

MEMORIA

Investigaciones en Ingeniería

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

Núm. 17

(2019)

Índice

	<i>Págs.</i>
<p>Diseño de redes neuronales inteligentes para la realización de pronósticos en microrredes eléctricas. <i>Intelligent neural network design for forecasting loads in electric micro networks.</i> <i>Desenho de redes neuronais inteligentes para prognosticar em micro redes eléctricas.</i> Juan Pablo Fossati</p>	1 – 18
<p>Impacto de la infraestructura en las operaciones logísticas. Gestión de carga y entrega de mercancías. <i>Impact of infrastructure on logistic operations. Loading and delivery management.</i> <i>Impacto da infraestrutura nas operações logísticas. Gestão de carga e descarga de mercadorias.</i> Gabriela Maraví, Diego Matuk y Mario Chong</p>	31 – 46
<p>Efectos de aplicar la gestión de ingresos en la industria aeronáutica. <i>Effects of the application of Revenue Management in the aeronautical industry.</i> <i>Efeitos da aplicação de gestão de ingressos na indústria aeronáutica.</i> Daniela Álvarez, Renato Quiliche, Mario Chong</p>	61 – 71
<p>Estudio exploratorio en gestión de proyectos. <i>Project Management: an exploratory study.</i> <i>Estudo exploratório em gestão de projetos.</i> Arturo Rodolfo Saenz Arteaga, Jhony Ostos M., Kerstin Bremser, Edmundo Lizarzaburu Bolaños.</p>	91 – 111
<p>Evaluación comparativa de sistemas de reconocimiento de locutor basados en los algoritmos LPC, CC y MFCC. <i>Comparative Evaluation of Speaker Recognition Systems Based on the LPC, CC and MFCC Algorithms.</i> <i>Avaliação comparativa de sistemas de reconhecimento de locutor baseado em algoritmos LPC, CC e MFCC.</i> Yesenia González, Héctor Juárez, Oscar Rocha, Rubén Hernández y Alfredo Bermúdez.</p>	121 – 136

Análisis de las principales competencias necesarias para la implementación de la Industria 4.0 en el sector agroindustrial uruguayo.

Analyzing the main competences required for the implementation of Industry 4.0 in the Uruguayan agro-industry sector.

Análise das principais competências necessárias para implementação da Indústria 4.0 em setor agroindustrial uruguaio.

Daniel Jurburg; Álvaro Cabrera

151 – 171

Modelo de minimización de costos asociados al consumo de agua en una industria de refrescos.

Minimization model of cost associated with water consumption in soft drink industry

Modelo de minimização de custos associados ao consumo de recursos hídricos em indústria de refrigerantes.

Andrea Russi da Cunha, Urivald Pawlowsky

181-200

Diseño de redes neuronales inteligentes para la realización de pronósticos en microrredes eléctricas.

Intelligent neural network design for forecasting loads in electric micro networks.

Juan Pablo Fossati¹

Recibido: 08/2018

Aceptado: 09/2019

Resumen. - Conocer de antemano los perfiles de demanda y de potencia generada por las fuentes renovables constituye un aspecto esencial para la optimización de la operación de las redes eléctricas. En el caso particular de las microrredes dicho aspecto cobra aún más importancia ya que en general un alto porcentaje de la energía generada proviene de fuentes renovables. A esto debe sumársele el hecho de que debido a un efecto de escala los parámetros a pronosticar están sometidos a una gran variabilidad. En este artículo se propone una metodología para el diseño de sistemas de pronósticos basados en redes neuronales artificiales (RNA) y algoritmos genéticos.

Palabras Clave: Redes neuronales artificiales, Pronósticos, Microrredes eléctricas, Algoritmos genéticos.

Abstract. - *Being able to predict power demand and output from renewable energy sources is an essential asset for the optimization of the performance of electric networks. In the particular case of microgrids the importance of that ability is enhanced even more so, since in general a great percentage of the energy generated comes from renewable sources. These parameters fluctuate substantially due to the scale in which they operate, so the need to predict their values acquires further significance. In this article we propose a methodology for the design of forecasting systems based on artificial neural networks (ANN).*

Keywords: *Artificial Neural Networks (ANN), Forecasting, Electric Microgrids, Genetic Algorithms.*

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Montevideo. jfossati@um.edu.uy

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

1. Introducción. - Las fuentes renovables juegan un papel cada vez más importante en la generación eléctrica. Uno de los puntos claves a la hora de optimizar la gestión de la energía generada por dichas fuentes es la elaboración de pronósticos. Por otro lado, en las dos últimas décadas las microrredes eléctricas se han presentado como un nuevo paradigma que busca desplazar al modelo tradicional de generación y consumo. En este artículo se propone una metodología para el diseño de sistemas de pronósticos basados en redes neuronales artificiales (RNA) y algoritmos genéticos. En la sección 2 del artículo se presentan algunos métodos empleados para la elaboración de pronósticos. En la sección 3 se propone una metodología de diseño de sistemas de pronósticos, en la sección 4 se analiza el desempeño de distintos sistemas de pronósticos generados por la metodología en cuestión y por último en la sección 5 se extraen las conclusiones.

2. Métodos utilizados para la realización de pronósticos. - A continuación, se describen algunas de las técnicas usualmente empleadas para la realización de pronósticos de demanda y generación de las fuentes renovables.

2.1. Métodos estadísticos:

2.1.1. Análisis de regresión. - El análisis de regresión es una de las técnicas más utilizadas para realizar pronósticos de demanda. Dicha técnica se emplea para modelar la relación entre la demanda y otros factores tales como las condiciones meteorológicas, el tipo de día, la clase de consumidores, etc. El modelo utilizado para representar la demanda P_D^t tiene la siguiente forma [1,2].

$$P_D^t = P_{De}^t + \sum_i \alpha_i \cdot \beta_i^t + \epsilon^t \quad (1)$$

donde el superíndice t hace referencia al tiempo, P_{De}^t es la demanda estándar, β_i^t la i-ésima variable independiente de la cual depende la variable a pronosticar (por ejemplo, condiciones meteorológicas), α_i es un factor de ponderación de β_i^t y ϵ^t es una componente aleatoria. Una gran parte de los trabajos relativos a regresiones lineales están enfocados en la determinación de las variables que influyen en el pronóstico de la demanda [3,4].

