesgo de Evaluación ergonómica método Rosa

Por lo tanto, de todos los docentes evaluados en la UGEL de Picota, 40 se encuentran en un nivel de riesgo alto este es un indicador que es necesario la actuación y 49 en un nivel de riesgo muy alto, de igual manera es necesaria la actuación cuanto antes, y finalmente se encontró tan solo a dos docentes con un nivel de riesgo bajo.

Pruebas de chi-cuadrado		
	Valor	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	7,659a	,022
N de casos válidos	91	
Coefficiente de contingencia	,28	

Tabla X. Correlación entre Riesgo ergonómico y molestias musculoesqueléticas

En la tabla 10 se muestran los resultados de la asociación de las variables de estudio Riesgo ergonómico y molestias musculoesqueléticas donde se evidencia que las variables tienen una asociación estadísticamente significativa directamente proporcional, pues el coeficiente de contingencia es de 0.28. Dándonos a entender que si el riesgo ergonómico es mayor las molestias musculoesqueléticas también serán más representativas en los docentes.

Dentro de este marco a partir de la pandemia por el COVID-19 en nuestro país se implementó el trabajo remoto como una modalidad a distancia lo suficientemente flexible para implementar y permitir que los trabajadores continúen prestando servicios desde sus domicilios o lugares de aislamiento social obligatorio. Pues esta metodología no tuvo los efectos deseados y su intento por mantenerlo con algunas modificaciones mínimas no solucionó su falta de idoneidad. Por el contrario, el trabajo remoto ha probado ser práctico, flexible, útil y hasta beneficioso para conciliar la vida personal, familiar y laboral de los trabajadores, siempre que se use de forma adecuada. En el ámbito de la educación también se realizó este tipo de trabajo, pues los docentes

tuvieron que adaptar un lugar dentro de su vivienda para poder brindar los servicios de educación, y esto ha desencadenado una serie de riesgos laborales que pueden implicar el aumento significativo de las enfermedades mentales, factores de riesgo psicosocial como las altas cargas y ritmos de trabajo, las largas jornadas laborales, la percepción de tener que estar disponible en todo momento con el uso de la tecnología, pues en la actualidad la tecnología en las actividades laborales se han desarrollado muy rápidamente.

Los estudios epidemiológicos han demostrado que los trastornos musculoesqueléticos son muy frecuentes entre los empleados que trabajan con una computadora [18]. De manera que los docentes de la UGEL Picota del nivel secundario presentan problemas a lo largo del último año laborable, la mayoría de ellos presentan dolores a nivel de mano – muñeca y cuello en el último mes, en los últimos 3 meses presentan problemas a nivel de cuello y en los últimos 12 meses se registra mayores problemas a nivel de cuello y mano -muñeca, además se resalta también problemas a nivel de dorsal lumbar, pues los docentes al tener que adaptar un lugar para que puedan atender al sector educativo no cuentan con un ambiente laboral adecuado, empezando por las sillas, estas en su mayoría no son consideradas ergonómicas, algunos sin reposabrazos y/o fijos.

Contrastando estos análisis con Barrantes y López, que aplicaron estos instrumentos a estudiantes de informática y computación en relación a los trastornos musculoesqueléticos obtuvieron que, de 129 estudiantes, 81 casos tienen dolencia en el cuello, 71 en la región lumbar y 72 casos dolor de muñeca por otro lado las mujeres percibieron mayor estrés concluyendo que los síntomas aumentan a través del tiempo y nivel de percepción del riesgo para la salud está relacionado con las computadoras [19]. De manera que, muchos autores mencionan que los trastornos musculoesqueléticos son muy frecuentes en los que trabajan en la computadora, pues estos registran dolor de hombro, codo, muñeca / mano y lumbalgia en un 50,5%, 20,3%, 26,3%, 44,8% y 56,1%, respectivamente y se relacionaron con el dolor musculoesquelético en todas las áreas anatómicas [18].

También otros autores mencionan que este tipo de riesgos son muy comunes en los trabajadores en oficina, entre ellos tenemos a los síntomas musculoesqueléticos en cuello, espalda y hombros.[20], también estos riesgos se registran en las posturas laborales y enfermedades musculoesqueléticas en dentistas, donde el 75,9% en el cuello, 58,6% para los hombros, 56,9% para la parte superior de la espalda, 48,3% para la zona lumbar y 44,8% para la muñeca [21]; de manera que, el índice de riesgo obtenido por el método ROSA se correlaciona de manera significativa directa con la presencia de malestar musculoesquelético en el cuello ($p=0.047$) y la

muñeca derecha (0.015), donde a mayor severidad del malestar, mayor necesidad de medidas de intervención [22].

4. Conclusiones. - Este estudio confirma que existe una asociación estadísticamente significativa directamente proporcional entre el Riesgos Ergonómico y las molestias musculoesqueléticas en los docentes de la UGEL Picota; no obstante se resalta que la medición de las variables de forma independiente deja en evidencia que, las posiciones adoptadas a pesar de que pueda resultar cómodo no lo son para las estructuras musculoesqueléticas, por lo tanto, se recomienda implementar y/o actuar cuanto antes con medidas preventivas en el lugar de trabajo para mejorar el entorno de trabajo ergonómico, y a la UGEL en lo posible gestionar mobiliario, los cuales tengan características ergonómicas que permitan alcanzar el confort de los docentes, lo cual incide en su bienestar psicofísico, eficiencia y rendimiento.

Por otro lado, en cuanto al malestar musculoesquelético se confirma que el 74.7 % mantiene molestias a nivel de mano-muñeca, 61.5% tienen molestias en el cuello, 51.6% en el hombro, 49.5 % en el dorsal lumbar, 53.8% en el codo antebrazo, en general poco más de 53 docentes sufren molestias musculoesqueléticas, a raíz de ello se propone evitar mantener la misma postura durante mucho tiempo realizando pausas frecuentes para hacer ejercicios de relajación del cuerpo en especial el cuello y la mano; también a la UGEL concientizar a sus docentes a través de capacitaciones acerca de los riesgos ergonómicos en trabajos de oficina, pendientes a la precaución y protección de su salud.

Finalmente, en cuanto a la evaluación ergonómica por el método Rosa en silla y pantalla, existen 49 docentes que se ven afectados en todos los aspectos evaluados ubicándose en un nivel de riesgo muy alto (53.8 %) y un total de 40 docentes que están expuestos a un nivel de riesgo alto (44 %) y tan solo 2 docentes están expuestos a un nivel de riesgo bajo; por lo tanto la capacidad de mitigar los síntomas, parte de cambiar comportamientos y mejorar el rendimiento a través de la capacitación combinada con una estación de trabajo de pie y sentado; también sugerir a la UGEL incentivar a los docentes a realizarse periódicamente exámenes médicos ocupacionales con la finalidad de determinar el estado de salud real y poder tomar acciones correctivas para mejorar las condiciones laborales.