2.1.2. Métodos basados en series temporales. - Los métodos basados en series temporales asumen que los datos tienen una estructura interna como por ejemplo auto-correlación de los datos, tendencias, variaciones estacionales, etc. Los principales métodos existentes son el ARMA (*Autoregressive Moving Average*), el ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), ARMAX (*Autoregressive Moving Average with Exogenous Variables*), y ARIMAX (*Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables*) [2]. Los modelos ARMA son usados en general para procesos estacionarios mientras que los modelos ARIMA son usados para procesos no estacionarios.

Tanto el método ARMA como el ARIMA utilizan exclusivamente datos históricos de la variable a pronosticar mientras que el método ARIMAX permite la inclusión de otros parámetros [2]. En [5] se emplean distintos métodos basados en el modelo ARMA con el fin de predecir la velocidad y la dirección del viento a corto plazo. En [6] se utiliza un modelo ARMA para predecir la irradiación solar con el fin de gestionar adecuadamente la energía en una microrred.

2.1.3. Métodos basados en *Soft computing*. - La *soft computing* es una rama de la inteligencia artificial centrada en el diseño de sistemas inteligentes capaces de manejar adecuadamente información incierta, imprecisa y/o incompleta. El término *soft computing* engloba técnicas tales como las redes neuronales artificiales (RNA), la lógica difusa, los algoritmos evolutivos o los algoritmos basados en inteligencia de enjambre [7]. Dichas técnicas permiten modelar sistemas complejos que resultarían muy difíciles de abordar por métodos analíticos convencionales.

Otra ventaja de estos métodos es el hecho de que pueden “aprender” en ambientes caracterizados por la imprecisión y la incertidumbre. Estas características hacen que la *soft computing* sea ampliamente usada para la realización de predicciones. A continuación, se destacan algunos aspectos de las redes neuronales, ya que esta ha sido la técnica empleada en el desarrollo de los sistemas de pronósticos.

Uno de los principales desafíos que plantean las redes neuronales utilizadas para la realización de pronósticos es que no existe ningún método preconcebido para el diseño de las mismas. Por este motivo, ante un problema específico, no resulta sencillo establecer el tipo de red a usar ni los parámetros que la definen (número de capas, número de neuronas en cada capa, parámetros relativos al entrenamiento de la red, etc.). Debido a esto, una gran parte de los artículos relacionados al uso de redes neuronales en el ámbito de los pronósticos se centran en el diseño de las mismas.

En [8] por ejemplo se utiliza una red neuronal tipo *feedforward* para predecir la demanda tomándose como entradas datos históricos de consumo eléctrico, el día de la semana y la temperatura. En [9] se emplea una red neuronal del mismo tipo que la utilizada en [8] pero incluyendo el precio de la electricidad como una de las variables de entrada. En [10] se diseñan y comparan tres tipos de redes neuronales utilizadas para predecir la velocidad del viento. El entrenamiento de dichas redes se lleva a cabo por medio de un algoritmo de optimización por enjambre de partículas. En [11] se utiliza una red neuronal para predecir la irradiación en las próximas 24 horas. Como datos de entrada la red se utiliza la irradiación y la temperatura del día previo al pronóstico.

2.2. Modelos numéricos de predicción meteorológica. - Los modelos de predicción meteorológica o modelos NWP (*Numerical Weather Prediction*), son usados para predecir el estado de la atmósfera con un horizonte temporal máximo que puede variar entre 15 y 240 horas. En este tipo de métodos la atmósfera se modela por un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen las leyes físicas que regulan su comportamiento. El primer modelo NWP fue presentado a principios de siglo por el científico noruego Vilhelm Bjerknes [12]. Desde entonces se han realizado importantes avances en este tipo de métodos principalmente debido al hecho de que los adelantos en las ciencias de la informática han permitido reducir los tiempos de resolución de las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la atmósfera.

Existen en la actualidad diversas entidades que utilizan modelos NWP para realizar pronósticos a nivel global. Dos de los más destacados centros son la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Si bien los modelos globales abarcan la totalidad de la tierra, estos tienen una baja resolución espacial (16-50 km). Para mejorar este aspecto se emplean modelos regionales que son llevados a cabo por agencias nacionales o compañías privadas llegando a alcanzar resoluciones espaciales de 1 km.

En el caso de los modelos globales los datos de entrada son extraídos de redes mundiales de observación y medida. Dichos datos incluyen la temperatura, el viento, la humedad y la presión atmosférica sobre la superficie terrestre. Otras variables tales como la cubierta de nieve o la temperatura superficial de los océanos deben incluirse para establecer las condiciones de frontera del problema. Por otra parte, los modelos regionales utilizan los datos proporcionados por los modelos globales, así como datos meteorológicos propios. Los datos de salida de los modelos NWP incluyen variables tales como la temperatura, la velocidad del viento, el nivel de irradiación o la presión. La resolución temporal para este tipo de pronósticos es de entre 3 y 6 horas para los modelos globales y de una hora para los modelos regionales.

3. Metodología de diseño propuesta. - En esta sección se describe la metodología empleada para diseñar las redes neuronales de los sistemas de pronóstico de demanda y de generación de las fuentes renovables. Dicha metodología emplea algoritmos genéticos con el fin de determinar las características óptimas de las RNA.

Debido a que hay demasiados parámetros a definir, no resultaría ni eficiente ni efectivo hacer evolucionar dichas variables simultáneamente. Por este motivo, el algoritmo utilizado para el diseño de las RNA se ha dividido en tres niveles. En el primer nivel se determinan las entradas de la red neuronal. En el segundo nivel se define la arquitectura mientras que en el tercer nivel se define el entrenamiento (tasas de aprendizaje y constante de momento) y los pesos de las interconexiones. A continuación, en la Figura I, se describen los distintos niveles mencionados anteriormente.

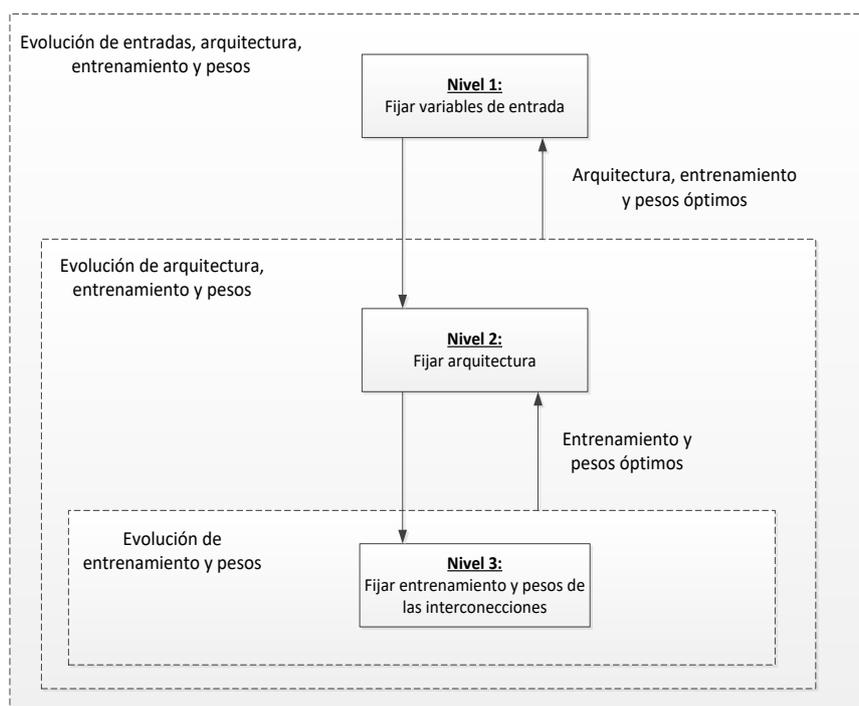


Figura I.- Esquema de la metodología utilizada para determinar el diseño óptimo de las redes neuronales.

3.1. Primer nivel. - Tal y como se mencionó en la sección anterior en el primer nivel se determina el conjunto de variables que servirán como entradas de la red neuronal. Dichas entradas no se modifican cuando se ejecutan los algoritmos de los niveles 2 y 3. Tanto para la demanda como para la potencia generada por las fuentes renovables, el conjunto de posibles entradas se ha acotado. Por este motivo, en este nivel no se utiliza un algoritmo genético para seleccionar el mejor conjunto de entradas, sino que se analizan uno a uno.

Las entradas pueden clasificarse en dos categorías. En la primera categoría se sitúan aquellas variables que aportan datos sobre las últimas 24 horas. Ejemplo de esto podrían ser la velocidad del viento en las últimas 24 horas, el consumo eléctrico el día previo o la temperatura promedio durante las últimas 24 horas etc. El segundo tipo de variables de entrada aportan datos sobre el periodo de tiempo que se quiere pronosticar, es decir sobre las siguientes 24 horas. Ejemplo de este tipo de parámetros podrían ser el día del año, el tipo de día (festivo, laborable), la hora o un pronóstico realizado por medio de un modelo numérico. Para poder definir las entradas es preciso conocer el tipo de salida requerida. A continuación, se detallan las distintas variables a pronosticar.

- Potencia generada por los paneles fotovoltaicos durante las próximas 24 horas. (24 valores en intervalos de una hora).
- Potencia generada por los aerogeneradores durante las próximas 24 horas. (24 valores en intervalos de una hora).
- Demanda eléctrica durante las próximas 24 horas. (24 valores en intervalos de una hora).

Habiendo ya definido las salidas, a continuación, se detallan el conjunto de entradas utilizadas para realizar los pronósticos.

3.1.2. Variables de entrada utilizadas para el pronóstico de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. - En esta sección se especifican las variables de entrada propuestas para el pronóstico de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos.

3.1.2.1. Una de las variables de entrada más importantes empleadas en el pronóstico de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos es la radiación extraterrestre. Para realizar las predicciones se emplean 17 valores de radiación extraterrestre correspondientes al día que se desea pronosticar y al período que va de las 5:00 horas a las 22:00 horas.

3.1.2.2. Irradiación promedio durante el día previo en plano horizontal. Se considera el período de tiempo que va de las 5:00 horas a las 22:00 horas (W/m^2).

$$\bar{G}_p = \frac{1}{17} \sum_{t=5}^{21} G^t \quad (2)$$

donde G^t es la irradiación incidente sobre la superficie terrestre en la t -ésima hora del día.

3.1.2.3. Irradiación sobre la superficie terrestre (W/m^2) durante el día previo. Se toman 17 valores correspondientes al periodo que va de las 5:00 horas a las 22:00 horas.

$$\bar{G} = [G^5, G^6, \dots, G^{21}] \quad (3)$$

Mes del año. Dado que esta variable es periódica, en lugar de ingresar un solo valor se utilizan los valores sinusoidales m_1 y m_2 tal y como se muestra en las ecuaciones (4) y (5). Esto se debe a que las variables cíclicas son mejor entendidas por las redes neuronales si se las presenta de esa manera [13].

$$m_1 = \text{sen}(2. \pi. \text{mes}/12) \quad (4)$$

$$m_2 = \text{cos}(2. \pi. \text{mes}/12) \quad (5)$$

donde mes es un número natural del 1 al 12 indicando el mes del año.