5. Referencias

- [1] M. L. Vega Ruíz, “¿El trabajo es salud?,” *Arch. Prev. Riesgos Labor.*, vol. 23, no. 4, pp. 410–414, 2020, doi: 10.12961/apr.2020.23.04.01.
- [2] Peralta, “Las enfermedades profesionales como uno de los riesgos dentro de la seguridad y salud del trabajo,” *Rev. la Abogacía*, no. 64, pp. 155–175, 2020, [Online]. Available: www.ojs.onbc.cu.
- [3] P. R. Fernandes de Lima, “Ergonomic analysis of work: use of the OWAS and RULA methods in a food company in the city of Mossoró-RN,” *Rev. Gestão da Produção Operações e Sist.*, vol. 14, no. 5, pp. 109–132, 2019, doi: 10.15675/gepros.v14i5.2438.
- [4] García-Salirrosas EE and Sánchez-Poma RA, “Prevalence of Musculoskeletal Disorders in University Teachers Who Perform Teletwork in Covid-19 Times.,” *An Fac med.*, vol. 81, no. 3, pp. 301–307, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.15381/anales.v81i3.18841>.
- [5] M. A. B. Zamora, “Revolución educativa: la educación semipresencial en el contexto de la Covid-19,” *Soc. Innova Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 65–74, 2020, [Online]. Available: <https://socialinnovasciences.org/ojs/index.php/sis/article/view/45>.
- [6] O. B. Guzmán Suárez, A. Ocegüera Ávalos, and M. I. Contreras Estrada, “Estrategia Iberoamericana de Seguridad y Salud en el Trabajo: políticas públicas para un trabajo decente,” *Med. segur. trab.*, vol. 63, no. 246, pp. 4–17, 2017, [Online]. Available: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2017000100004.
- [7] European Agency for Safety and Health at Work, “Body and hazard mapping in the prevention of musculoskeletal disorders,” *Agencia Eur. para la Segur. y la Salud en el Trab.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.2802/914376>.
- [8] J. Crawford, E. Giagloglou, A. Davis, R. Graveling, S. Copsey, and A. Woolf, “Working with chronic musculoskeletal disorders Good practice advice report,” *European Agency for Safety and Health at Work. Luxembourg*, pp. 17–59, 2021, doi: 10.2802/31550.
- [9] Ministerio del trabajo, “Notificaciones de accidentes de trabajo, incidentes peligrosos y enfermedades ocupacionales - marzo-2021,” *Boletín Estadístico Mensual marzo 2021.*, vol. 03. Perú, p. 29, 2021, [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/informes-publicaciones/2703118-notificaciones-de-accidentes-de-trabajo-incidentes-peligrosos-y-enfermedades-ocupacionales-boletin-n-10-ano-10-edicion-octubre-2021>.
- [10] L. Serrano Diaz, “La inspección del trabajo y los tipos de inspección en el Perú,” vol. 1, pp. 1–36, 2020, [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1375281/05.10.20ARTICULOPRINCIPALSET>

IEMBRE2020.pdf.

- [11] Ley 29783, “Ley de seguridad y salud en el trabajo - N° 29783,” *Derecho & Sociedad. El peruano*, Perú, p. 39, 2016, [Online]. Available: <https://diariooficial.elperuano.pe/pdf/0052/ley-seguridad-salud-en-el-trabajo.pdf>.
- [12] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo., “Eronomia para Oficinas,” p. 45, 2015, [Online]. Available: https://www.trabajo.gob.pe/archivos/file/SST/INTERES/guia_autodiagnostico_oficinas_virtual.pdf.
- [13] R. Hernandez, C. Fernandez, and P. Baptista, *Metodología de la investigación*, vol. 53, no. 9. 2014.
- [14] M. Angulo, “Factores ergonómicos y el desempeño laboral del personal administrativo de la Universidad Privada Antenor Orrego - Trujillo 2020,” *Universidad Privada Antenor Orrego*, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/7116>.
- [15] Mas, “Hoja de campo del Método ROSA,” *España Catalunya*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/rosa/rosa-ayuda.php>.
- [16] J. Morales Quispe, C. A. Suárez Oré, C. Paredes Tafur, V. Mendoza Fasabi, L. Meza Aguilar, and L. Colquehuanca Huamani, “Trastornos musculoesqueléticos en recicladores que laboran en Lima Metropolitana,” *An. la Fac. Med.*, vol. 77, no. 4, p. 357, 2016, doi: 10.15381/anales.v77i4.12655.
- [17] Ramos, “Relación entre molestias musculoesqueléticas y riesgo ergonómico en estudiantes de Computación del Centro de Educación Técnica Productiva (CETPRO) Betania - Chulucanas,” *Universidad Caólica Sede Sapience*, 2018. [Online]. Available: http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/617/Ramos_Kelly_tesis_bachiller_2018.pdf?seque=1&isAllowed=y.
- [18] G. Kaliniene, R. Ustinaviciene, L. Skemiene, V. Vaiciulis, and P. Vasilavicius, “Associations between musculoskeletal pain and work-related factors among public service sector computer workers in Kaunas County, Lithuania,” *BMC Musculoskelet. Disord.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1186/s12891-016-1281-7.
- [19] M. Fonseca Barrantes and A. Moraga López, “Desórdenes del sistema musculoesquelético por trauma acumulativo en estudiantes universitarios de computación e informática,” *Med. Leg. Costa Rica*, vol. 26, no. 1, pp. 1–19, 2019, [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2205/2166>.
- [20] M. Ardahan and H. Simsek, “Analyzing musculoskeletal system discomforts and risk

factors in computer-using office workers,” *Pakistan J. Med. Sci.*, vol. 32, no. 6, pp. 1425–1429, 2016, doi: 10.12669/pjms.326.11436.

[21] E. Rafeemanesh, Z. Jafari, F. O. Kashani, and F. Rahimpour, “A study on job postures and musculoskeletal illnesses in dentists,” *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*, vol. 26, no. 4, pp. 615–620, 2013, doi: 10.2478/s13382-013-0133-z.

[22] K. Peña Prado and K. J. Garcia Chavarry, “Correlación entre el índice de riesgo ergonómico y el malestar musculoesquelético en trabajadores administrativos del sector Banca Privada, Lima-Perú 2019,” 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12805/1526>.

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

WYCM 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.

Implementation and Evaluation of a Hail-Impact Simulation Device

Implementación y Evaluación de un Dispositivo de Simulación de Impactos de Granizo

Implementação e Avaliação de um Dispositivo de Simulação de Impacto de Granizo

Florencia Blasina¹, Andrés Echarri², Gabriel Farber³, Federico Molina⁴, Sofía Machin⁵, Nicolás Pérez⁶

Recibido: Agosto 2022

Aceptado: Octubre 2022

Summary. - Hailstorms are hazardous for people and goods. Automatically collecting information on hailstorms will help climate researchers analyze them and generate models for forecasting. Reproducing hail impacts is a requisite for designing and calibrating an electronic hail sensor. In this article, the design of a device for hail-impact simulation is presented. This device is based on the theory of Energy Matching, which explains how steel balls can be used instead of hailstones in order to have equivalent impact energies. The posed device, which can perform up to fourteen impacts between loading instances, either by dropping balls one by one or in pairs, was constructed. The size of the balls can be between 0.5 cm and 3.0 cm. In this paper, which is an extension of the work originally presented at the URUCON2021 conference, the importance of having such a hail-impact simulation device is explained. The main contribution of this extended work is the presentation of an experiment performed as an application of the constructed device. This experiment has the objective of verifying the aiming repetitiveness, while also verifying the linear relation between impact and electric signal energies.

Keywords: Hail-Impact Simulator; Energy Matching; Calibration; Sensor; Design.

Resumen. - Las tormentas de granizo son peligrosas para las personas y sus bienes. Automatizar la obtención de información sobre tormentas de granizo permitirá a los investigadores del clima enfocarse en analizar los datos y generar modelos de pronóstico. Reproducir los impactos es un requisito para diseñar y calibrar un sensor electrónico de granizo. Presentamos el diseño de un

¹ Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, fblasina@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-19797884>

² Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, aecharri@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-19925586>

³ Estudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, bonzo890@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-31553866>

⁴ Estudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, f.molina1992@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-00031887-0373>

⁵ Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, svmachin@fing.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3997-0242>

⁶ Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, nico@fisica.edu.uy, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8043-5383>

dispositivo para simular impactos de granizo basado en la teoría de emparejamiento de energías, que explica cómo se pueden utilizar bolas de acero y obtener impactos equivalentes en energía a los de piedras de granizo conocidas. Construimos el dispositivo propuesto, que puede soltar bolas de entre 0.5 cm y 3.0 cm. En este artículo, que es una extensión del trabajo presentado originalmente en la conferencia URUCON2021, se explica la importancia de tener un dispositivo de simulación de granizo de estas características. La principal contribución de este trabajo extendido es la presentación de un experimento que se realizó como aplicación del dispositivo construido. El experimento tiene los objetivos de verificar la repetitividad de la puntería y verificar la existencia de una relación lineal entre la energía cinética del impacto y la energía eléctrica de las señales adquiridas.

Palabras clave: *Simulador de Impactos de Granizo; Emparejamiento de Energías; Calibración; Sensor; Diseño.*

Resumo. - *Chuvas de granizo são perigosas para as pessoas e suas propriedades. Automatizar a coleta de informações sobre granizo permitirá que os pesquisadores do clima se concentrem na análise dos dados e na geração de modelos de previsão. Reproduzir os impactos é um requisito para projetar e calibrar um sensor eletrônico de granizo. Apresentamos o projeto de um dispositivo para simular impactos de granizo com base na teoria do emparelhamento de energia, que explica como bolas de aço podem ser usadas e obter impactos equivalentes em energia aos de granizos conhecidos. Construimos o dispositivo proposto, que pode lançar bolas entre 0,5 cm e 3,0 cm. Neste artigo, que é uma extensão do trabalho originalmente apresentado na conferência URUCON2021, é explicada a importância de se ter um dispositivo de simulação de granizo com essas características. A principal contribuição deste trabalho estendido é a apresentação de um experimento que foi realizado como aplicação do dispositivo construído. O experimento tem como objetivos verificar a repetibilidade da mira e verificar a existência de uma relação linear entre a energia cinética do impacto e a energia elétrica dos sinais adquiridos.*

Palavras-chave: *Simulador de Impacto de Granizo; Casamento de Energias; Calibração; Sensor; Projeto.*

1. Introduction. - This paper is an extension of the work originally presented at the URUCON2021 conference (1). It presents the design of a hail-impact simulator implemented at FIng, UdelaR. The device, named SGran, is mainly approached from the user's point of view, suggesting experiments for which it will be useful. The main contribution of this extended paper regarding the former one is the addition of the description and results of an experiment driven with SGran. This experiment is realized in order to verify the feasibility of identifying the energy that a ball transfers to a plate from the signal acquired with piezoelectric transducers.

Hail has been studied for decades in several countries where it occurs, such as the USA (2), China (3), Japan (4), Germany (5), Italy (6), Spain (7) and Uruguay (8). In this article, the need to reproduce hail events is explained, the main ideas of how to construct a device for doing so are given and the results of an experiment are shared.

Hail events are highly destructive. The mean duration of hailstreaks is in the order of 10 minutes (9)(10). During this time, hazardous amounts of kinetic energy are discharged. In the agricultural sector, it causes significant economic loss due to crop and greenhouse damage. In Uruguay, hail damage to assets is a great risk to agricultural investments (11)(12)(13).

Vehicles are other usually damaged goods, as shown in Fig. I. Hail forecast is of extreme importance for vehicle owners to shelter them. Having the hail-impact quantification in an area would help insurance companies to have reasonable policies regarding hail damage (14).



Figure I. - Hail damage on vehicles (15)

Solar panels are structures that can receive a direct impact from hail. Even though they must comply with international regulations for commercialization, hail characteristics differ significantly across the world. It would be therefore more efficient for every regulator to know the specific characteristics of hail in their area, for having specific regulations.

A Uruguayan research group focused on fluid mechanics and the environment is looking forward to designing an early-detection system for hail (Fluid Mechanical and Environmental Engineering Institute - IMFIA). IMFIA researchers have developed an equivalent system for floods that helped prevent them in a region of the Uruguayan territory that had several related incidents (16)(17). Elaborating such a system requires modeling reality: achieving an accurate model needs input information and feedback. It is therefore necessary to collect enough reliable information on regional hailstorms.

Networks traditionally deployed to analyze hail-event characteristics were formed by several tens of single-use nodes (18)(19). The main device for collecting hail-impact information is the hailpad: a foam sheet with an aluminum covering, where each impacting hailstone leaves a dent on the surface. If the pads were exposed to several hailstorms, there is no time-dependent data information. So, each unit has to be replaced between hailstorms. Therefore, hailpads are disposable. The analysis on these devices is observational, demanding qualified observers for interpreting the information. An electronic automatic hail sensor with characteristics to be placed in a network would expand climate researchers' possibilities, who would focus on high-level data processing instead of its acquisition. This would bring people a better understanding of hailstorms,

enhance the nowcasting of their information and bring climate researchers closer to accurate hail forecasting.

Existing automatic sensors are not affordable or non-commercial (20) (21). Therefore, our motivation is the development of a hail sensor that is cost-effective and trustworthy to be used by environment researchers. The final product must be deployable in a network in the region of their interest. The proposed sensor is based on recording acoustic waves using piezoelectric transducers. Therefore, a big load of the development effort is being put on selecting a structure and transducer disposition that permits the acquisition of a signal rich in impact information, for extracting useful characteristics.

Here is a brief description of how the sensor we are designing works (Fig. II). The body of the sensor has a plate that is exposed to hailstone impacts (a). During a storm, a hailstone strikes the plate (b). An acoustic wave origins at the impact point and propagates within the plate, generating instantaneous micro-strains on the surface; boundary conditions cause reflections that add to the direct wave (c). A transducer consisting of a piezoelectric diaphragm, which is fixed on the lower surface of the plate, converts the strains to a voltage signal (d). The electric signal is acquired by means of an acquisition board (e).

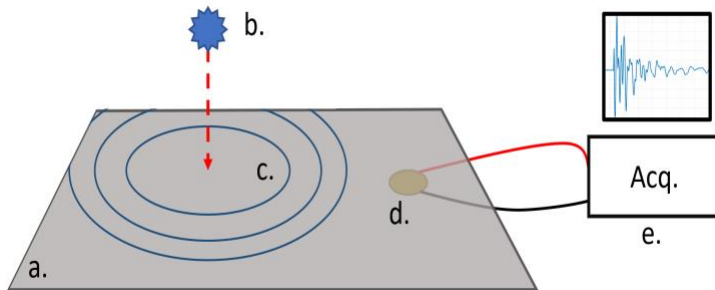


Figure II. - Sensor overview.