3.1.2.4. Vector de datos \bar{T}_p que contiene cuatro valores de temperatura asociados a las últimas 24 horas.

$$\bar{T}_p = [Tp_1, Tp_2, Tp_3, Tp_4] \quad (6)$$

Tp_1	Temperatura promedio de 00:00 horas a 06:00 horas
Tp_2	Temperatura promedio de 06:00 horas a 12:00 horas
Tp_3	Temperatura promedio de 12:00 horas a 18:00 horas
Tp_4	Temperatura promedio de 18:00 horas a 00:00 horas

3.1.2.5. Vector de datos \bar{P}_a con cuatro valores de presión atmosférica de últimas 24 horas.

$$\bar{P}_a = [Pa_1, Pa_2, Pa_3, Pa_4] \quad (7)$$

Pa_1	Presión atmosférica promedio de 00:00 horas a 06:00 horas
Pa_2	Presión atmosférica promedio de 06:00 horas a 12:00 horas

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

Pa_3 Presión atmosférica promedio de 12:00 horas a 18:00 horas

Pa_4 Presión atmosférica promedio de 18:00 horas a 00:00 horas

3.1.2.6. Vector de datos \overline{Hr} que contiene cuatro valores de humedad relativa asociados a las últimas 24 horas

$$\overline{Hr} = [Hr_1, Hr_2, Hr_3, Hr_4] \quad (8)$$

Hr_1 Humedad relativa promedio de 00:00 horas a 06:00 horas

Hr_2 Humedad relativa promedio de 06:00 horas a 12:00 horas

Hr_3 Humedad relativa promedio de 12:00 horas a 18:00 horas

Hr_4 Humedad relativa promedio de 18:00 horas a 00:00 horas

3.1.2.7. Es común que como variable de entrada se incluyan pronósticos provenientes de alguna agencia meteorológica [14]. A diferencia de las entradas vistas hasta el momento este tipo de parámetros provienen de modelos físicos por lo que aportan información muy valiosa. En el caso del pronóstico de la energía generada por los paneles fotovoltaicos, es de interés conocer el grado de nubosidad que presentará el día a pronosticar. Esta información se detalla por lo general de forma porcentual. Se emplean las siguientes expresiones para especificar el porcentaje del cielo que estará cubierto por nubes.

- Despejado o poco nuboso: 0-12.5%
- Parcialmente nuboso: 12.5-50%
- Nuboso: 50-62.5%
- Muy nuboso: 62.5-87.5%
- Cubierto: 87.5-100%

3.1.2.8. Para la determinación de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos se ha incluido como entrada un vector \overline{Nb} que contiene cuatro valores que indican el nivel de nubosidad del día que se desea pronosticar (ecuación (9)). Dichos valores varían entre 1 y 5 dependiendo del porcentaje de cielo cubierto. (1-despejado o poco nuboso, 2-parcialmente nuboso, 3-nuboso, 4-muy nuboso, 5-cubierto).

$$\overline{Nb} = [Nb_1, Nb_2, Nb_3, Nb_4] \quad (9)$$

Nb_1 Nubosidad promedio de 05:00 horas a 10:00 horas (valor entre 1 y 5)

Nb_2 Nubosidad promedio de 10:00 horas a 14:00 horas (valor entre 1 y 5)

Nb_3 Nubosidad promedio de 14:00 horas a 18:00 horas (valor entre 1 y 5)

Nb_4 Nubosidad promedio de 18:00 horas a 22:00 horas (valor entre 1 y 5)

3.1.2.9. Si bien los datos aportados por agencias meteorológicas brindan información muy valiosa, estos son obtenidos para regiones bastante amplias. Por este motivo es importante incluir dentro de las entradas variables relativas al punto exacto en el que se desea hacer la predicción.

- Pronóstico de temperatura para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).
- Pronóstico de presión atmosférica para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).

- Pronóstico de humedad relativa para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).

3.1.3. Variables de entrada utilizadas para el pronóstico de la potencia generada por aerogeneradores. - En esta sección se especifican las variables de entrada propuestas para el pronóstico de la potencia generada por los aerogeneradores

3.1.3.1. Velocidad del viento promedio durante las últimas 24 horas.

$$\bar{V}_p = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} v^t \quad (10)$$

donde v^t es la velocidad del viento en la t -ésima hora del día.

3.1.3.2. Velocidad del viento durante las últimas 24 horas. La entrada es un vector que contiene 24 valores de velocidad (uno por cada hora del día).

$$\bar{V} = [v^1, v^2, \dots, v^{24}] \quad (11)$$

3.1.3.3. Mes del año (ecuaciones (4) y (5)).

3.1.3.4. Vector de datos \bar{T}_p que contiene cuatro valores de temperatura asociados a las últimas 24 horas (ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

3.1.3.5. Vector de datos \bar{P}_a que contiene cuatro valores de presión atmosférica asociados a las últimas 24 horas (ecuación (7)).

3.1.3.6. Vector de datos \bar{H}_r que contiene cuatro valores de humedad relativa asociados a las últimas 24 horas (ecuación (8)).

3.1.3.7. Al igual que con el pronóstico de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos, para el caso los aerogeneradores también se incluyen variables obtenidas a partir de un modelo físico. Las agencias meteorológicas brindan información acerca de la velocidad del viento ya sea indicando el valor en km/h o por medio de los siguientes términos [15].

- Calmo: 0-5 km/h
- Flojo: 15-20 km/h
- Moderado: 20-40 km/h
- Fuerte: 40-70 km/h
- Muy fuerte: 70-120 km/h
- Huracanado: superior a 120 km/h

3.1.3.8. Para la determinación de la potencia generada por los aerogeneradores se ha incluido como entrada un vector \bar{V}_{pr} que contiene cuatro valores asociados a la velocidad del viento del día que se desea pronosticar (ecuación (12)). Dichos valores varían entre 1 y 6 de acuerdo al siguiente criterio: 1-calmo, 2-flojo, 3-moderado, 4-fuerte, 5-muy fuerte, 6-huracanado.

$$\bar{V}_{pr} = [V_1, V_2, V_3, V_4] \quad (12)$$

V_1 Velocidad del viento promedio de 00:00 horas a 06:00 horas (valor entre 1 y 6)

V_2 Velocidad del viento promedio de 06:00 horas a 12:00 horas (valor entre 1 y 6)

V_3 Velocidad del viento promedio de 12:00 horas a 18:00 horas (valor entre 1 y 6)

V_4 Velocidad del viento promedio de 18:00 horas a 00:00 horas (valor entre 1 y 6)

- 3.1.3.9. Pronóstico de temperatura para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).
- 3.1.3.10. Pronóstico de presión atmosférica para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).
- 3.1.3.11. Pronóstico de humedad relativa para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).