Each acquired signal corresponds to the sampling of the resulting electrical signal generated by the piezoelectric transducer when the physical phenomenon of a hailstone hitting the plate occurs. The resulting electrical signal, $v(t)$, is a time function composed of the convolution of three time functions, as in Eq. (1).

$$v(t) = f_1(t) * f_2(t) * f_3(t) \quad (1)$$

- $f_1(t)$: the impulse applied by the projectile.
- $f_2(t)$: the propagation within the plate.
- $f_3(t)$: the response of the transducer.

Having enough previous information on $f_2(t)$ and $f_3(t)$, signal-processing techniques can be applied to obtain information on the characteristics of the projectile. Such techniques involve maximum detection, time-windowing, filtering, computing frequency spectrum, and quantifying energy within an appropriate band.

Calibration projectiles (22) for relating the energy of the acquired signals to the mechanical energy of the striking stones, are crucial. This does only make sense if the energy computed from the electrical signal has univocal dependence on the energy of the impact, which will be further

analyzed in this work. There are several variables that affect the result, such as the point of incidence, the point of reception (where the transducer is located), and the material and shape of the plate. It is also interesting to know how the sensor would manage simultaneous strikes. For calibration procedures, the repetitiveness of the measurements is a requisite. Therefore, it is impossible to perform such an activity by using real hail: a device that reproduces hail impacts is required.

Having a machine that simulates hail impact lets us perform repetitive experiments using controlled laboratory conditions. This device saves us, until an advanced stage of the hail-sensor project, the need for synthetic hail, which is difficult to prepare and handle. Simulating hail impacts with this device doesn't require any consumable goods: the projectiles can be reused as many times as necessary since they are not damaged upon experiment execution. All the tests needed to develop the hail sensor will be performed first with aid of the machine we present in this work. Artificial hail will be seldom necessary. Since obtaining natural hail is extremely unpredictable, it will be avoided until having an advanced prototype of the hail sensor.

This first section of the paper was an introduction to the hail problem and the utility of developing a hail-impact simulation machine. The second section presents the basis of hail-impact simulation, approaching different strategies, explaining the *Energy Matching* theory, and then detailing the requisites a hail-impact-simulation device should comply with in order to be useful for the techniques we are looking forward to performing. In the third section, the materials and methods are presented. Those are divided into a preliminary test, the design of the simulation device, which was named *SGran*, and an application of *SGran*. The fourth shows and analyses the results regarding the preliminary tests and the ones performed with the constructed device. Finally, in the fifth section, the conclusions and future work are presented.

2. Basis of Hail-Impact Simulation. –

2.1. Chosen strategy. - Hailstorms are very hazardous due to the elevated destructive power from the kinetic energy of the hailstones. Therefore, the quantity of major interest for the sensor is the kinetic energy at the time of impact, as considered in (23; 24; 20), which under some hypotheses is directly related to the diameter of the hailstone. Hypotheses are necessary to generate models we can work with; we use the following ones (25) (26): hailstones are homogeneous ice spheres, reach terminal velocity before the impact, are hard, and don't disintegrate upon impact. Atmospheric parameters are constant.

One way of simulating hail impact is using a compressed-air gun with spheres of ice as projectiles. This is a good choice for experiments with low impact-point-precision and impact-energy-accuracy requirements, such as testing hail-protection systems (27) or crop damage (3). This also works with medium precision and accuracy requirements, for instance testing solar panels (28), as well as jet engine air-inlet resistance to hail (29). An advantage of this impact simulation option is that it can take place in a regular-sized room.

We chose to perform experiments based on a theory known as Energy Matching (26), which will be explained in the next section. This theory justifies hail-impact calibration techniques that are performed by dropping balls of a higher density than the hail. We chose steel as a material since it has several advantages as being dense, magnetizable, robust, and solid bearing balls of several diameters are easy to find. We designed and constructed a machine for dropping the steel balls in compliance with all the requisites of the experiments to be carried out. Ideas for this device were roughly described in (26) and (30).

In our case, the point of impact is crucial for tests and calibration. For testing the response of prototype sensors to simultaneous or quasi-simultaneous strikes, it must be possible to drop two balls at the same time or with a programmed delay in the order of milliseconds. Therefore, a part

of the mechanism must be duplicated.

2.2. Energy Matching. - According to the Energy Matching theory, solid balls of a material of higher density than hail can be dropped, so that their kinetic energy at the time of impact against the sensor, $E_{ball}^{@impact}$, equals the energy that would have a natural hailstone of known characteristics falling from formation point, $E_{hail}^{@impact}$. The Energy Matching theory is based on the hypothesis that the distance traveled by the hailstone is so large, that it reaches terminal velocity, whereas the distance traveled by the ball is short enough to neglect the effect of friction against the air, thus considering the ball fall as energy conservative. Terminal velocity is the final speed that objects falling from large heights reach. It occurs when the force regarding friction with the surrounding air, which is speed dependent, equals the gravity force. In this analysis, the wind is disregarded.

The energy of the ball at the drop instant, $E_{ball}^{@drop}$, is in direct relation to the drop height, h_{drop} , as shown in Eq. (2). The impact energy of the hailstone can be calculated as in Eq. (3) (18; 26), where d is the diameter of the hailstone. After choosing the ball material, it exists only one combination (h_{drop} , d) of the ball that matches the energy and the diameter of the hailstone. This reduces the number of variables that could affect the acoustic response in the plate. Then, d and h_{drop} will be the only variables of the system, related as in Eq. (4), where ρ_h , ρ_s , and ρ_a are the mass densities of hail, steel, and air, and c_D is the drag coefficient of the atmosphere, considered a constant (26).

$$E_{ball}^{@drop} = mgh_{drop} \quad (2)$$

$$E_{hail}^{@impact} = \frac{\pi\rho_h^2g}{9\rho_ac_D} d^4 \quad (3)$$

$$h_{drop} = \frac{2}{3} \frac{\rho_h^2}{\rho_s\rho_ac_D} d \quad (4)$$

The main advantage of this technique is that impacts can be better controlled than with the compressed air gun in terms of precision and accuracy: the *SGran* solves the problem of aiming accurately and hitting repetitively. Nevertheless, though drop height is extremely reduced when using steel due to its high density, the heights needed for matching some energies are still larger than those of a regular ceiling height.

2.3. Requisites on Impact-Simulation Device. - The device is constructed to simulate the impact of hailstones in a range of diameters of [5 - 30] mm. Given that the density of steel is $7850 \frac{kg}{m^3}$, the kinetic energy will be up to 4.5 J by dropping the projectiles from the height range of $h_{drop} = [0.5 - 4]$ m. When performing experiments of double impact, the delay between strikes must be in the range [0 - 10] ms. Experiment repetitiveness is crucial: accuracy on the aimed point must be 0.5 cm, as well as precision on the impact point for repetitions. The drop-height control must be automated, with a 2 cm accuracy. Once positioned at the desired height, it must be possible to command a sequence of ball drops, without a vertical displacement. It is crucial to achieving null initial velocity. The ball drop must be triggered with the order of the user.