3.1.4. Variables de entrada utilizadas para el pronóstico de la demanda eléctrica. - En esta sección se especifican las variables de entrada propuestas para el pronóstico de la demanda eléctrica. Luego se definen los conjuntos de entradas a ser evaluados durante el proceso de diseño. Cabe señalar que, en comparación con la potencia generada por las fuentes renovables, la demanda eléctrica es un fenómeno mucho más cíclico y depende de menos variables.

3.1.4.1. Mes del año (ecuaciones (4) y (5)).

3.1.4.2. Día de la semana que se representa mediante dos valores sinusoidales.

$$d_1 = \text{seno}(2. \pi. \text{dia}/7) \quad (13)$$

$$d_2 = \text{cos}(2. \pi. \text{dia}/7) \quad (14)$$

donde *dia* es un número natural del 1 al 7 utilizado para designar el día de la semana.

3.1.4.3. Demanda eléctrica durante las últimas 24 horas. Los datos se ingresan en forma de un vector \bar{P}_D que contiene 24 valores de potencia (un valor por cada hora del día).

$$\bar{P}_D = [P_D^1, P_D^2, \dots, P_D^{24}] \quad (15)$$

3.1.4.4. Tipo de día según si es o no laborable (“0” para laborable, “1” para no laborable).

3.1.4.5. Pronóstico de temperatura para las siguientes 24 horas (se utiliza el promedio diario).

3.1.5. Conjunto de entradas seleccionadas para el primer nivel. - Con el fin de determinar los parámetros de entrada óptimos para cada variable a pronosticar, las entradas se han agrupado en una serie de conjuntos que se detallan a continuación. Para identificar a las entradas se han utilizado los números asignados en las secciones anteriores.

Potencia generada por los paneles solares

- Conjunto de variables de entrada 1: todas las variables (del 1 al 11).
- Conjunto de variables de entrada 2: 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.
- Conjunto de variables de entrada 3: 1, 2, 4, 5, 8, 9.
- Conjunto de variables de entrada 4: 1, 2, 4, 6, 8, 10.
- Conjunto de variables de entrada 5: 1, 2, 4, 7, 8, 11.

Potencia generada por los aerogeneradores

- Conjunto de variables de entrada 1: 2, 7.
- Conjunto de variables de entrada 2: 1, 2, 3, 4, 7, 8.
- Conjunto de variables de entrada 3: 1, 2, 3, 5, 7, 9.
- Conjunto de variables de entrada 4: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.
- Conjunto de variables de entrada 5: 1, 2, 3, 6, 7, 10.

Demanda eléctrica

- Conjunto de variables de entrada 1: 1, 2, 3, 4, 5.
- Conjunto de variables de entrada 2: 1, 2, 3.
- Conjunto de variables de entrada 3: 3, 4.

3.2. Segundo nivel. - Dado que en el primer nivel se establecieron las variables empleadas como entradas, el número de neuronas en la primera capa queda automáticamente definido. En lo que respecta a la arquitectura resta entonces fijar el número de capas intermedias (1 o 2), el número de neuronas por capa (para las capas intermedias) y las funciones de transferencia. Debido a que usualmente se utiliza un mismo tipo de función de transferencia para una misma capa, este ha sido el modelo adoptado.

En el caso de las redes neuronales aplicar el operador cruce puede generar descendientes que guarden muy poca relación con sus progenitores en lo que respecta al desempeño. Por este motivo en el algoritmo empleado para el diseño de la arquitectura, y al igual que en [16], se emplean únicamente operadores mutación. Como puede verse en la Figura II, en cada cromosoma se representan los números de neuronas en la primera capa oculta, el número de neuronas en la segunda capa oculta y las funciones de transferencia utilizadas en las distintas capas.

Número de neuronas en la primera capa oculta (N1)	Número de neuronas en la segunda capa oculta (N2)	Tipo de función de transferencia utilizada en la capa de entrada	Tipo de función de transferencia utilizada en la primera capa oculta	Tipo de función de transferencia utilizada en la segunda capa oculta	Tipo de función de transferencia utilizada en la capa de salida
---	---	--	--	--	---

Figura II. Codificación de la arquitectura de la red neuronal.

3.3. Tercer nivel. - En el tercer nivel se entrenan y evalúan las distintas arquitecturas provenientes del nivel secundario. Como se dijo anteriormente los algoritmos basados en el método del gradiente son buenos para encontrar óptimos siempre y cuando se parta de una solución adecuada. De forma inversa, los algoritmos genéticos son buenos buscando soluciones en espacios de búsqueda amplios y con múltiples óptimos locales, pero no son tan eficientes una vez que el espacio de búsqueda ha sido restringido. Por este motivo se ha optado por realizar el entrenamiento por medio de un algoritmo híbrido; éste combina un algoritmo genético con el algoritmo *backpropagation* con momento. La idea es aplicar en primer lugar un algoritmo genético con el fin de determinar los pesos de las interconexiones iniciales que serán utilizados por el algoritmo *backpropagation* con momento. De esta forma se pretende evitar que el algoritmo *backpropagation* con momento converja prematuramente a un óptimo local.

Otro punto a considerar es la determinación de la tasa de aprendizaje γ y la constante de momento τ . Tal y como se mencionó anteriormente, encontrar unos valores adecuados de estas dos variables es fundamental para evitar que el algoritmo oscile o converja prematuramente.

4. Resultados. - En esta sección se presentan los sistemas de pronósticos desarrollados para la previsión de la demanda eléctrica y la potencia generada por los paneles solares y aerogeneradores. Para cada uno de los sistemas se detallan las principales características de la red neuronal y se evalúa la performance de la misma en base al error medio absoluto porcentual (EMAP). Para evaluar el desempeño de las redes neuronales se emplearon un año de datos meteorológicos de la agencia vasca de meteorología y de consumo eléctrico de la ciudad de Pamplona.