The electrical energy of the signals acquired with the piezoelectric diaphragms can be related to the mechanical energy that the stone transfers to the plate. The transferred mechanical energy is a part of the kinetic energy of the falling hailstone at the time of impact. The main approach for measuring the impact energy is finding a direct relation between the impact energy and the energy of the signal. For calculating the energy of the signal, it is interesting to analyze its frequency spectrum, in order to choose an appropriate frequency band to work with, avoiding frequencies for

which noise is predominant. The spectrum is strongly dependent on the frequency response of the piezoelectric transducers and the response of the sensor's plate when an impulse is applied at the impact point.

The behavior of the acoustic waves is strongly dependent on the material, shape, and dimensions of the plate. Some boundary conditions allow a richer frequency spectrum than others. The area of the plate must be big enough to catch a significant amount of hailstones during the event, but small enough for the waves to interact with the boundaries, which is beneficial for acquiring informative signals. A signal with a rich spectrum gives information of special interest for detecting the impact point. Knowing where the strike occurs may be interesting for correcting signal-energy differences when equal projectiles impact different zones of the sensor. How the plate is fixed to the ground also determines boundary conditions.

The designed device allows the use of the enumerated experimental conditions:

1. Projectiles with different kinetic energies, one at a time. Fixed impact point.
2. Projectiles with equal kinetic energies, one at a time. Variable impact point.
3. Two projectiles hitting simultaneously on different points of the plate. One of them hits at a fixed impact point. Repeat the experiment by changing the distance between both impact points.

Several characteristics of the plate will be selected as a result of this set of experiments, such as material, shape, fixation method, and position of the transducers. Preliminary experiments have shown that the plate must be fixed to a steady base for avoiding undesired movement after an impact. In real conditions, it would be fixed to the ground. The thickness of the plate depends mainly on the mechanical resistance of each material.

It is also interesting to simulate wind conditions (31) (19). This will be done by performing experiments where the impact occurs obliquely to the plate.

3. Materials and Methods. -

3.1. Preliminary Tests. - The experiments reported in this section are a first approach to the technique, using different materials of interest for the plate. A square plate is taken as a reference shape. Its area is approximately 800 cm², its thickness is 8 mm. The diameter of the balls is $d = [10; 15; 20; 25]$ mm. The aim is the plate center and the height is 1 m. Thus, $E_{ball}^{@impact} \in [40 - 600]$ mJ. An electromagnet was used to assure null initial velocity and repetitiveness. The aim point is only changed for tests regarding the impact position. Only one piezoelectric receiver is used, fixed at $(\frac{1}{2}, \frac{1}{4})$ of the plate, in normalized coordinates. The transducer is a piezoelectric diaphragm with a brass plate of 5 cm diameter and a ceramic element of 2.5 cm diameter and 0.2 mm thickness, with a resonant frequency of 3.2 kHz.

Tests have also been driven for observing whether two simultaneous impacts can be told apart. For this, we dropped two balls by using the same electromagnet.

Signals were digitized using an acquisition board (National Instruments NI USB6210) and a personal computer.

3.2. Design of the Hail-Impact Simulation Device. - The results of the preliminary tests showed the necessity to implement a calibration system. The built device (32) is formed by three main parts:

- Launcher-loader (Fig. IIIa)
- Base platform (Fig. IIIc)
- Elevator guide (Fig. IIIId)

There are two launcher-loader instances. Each one consists of a loader, which holds balls and drops them one by one to the launcher. The launcher holds a single ball until commanded to drop it. The elevator guide and the corresponding motor control the drop height. The base platform holds the sensor.

The loader works by the same principle as the cylinder of a revolver. It is a hollow cylinder with eight partitions and a rotating floor (Fig. IIIb). Seven of the partitions are to hold one ball at a time, the other partition has a hole in the floor at the time of being loaded, so it must remain empty. The hole in the floor matches the shape and size of a partition. The floor turns around so that the hole advances one partition every time a ball is dropped to the launcher. The loader and the launcher are connected with ramps in a manner that softly guides the ball, not shown in the figure.

The launcher is a hollow cube without a top face. A side face was replaced by a mobile door, which is moved by a stepper motor through a crank-connecting rod system. A relay-controlled electromagnet is inside the door so that it is energized before moving the door, thus catching the steel ball and taking it to the drop position. When practicing single drops, the electromagnet is deenergized as soon as the drop position is reached. When doing double drops, both electromagnets are coordinated according to the delay requirements. Afterward, the doors return to their original position.

In the launcher-loader arrangement of Fig. IIIa, the loader is fixed meanwhile the launcher can be manually set into different positions by means of a dented ruler. This lets the user change the distance between the points where the quasi-simultaneous impacts strike.

The elevator guide consists of a 0.6 m × 0.4 m × 1.5 m aluminum structure with a stepper motor. The launcher-loader devices are hosted in two roller guides that serve as tracks for vertical movement. The vertical movement is operated by the motor, with a track length of 1 m. A pulley system aids the movement. In order to achieve some of the required heights, this structure will be hung on a wall.

The base platform is to be placed on the ground. It holds the sensor and some of the electronics of the system, being every part screwed to the base. It is heavy in order to give stability to the plate at the time of the impact. It also permits manual change of the zenith angle of the plate, for simulating the effect of wind in the hailstones. The angles can be changed from 0° to 45°, in 5° steps.

3.3. Application of the Constructed Device. - An experiment was performed with the constructed device with the objective of studying if a direct relation between two energies can be found: the energy transferred to a plate by the impact of a projectile E_{ball}^{tra} and the energy of a signal that can be acquired with a piezoelectric which is fixed to the plate, E_{signal}^{acq} . A constant k satisfying Eq. (5) was sought.