4.1. RNA para predecir la generación solar

4.1.2. Características. - A continuación, se describe la red neuronal obtenida tras la aplicación de la metodología propuesta. La red neuronal tiene 53 neuronas en la capa de entrada y cuenta con una sola capa intermedia de 42 neuronas. En las capas de entrada y de salida se emplean funciones sigmoideas, mientras que en la capa intermedia se utilizan tangentes hiperbólicas. En lo que respecta al entrenamiento, se han utilizado datos históricos relativos a los últimos 5 años, los cuales han sido extraídos de la agencia vasca de meteorología [17]. Por último, para la arquitectura en cuestión, se ha determinado que la tasa de aprendizaje y la constante de momento óptima son las siguientes: $\tau = 0.44$ y $\gamma = 0.082$.

4.1.3. Desempeño. - La figura III muestra el desempeño de la red neuronal en función del tipo de día, es decir el nivel de nubosidad.

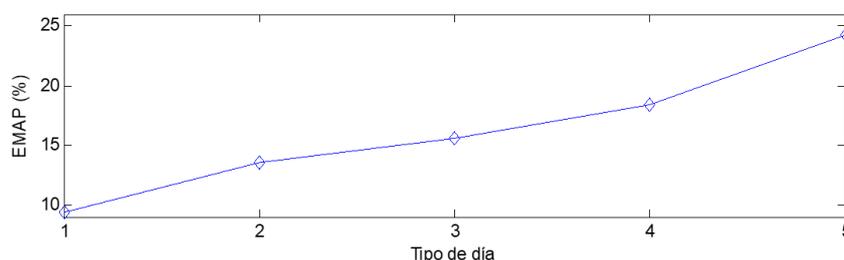


Figura III. Desempeño en función del nivel de nubosidad

4.2. RNA para predecir generación eólica.

4.2.1. Características. - A continuación, se describe la red neuronal obtenida tras la aplicación de la metodología propuesta. La capa de entrada tiene por lo tanto un total de 45 neuronas. La red neuronal cuenta a su vez con dos capas intermedias siendo la primera de 23 neuronas y la segunda de 18. En la capa de entrada se emplean funciones de transferencia lineales, mientras que en las restantes capas se emplean funciones sigmoideas. En lo que respecta al entrenamiento, se han utilizado datos históricos relativos a los últimos 5 años los cuales han sido extraídos de la agencia vasca de meteorología [15]. Por último, para la arquitectura en cuestión se ha determinado que la tasa de aprendizaje y la constante de momento óptima son las siguientes: $\gamma = 0.023$ y $\tau = 0.86$.

4.2.2. Desempeño. - La figura IV muestra el desempeño de la red neuronal en función del tipo de día, es decir el nivel de viento.

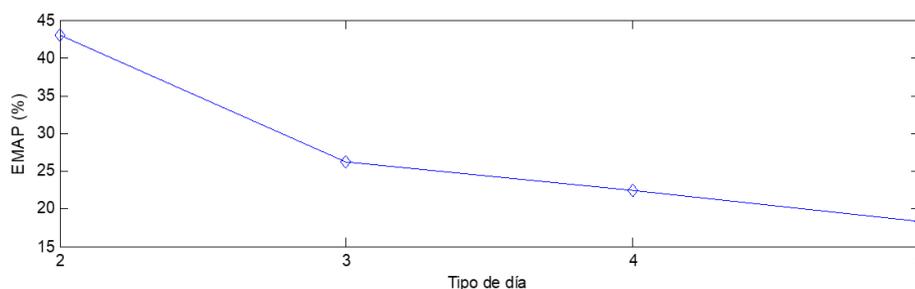


Figura IV: Desempeño en función del nivel de viento

4.3. RNA para predecir la demanda eléctrica.

4.3.1. Características. - A continuación, se describe la red neuronal obtenida tras la aplicación de la metodología propuesta. La red neuronal posee una sola capa intermedia la cual consta de 21 neuronas. Tanto la capa intermedia como la capa de salida emplean funciones sigmoideas, mientras que la capa de entrada utiliza funciones lineales. Se ha determinado que la tasa de aprendizaje y la constante de momento óptimas son: $\gamma = 0.12$ y $\tau = 0.23$

4.3.2. Desempeño. - La figura V muestra el desempeño de la red neuronal en función del tipo de día. Se emplean los números 1, 2 y 3 para designar respectivamente los días de semana, los sábados y los domingos.

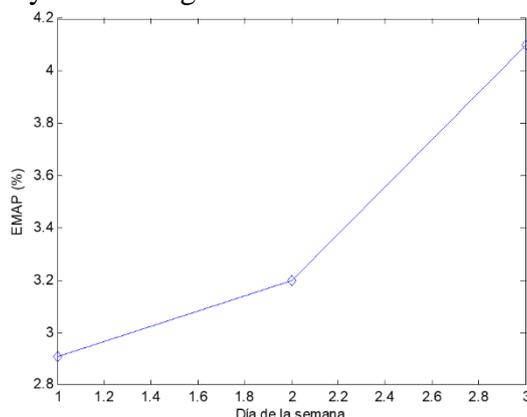


Figura V: Desempeño en función de los días de la semana

5. Conclusiones. - En el presente artículo se verificó la eficacia de las redes neuronales en lo que respecta a la realización de pronósticos. El mayor problema al que se debe hacer frente al crear una red neuronal para realizar predicciones es que no existe ningún método preconcebido para dicho fin. La metodología propuesta, así como los algoritmos genéticos han demostrado ser una herramienta muy útil a la hora de optimizar el diseño de las RNAs.

6. Referencias

- [1] A. K. Singh, I. Ibraheem, S. Khatoun, M. Muazzam and D. Chaturvedi, "Load forecasting techniques and methodologies: A review," in *Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2012 2nd International Conference on*, 2012, pp. 1-10.
- [2] A. K. Singh, S. K. Ibraheem and M. Muazzam, "An Overview of Electricity Demand Forecasting Techniques," *Network and Complex Systems*, vol. 3, pp. 38-48, 2013.
- [3] S. Ruzic, A. Vuckovic and N. Nikolic, "Weather sensitive method for short term load forecasting in electric power utility of Serbia," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 1581-1586, 2003.
- [4] R. F. Engle, C. Mustafa and J. Rice, "Modelling peak electricity demand," *J. Forecast.*, vol. 11, pp. 241-251, 1992.
- [5] E. Erdem and J. Shi, "ARMA based approaches for forecasting the tuple of wind speed and direction," *Appl. Energy*, vol. 88, pp. 1405-1414, 2011.

- [6] R. Huang, T. Huang, R. Gadh and N. Li, "Solar generation prediction using the ARMA model in a laboratory-level micro-grid," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*, 2012, pp. 528-533.
- [7] L. Magdalena, "What is soft computing? revisiting possible answers," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 3, pp. 148-159, 2010.
- [8] A. Bakirtzis, V. Petridis, S. Kiartzis, M. Alexiadis and A. Maissis, "A neural network short term load forecasting model for the Greek power system," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 858-863, 1996.
- [9] H. Chen, C. A. Canizares and A. Singh, "ANN-based short-term load forecasting in electricity markets," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, 2001, pp. 411-415.
- [10] R. L. Welch, S. M. Ruffing and G. K. Venayagamoorthy, "Comparison of feedforward and feedback neural network architectures for short term wind speed prediction," in *Neural Networks, 2009. IJCNN 2009. International Joint Conference on*, 2009, pp. 3335-3340.
- [11] A. Mellit and A. M. Pavan, "A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy," *Solar Energy*, vol. 84, pp. 807-821, 2010.
- [12] P. Lynch, "The origins of computer weather prediction and climate modeling," *Journal of Computational Physics*, vol. 227, pp. 3431-3444, 2008.
- [13] L. Hernandez, C. Baladrón, J. M. Aguiar, B. Carro, A. J. Sanchez-Esguevillas and J. Lloret, "Short-term load forecasting for microgrids based on artificial neural networks," *Energies*, vol. 6, pp. 1385-1408, 2013.
- [14] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu and G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 5, pp. 258-267, 2011.
- [15] (16 de noviembre, 2014). *Agencia vasca de meteorología (manual de estilo)*. DOI: http://www.euskalmet.euskadi.net/s075853x/es/contenidos/informacion/manual_estilo/es_9900/es_nubosidad.html.
- [16] F. Heimes, G. Zalesski, W. Land Jr and M. Oshima, "Traditional and evolved dynamic neural networks for aircraft simulation," in *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on*, 1997, pp. 1995-2000.

Impacto de la infraestructura en las operaciones logísticas Gestión de carga y entrega de mercancías

*Impact of infrastructure on logistic operations
Loading and delivery management*

Gabriela Maraví¹, Diego Matuk² y Mario Chong³

Recibido: 08/2018

Aceptado: 07/2019

Resumen. - El rápido crecimiento de la población urbana ha generado el incremento de la demanda de bienes y servicios; asimismo, de las operaciones de distribución para satisfacer las necesidades propias de los clientes actuales. Ante esta situación, hay aspectos que representan un reto para la distribución de mercancías en las ciudades: la infraestructura en logística con su gestión de operaciones de carga y descarga, las entregas de mercancías, las regulaciones adecuadas, las vías, la señalización y los espacios públicos para el desenvolvimiento de las actividades humanas. Las bahías de carga y descarga son espacios de estacionamiento públicos o privados. Están destinados para realizar operaciones de abastecimiento y logística inversa de la cadena de suministros en los centros y puntos de distribución por vehículos de diversas características, de acuerdo con la operación de diferentes productos y servicios. Estas zonas facilitan la entrega de mercancías ya que reducen el impacto en la congestión del tráfico vehicular y favorecen la sostenibilidad ambiental de la ciudad.

El presente artículo da a conocer las características de la infraestructura logística de la zona comercial de Chosica, ubicada en el distrito de Lurigancho en el departamento de Lima (Perú). También presenta la problemática de la ciudad, asociada a la ausencia de una política de carga y descarga de mercancías; del mismo modo, propone una integración de iniciativas para mejorar la distribución de mercancías en la zona. Para la caracterización de Chosica se utilizó la metodología del kilómetro cuadrado (km²), propuesta por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) con el inventario de comercios (generadores de carga), regulaciones y vías; y la observación y análisis de sus dinámicas y comportamiento en el frente más denso con sus disrupciones, entregas de mercancías y vehículos. De acuerdo con la caracterización de las condiciones de esta zona comercial y su generación de carga, se proponen políticas públicas y mejores prácticas para el desarrollo urbano y sostenibilidad de la ciudad. Los resultados muestran deficiencia en la infraestructura y en las instalaciones físicas para la operación de los flujos de la cadena de suministros; por otro lado, su influencia en el transporte, el inventario y el aprovisionamiento, desde la perspectiva de los operadores logísticos, se presentan con una pérdida en la eficiencia en el reparto de mercancías, reflejada en el precio final al consumidor. Las propuestas para la gestión de cargas y entregas de mercancías presentan el uso multimodal del espacio urbano y la adaptación de cada frente con el objetivo de mantener un equilibrio

¹Universidad del Pacífico, e-mail ga.maraviv@up.edu.pe ORCID 0000-0003-0732-7658

²Universidad del Pacífico e-mail dm.matukb@up.edu.pe ORCID 0000-0002-0749-2920

³Universidad del Pacífico e-mail m.chong@up.edu.pe ORCID 0000-0002-1231-0992

entre las necesidades de abastecimiento de los comercios y la demanda de los ciudadanos, la movilidad de la ciudad y la sostenibilidad de este ambiente creado por el ser humano.

Palabras clave: operaciones logísticas; distribución de mercancías; bahías de carga y descarga.

Abstract. -The rapid growth of the urban population generates an increase the demand for goods and services, and the distribution operations to meet their requirements. In these cases, the infrastructure in logistics operations with the adequate loading and unloading operations, the delivery management, the regulations, the ways, the regulations and the public spaces layout for human activities, represents a challenge for the goods distribution in the cities. The loading and unloading docks are public or private parking spaces for the efficient supply and inverse logistics supply operations, in the distribution centers and points of distribution by vehicles of different classes, according the operation characteristics of the products and services. These zones facilitate the delivery of goods, reduce the impact on traffic congestion and the environmental sustainability of the city.