$$E_{ball}^{tra} = kE_{signal}^{acq} \quad (5)$$

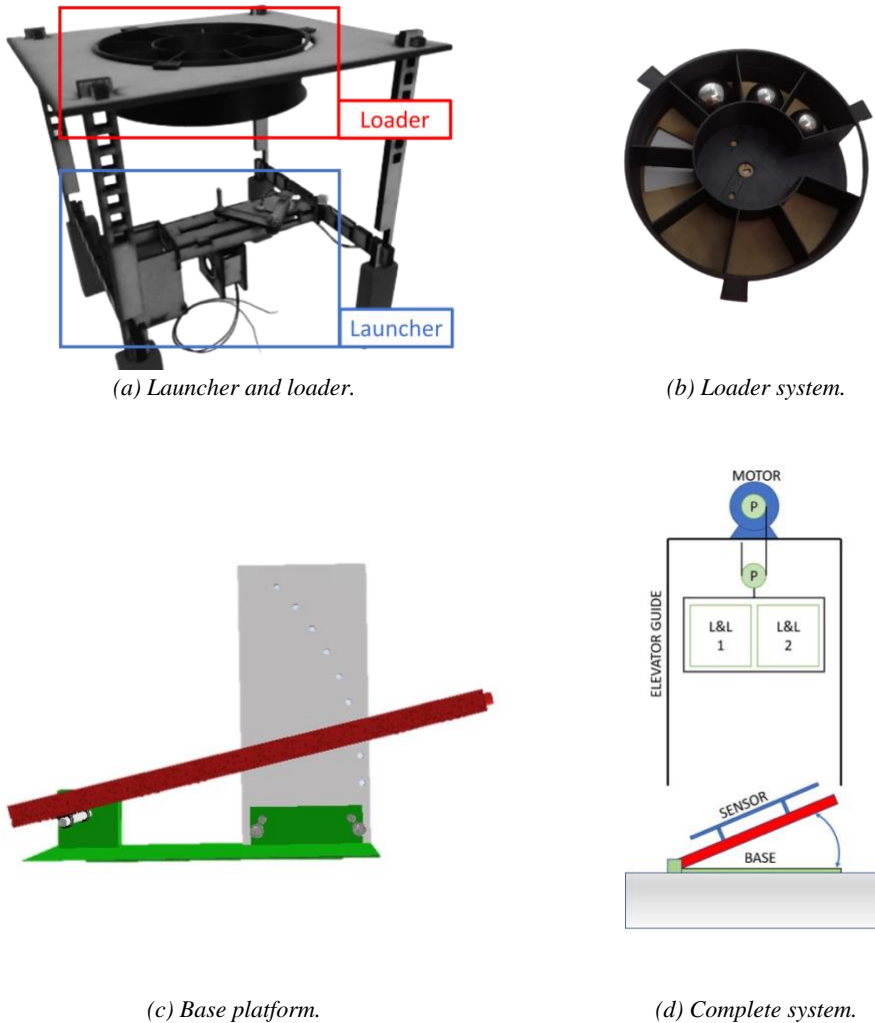


Figure III. - Main mechanical parts of the SGran.

This experiment is realized in order to verify the feasibility of identifying E_{ball}^{tra} from the signal acquired with a piezoelectric transducer. The setup is as follows. The chosen plate is the acrylic one which was described in the *Preliminary Tests* section. The aiming point is the center of the plate. Balls of sizes [10; 15; 20; 25; 30] mm were dropped from a height of 1.5 m. The experiment was performed five times with each ball size. High-speed camera videos were made for measuring the bounce height and computing E_{ball}^{tra} as the difference between the energy of the ball at the drop E_{ball}^{drop} and the energy the ball conserves $E_{ball}^{conserved}$, as in Eq. (6).

$$E_{ball}^{tra} = E_{ball}^{drop} - E_{ball}^{conserved} \quad (6)$$

Observe that E_{ball}^{drop} is the same of Eq. (2), which equals E_{ball}^{impact} , of Eq. (3). For this experiment, it is recognized that only a part of the projectile energy is transferred to the measurement system. For the final hail sensor, a calibration shall be performed, in order to relate the actually measured energy to the complete energy of the projectile at the time of impact. In the case of hail, the energy that is not transferred to the plate will mainly compound bouncing energy as well as braking energy, though some hailstones may not bounce or brake. The behavior will depend on the plate material as well as the composition of the hailstone, for which hypotheses will be necessary.

4. Results. -

4.1. Preliminary tests. - In Fig. IV, the signal when performing the explained experiment with a 25 mm ball impacting a stainless-steel square plate at the center is shown. The duration of the signal is in the order of milliseconds. The time between impact and the signal reaching its maximum is in the order of microseconds. After the maximum, the signal has a steep decay, which decelerates as a negative exponential. If useful information can be extracted from the beginning of the signal, the time between two impacts to be recognized as different ones shortens.

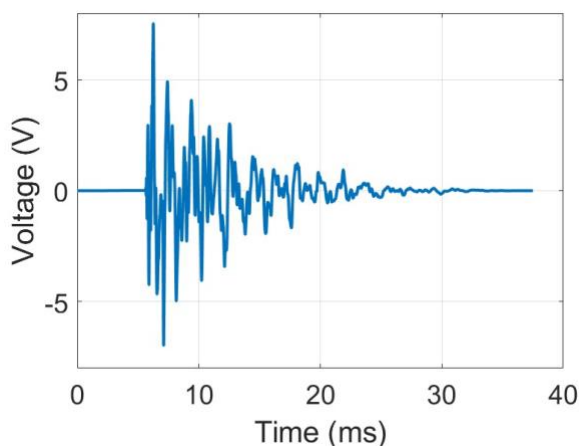


Figure IV. - Complete time signal.

Regarding repetitiveness, results show that the acquired signals are extremely similar if the experiment is thoroughly repeated. If the impact point changes, the signals change significantly. This is because the wave propagation paths are absolutely different.

Regarding energy, proportionality has been observed between the kinetic and the electrical for most of the materials. This is shown in Table I, where the energies are in percent since only proportionality is studied. The kinetic energy is calculated by using Eq. (2) and given as a percent. For each material, the mean percent energy obtained from the five repetitions at each point of the series is given. Every material is treated independently, the energies obtained with the biggest ball hitting each material is the reference for that material, corresponding to the 100% point. The energy recorded for every smaller ball is converted to the percent of its reference.

It is observed that when using either tempered glass, steel, or aluminum as the material for the plate, the bigger the ball, the higher it bounces. This relation is inverted when the plate is acrylic, resulting in higher bounces for smaller balls. This behavior is related to the transference of energy at the impact and is dependent on the elastic properties of the materials, particularly, the relation

between the steel, used for the ball and the material of the plate. This observation lead to considering the energy conserved by the ball in the experiment performed as an application of the constructed device.

4.2. Tests with Constructed Device. - The constructed *SGran* presents an excellent repetitiveness. Fig. Va shows the first 2 ms time window of acquired signals for a set of repetitions.

The energy of the signal was computed, obtaining afterward the constant that best adjusts the model of Eq. (5) in terms of mean square error, $k = 0.043$. Note that this value is strongly dependent on the experimental setup and the signal processing decisions. Regarding experimental setup, plate material, shape, dimensions, piezoelectric transducer, and position of the transducer are

d (mm)	Energy in % of that of the biggest ball.				
	Kinetic	Electric (with each plate material)			
		Glass	Steel	Aluminum	Acrylic
25	100	100	100	100	100
20	51	79	77	118	41
15	22	57	60	103	21
10	6	24	31	67	10

Table I. - Results for the experiment on proportionality of energies.

Kinetic energy is calculated as the energy of a steel ball of known diameter in free fall for a known distance. Electric energy is computed from piezoelectric-transducer signals, which convert plate vibrations provoked by the ball impacting the plate at its center into voltages. Plates of different materials are tested. Energies are given as a percent of the biggest energy of each series.

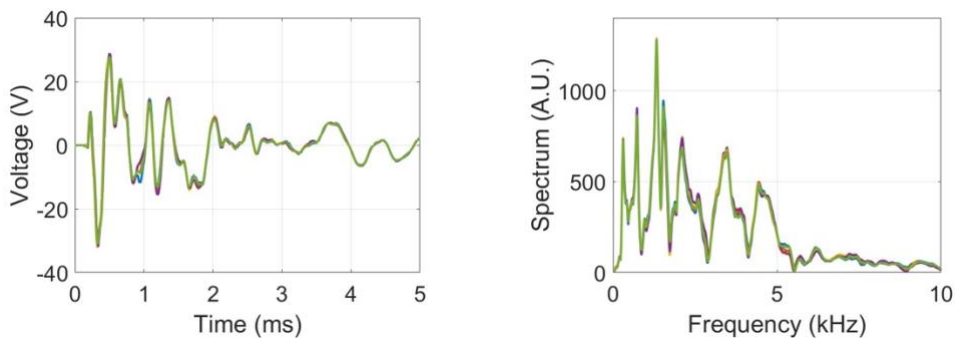


Figure V. - Results regarding five overlaid repetitions of the experiment.

Regarding signal processing decisions, significantly reducing the time window (for instance halving it) or reducing the frequency band for energy computation below 5 kHz would alter the results. If using a different setup, the same experiment shall be performed in order to obtain the corresponding constant.

The experimental results for the comparison of the energy transferred to the plate, E_{ball}^{tra} and the energy obtained from signal processing, E_{sig}^{acq} can be seen in Fig VI. E_{ball}^{tra} is computed as in Eq. (6), so the effect of bouncing does not influence the results. In the figure, E_{sig}^{acq} is multiplied by the obtained constant k , for showing the proximity of the points to the identity function. The dotted lines delimit the band where at least 50% of future observations would fall according to the linear adjustment.

5. Conclusions. - A device for automatic simulation of hail impact was designed and built in order to perform techniques based on the Energy Matching theory. The main purpose of this machine is to perform laboratory experiments that let us design and calibrate hail sensors.

Preliminary tests were performed to check the feasibility of the sensor concept. They showed a dependence between the energy of the signal and the kinetic energy of the balls in the studied kinetic energy range. It has been observed that some materials have better performance than others. In the test conditions, tempered glass, acrylic, and stainless steel present clear relations between kinetic and electric energies, whereas no relation is observed when using an aluminum plate.

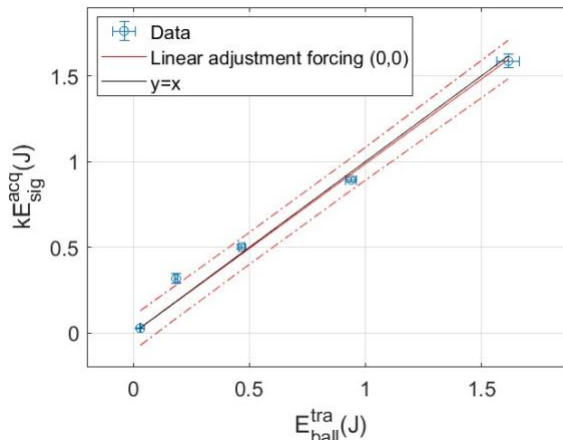


Figure VI. - Comparison of energy results. The linear adjustment is given with the band that will contain at least 50% of future observations.

The need to construct a machine with high precision and accuracy for impacts was noticed and therefore we developed the device presented in this work. The constructed device achieved excellent performance on repetitiveness: the variation in shape and amplitude of signals obtained when repeating experiments is almost negligible. It has shown to be a great aid for sensor development and calibration, which requires reproducing well-known impacts.

The results of the experiment performed with the constructed device are positive in order to continue with the intention of developing a hail sensor with an acoustic-electric principle.

In the chosen experimental setup, the energy of the acquired signals is proportional to the energy transferred to the plate. Then, it is possible to identify the energy transferred to the plate by the impact of a projectile from the signal acquired with a piezoelectric transducer. Nevertheless, more transducers would be necessary in case the restriction of the projectile impacting only at the center of the plate was withdrawn, in order to detect impact position by the technique of time of flight (33). In that case, a wider calibration would be required, compensating for the dependence on impact position.

In the immediate future, the experiment presented as an application of the constructed device will be repeated on plates of different materials. The next experiment is to check whether the tension with which the plates are screwed to the base affects or not the results. Then, an experiment will be conducted in order to observe if there are differences in the signals when different-sized balls impact the plate with the same energy. Therefore, the capability that the constructed device gives us of varying heights in a controlled manner while maintaining the impact point is essential.

After completing this basic experimental set, new procedures will be conducted for defining the characteristics of the plate. Afterward, we will thoroughly study the outcome of the plate for the

chosen design. Particularly the energy of the acquired electrical signals, regarding certain inputs of interest: the relation between the energy of measurements and kinetic energy at the time of impact, the dependence of energy of measurements with the impact point, and dependency of energy of measurements with the angle of incidence. Correction algorithms must be proposed for the dependencies, as a part of the sensor development.

6. References. -

- [1] F. Blasina, A. Echarri, G. Farber, F. Molina, S. Machin, and N. Pérez, “Why and how to construct a device for hail simulation,” in 2021 IEEE URUCON, 2021, pp. 450–454.
- [2] S. A. Changnon Jr, “Hailfall characteristics related to crop damage,” *Journal of Applied Meteorology* (1962-1982), pp. 270–274, 1971.
- [3] Y. Yue, L. Zhou, A.-x. Zhu, and X. Ye, “Vulnerability of cotton subjected to hail damage,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 1, pp. 1–21, 01 2019.
- [4] H. Seino, “On the characteristics of hail size distribution related to crop damage,” *Journal of Agricultural Meteorology*, vol. 36, no. 2, pp. 81–88, 1980.
- [5] J. Deepen, “Schadenmodellierung extremer hagelereignisse in deutschland,” Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 2006.
- [6] E. Eccel, P. Cau, K. Riemann-Campe, and F. Biasioli, “Quantitative hail monitoring in an alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables,” *International journal of climatology*, vol. 32, no. 4, pp. 503–517, 2012.
- [7] M. Aran, J. Pena, and M. Torà, “Atmospheric circulation patterns associated with hail events in lleida (catalonia),” *Atmospheric research*, vol. 100, no. 4, pp. 428–438, 2011.
- [8] L. Rijo and F. Santiñaque, “Investigación de metodologías para el análisis espacio-temporal del evento granizo en uruguay,” 2011.
- [9] G. B. Foote and C. Knight, “Hail: a review of hail science and hail suppression,” 2016.
- [10] S. A. Changnon, “The scales of hail,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 16, no. 6, pp. 626–648, 1977.
- [11] “El Observador: Hailstorm damages for US\$ 5M and 13 thousand seasonal workplaces at risk. Granizada en Salto dejó daños por US\$ 5 millones y 13 mil empleos zafrales en riesgo,” [t.ly/Bo1P](https://www.t.ly/Bo1P), 2018-06, accessed 2021-07.
- [12] “La Prensa: Hailfall generated important losses. Caída de granizo generó importantes pérdidas,” [t.ly/0fYz](https://www.t.ly/0fYz), 2020-04, accessed 2021-07.
- [13] “El Observador: Two hailstorms will cost US\$ 2.5m in indemnizations. Dos granizadas costarán US\$ 2.5 millones en indemnizaciones,” [t.ly/hXfG](https://www.t.ly/hXfG), 2017-11, accessed 2021-07.
- [14] S. Changnon, E. Fosse, and E. Lecomte, “Interactions between the atmospheric sciences and insurers in the united states,” *Weather and Climate Extremes*, 1999.
- [15] “Vehicle damage images,” <https://blog.certifiedfirst.es/2019/10/como-afecta-el-granizo-a-lacarroceria-y-los-cristales-de-tu-coche-te-cubre-el-seguro/>, 2019, 2019-10, accessed 2022-07.
- [16] L. Silveira, C. Chreties, M. Crisci, G. Usera, and J. Alonso, “Early warning system for flood forecast in Durazno city, Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno,” *Innotec*, no. 10, 2015.
- [17] “Gub.uy: Uruguay enhanced its early-flood-detection system. Uruguay potenció su Sistema de Alerta Temprana de inundación,” [t.ly/ZgRP](https://www.t.ly/ZgRP), 2020-07, accessed 2021-07.

- [18] G. Strong and E. Lozowski, "An alberta study to objectively measure hailfall intensity," *Atmosphere*, vol. 15, no. 1, pp. 33–53, 1977.
- [19] G. Morgan Jr and N. Towery, "On the role of strong winds in damage to crops by hail and its estimation with a simple instrument," *J Appl Meteorol Clim*, vol. 15, no. 8, 1976.
- [20] M. Löffler-Mang, D. Schön, and M. Landry, "Characteristics of a new automatic hail recorder," *Atmospheric research*, vol. 100, no. 4, pp. 439–446, 2011.
- [21] R. Younquist, W. Haskell, C. Immer, B. Cox, and J. Lane, "Hail monitor sensor," *Tech. Rep.*, 2009.
- [22] I. BIPM, I. IFCC, I. IUPAC, and O. ISO, "The international vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms (vim), 3rd edn. jcgmm 200: 2012," *JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology)*, 2012.
- [23] A. J. Heymsfield, I. M. Giammanco, and R. Wright, "Terminal velocities and kinetic energies of natural hailstones," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 23, 2014.
- [24] D. Schön et al., "Precipitation sensor, especially a hail sensor, and method for detecting a precipitation particle," *Apr. 25 2017*, uS Patent 9,632,211.
- [25] R. A. Schlessener and P. C. Jennings, "An energy method for relative estimates of hail intensity," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 41, no. 7, 1960.
- [26] D. Vento, "The hailpad calibration for italian hail damage documentation," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, no. 9, 1976.
- [27] G. Amilivia, G. Iztueta, and E. Roquero, "Design of a system for testing anti-hail protections. Diseño de sistema para ensayo de protecciones anti-granizo," *Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.*, 2021.
- [28] A. Majdi, M. D. Alqahtani, A. Almakytah, and M. Saleem, "Fundamental study related to the development of modular solar panel for improved durability and repairability," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 7, 2021.
- [29] Doubrava, Radek, Oberthor, Martin, Belský, Petr, and Raska, Jan, "Bird and hail stone impact resistance analysis on a jet engine composite air inlet," *MATEC Web Conf.*, vol. 188, 2018.
- [30] E. Lozowski, R. Erb, L. Wojtiw, M. Wong, G. S. Strong, R. Matson, A. Long, D. Vento, and P. Admirat, "The hail sensor intercomparison experiment," *Atmosphere-Ocean*, vol. 16, no. 1, 1978.
- [31] P. Render and H. Pan, "Experimental studies into hail impact characteristics," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 11, no. 6, pp. 1224–1230, 1995.
- [32] A. Echarri, G. Farber, and F. Molina, "SGran - diseño de dispositivo de simulación de granizo." *Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.*, 2022.
- [33] T. Kundu, S. Das, and K. V. Jata, "An improved technique for locating the point of impact from the acoustic emission data," in *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2007*, vol. 6532. SPIE, 2007, pp. 191–202.

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

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

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

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

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

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

NP 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 23).

Dr. Fernando Sánchez Sarmiento, Universidad Austral (Argentina)
Prof. Patricio Sorichetti, Universidad de Buenos Aires (Argentina)
Ing. José Zerega-Prado, Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)
Mag. Joe Frand Llerena Izquierdo, Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)
BSc. Andrés Rojas, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE (México)
Prof. Gordana Jovanovic Dolecek, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE (México)
Dra. Raquel Ayala Carabajo, Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)
Ing. Diego Ochoa Ochoa, Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)
Ing. Christopher Ochoa Malhaber, Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)
Ing. Sergio Ochoa Ochoa, Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)
Ing. Gabriel Castro Duarte, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (Brasil)
Ing. Duarte Lopes de Oliveira, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (Brasil)
Dr. Marcos Tabaré Andrade, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)
Dr. Ronnie Torres Hugues, Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción (Cuba)
Mag. Yudeimys Ymas Dávila, Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez (Cuba)
Ing. William Yoel Cano Moreto, Universidad Peruana Unión Sede Tarapoto (Perú)
Prof. Florencia Blasina, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)
Prof. Andrés Echarri, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)
Gabriel Farber, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)
Federico Molina, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)
Prof. Sofía Machin, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)
Prof. Nicolás Perez, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica (Uruguay)

Lista de Revisores – Memoria Investigaciones en Ingeniería (Número 23).

Ing. Maximiliano Stock Lorenzo, INCAE Business School (Costa Rica)
Prof. Carlos Bastero, Universidad de Navarra (España)
Dr. Óscar Müller, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
Dra. Yois Pascuas Rengifo, Universidad de la Amazonia (Colombia)
Dra. Dulce Kristal Becerra Paniagua, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
Dr. Victor Manuel Morales Rocha, Universidad Politécnica de Cataluña (España)
Dr. Augusto Villa Monte, Universidad Nacional de La Plata (Argentina)
Dr. Waldo Hasperué, Universidad Nacional de La Plata (Argentina)
Dr. Danilo Valdez-Ramirez, Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez (Cuba)
Dr. Alfonso Fernandez, Escuela Superior de Cómputo ESCOM (México)
Prof. Ariel Sabiguero, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay)
Dr. Daniel Slomovitz, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay)
Prof. Andrés Cardozo, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay)
Prof. Ing. Mauricio Riera, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay)
Dra. Susana Ortega Cisneros, Universidad de Guadalajara CUCEI (México),
Dr. Álvaro Bernal, Universidad del Valle (Colombia)
Prof. Diego Jimenez, Universidad Técnica de Cotopaxi (Ecuador).
Mag. Roberto Ruelas-Gómez, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)
Dr. Víctor Manuel Torres Puente, New York State University (Estados Unidos de América)
Prof. Rigoberto Fimia-Duarte, Universidad de Ciencias Médicas de Villa Clara (Cuba)
Dr. Gustavo Domínguez Espinosa, Universidad Politécnica de Valencia (España)
Mag. Kolima Peña, Profesora, Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez” (Cuba)
Mag. Henny Patricia Carvajal Villamizar, Universidad de Pamplona (Colombia)
Mag. Jorge Espinosa, Universidad de Concepción (Chile)
Prof. Mario Alejandro García, Universidad Tecnológica Nacional (Argentina)
Mag. Ximena Carolina Acaro Chacón, Universidad de Guayaquil (Ecuador)
Dr. Ricardo Tokio Higuti, Univeridad Estatal Paulista (Brasil)
Dr. Victor Herrero, Universidad Austral (Argentina)