This paper characterizes the logistics infrastructure in the commercial zone of Chosica, located in the district of Lurigancho-Chosica, department of Lima, Peru. This paper presents the city characteristics with the absence of a freight loading and unloading policies and proposes the integration of initiatives to improve the goods distribution in the area. The methodology used for the characterization of Chosica was the methodology of square kilometer (km²) proposed by the Massachusetts Institute of Technology (MIT) with the commercial inventory (load generators), regulations and roads; and the observation and analysis of its dynamics and behavior on the densest front with its disruptions, deliveries and vehicles. According to the conditions characterization of this commercial zone and its cargo generation, public policies and best practices for urban development and city sustainability are proposed. The results show a deficiency in the infrastructure and the physical facilities for an efficient operation of supply chain flows, their influences on transportation, inventory and supply from the perspective of logistics operators with an inefficient distribution of goods, reflected in the price. The proposals for loads and deliveries of goods management present the multimodal use of the urban space and the review of each front in order to maintain a balance between the supply of the commerce and the demand of the citizens, the mobility of the city and the sustainability of this environment created by the human being.

Keywords: logistic operations; distribution of goods; loading and unloading docks.

1. Introducción. - El crecimiento de la población en las ciudades genera un incremento de la demanda por bienes y servicios. En virtud de ello, el proceso de carga y descarga de mercancías es una función importante y frecuente en el sistema de transporte urbano. El aumento de las necesidades se evidencia mediante la cantidad de personas en las zonas urbanas: en el año 2000, ascendía a 46,70%; en 2007, 50,15% y para el 2017, 54,74% o más de 4 000 millones de personas [1]. Debido al aumento considerable de pobladores en zonas urbanas, y su demanda proporcional de productos y servicios, las operaciones logísticas se convierten en un factor importante y complejo para atender estas solicitudes. Las ciudades soportan una mayor circulación de transporte de carga, la cual representa entre el 10% y el 20% del tráfico interno actualmente [2]. La interacción entre el suministro y la demanda de productos ha evolucionado de manera exponencial al ritmo de los negocios, con una personalización creciente en las entregas y en la digitalización de las operaciones. A pesar de los cambios presentados, estos ambientes de negocios están sujetos a las condiciones de las ciudades: la infraestructura (vías, estacionamientos, áreas de carga y descarga, almacenes), la señalización y el espacio público con una dinámica diferente; lo cual, representa un problema para la distribución de mercancías [3], considerando sus externalidades como la congestión de tráfico, ruido, contaminación ambiental, inseguridad vial y disminución de la competitividad de las operaciones logísticas, además de sus actividades relacionadas [4].

La función importante del transporte de carga en la actividad humana, la economía urbana y sus impactos se expresan en la necesidad de ser considerado en los planes de movilidad [5]; a pesar de ello, ha sido descuidado por los modelos, en las estrategias de transporte y en la planificación regional [6]. No obstante, los operadores de carga cumplen con proporcionar los bienes solicitados en el lugar y momento requerido, con soluciones a la medida sin una visión sistemática de la congestión; y tienden a implementarse sin mayor coordinación y regulación [7]. Las políticas públicas locales, relacionadas al transporte de mercancías, son escasas [4]. Generalmente, no es considerado como flujo en la movilidad urbana, el cuál debería organizarse de una manera más eficiente como uno de los actores en el espacio público: peatones, transporte público, transporte privado (en diferentes medios), comercios y otros [8].

Las zonas de carga y descarga de mercancías, llamadas bahías de carga y descarga, permiten la entrega de mercancías de manera rápida, sin causar interrupciones, respetando las regulaciones de transporte [9]. La ausencia de dichas normas permite que las operaciones se realicen en las vías de transporte, causando congestión vehicular [10]. En las ciudades, la escasez de bahías de carga y descarga constituyen una característica común: menos del 10% de los segmentos de la calle cuentan con estos espacios. Esto indica la poca atención a una infraestructura de carga urbana adecuada [3]. Por otro lado, en algunos lugares en el mundo sucede lo siguiente: la ciudad de París cuenta con 10 000 áreas de carga y descarga; Barcelona, con 8 000; Buenos Aires posee 750 áreas y Belo Horizonte 550 en la región central de la ciudad [11]. A pesar de estos números, la demanda creciente de los ciudadanos y el aumento desproporcional de los espacios públicos conlleva a una demanda de estacionamientos especiales, superior a la capacidad lineal de las calles [12]; en consecuencia, los transportistas se ven obligados a estacionarse en doble fila y a pagar multas por tal acción. Un claro ejemplo de esto último es Nueva York, cada unidad de transporte tiene entre \$500 y \$1 000 por mes en multas respecto al estacionamiento en zonas indebidas [13]. Si en ciudades con un desarrollo urbano amplio y planeamiento sofisticado la situación sigue siendo precaria, no puede esperarse que la situación en países en desarrollo sea mejor.

Perú es un país que, durante la última década, se encuentra en un ritmo de crecimiento económico constante. La tasa de población urbana alcanza alrededor del 80% y la densidad urbana llega a un promedio de 3 500 personas por km². Lima, su capital, alberga el 32% de la población del país con más de 10 millones de habitantes, con una demanda creciente de servicios públicos eficientes, atractivos para la inversión, además y que posibiliten una dinámica y sostenida actividad económica adecuada [1]. Una parte de estos servicios públicos se refieren a los servicios de agua, luz, comunicaciones y transporte.

Sin embargo, cabe señalar que la forma de operar, en términos logísticos, sobre todo en áreas comerciales es desorganizada. Esto se refleja en la falta de políticas públicas integradas, con el acuerdo de las partes implicadas y afectadas [14-15]. Las operaciones logísticas de distribución de mercancías en la ciudad de Lima se dan de forma desordenada, crece la congestión vehicular y se producen los embotellamientos que implican una pérdida de competitividad del país. Según el índice de competitividad 2018 del Foro Económico Mundial, Lima estaba en el puesto 63, a comparación del puesto 60 del año 2017. Según el índice de la empresa Tomtom, es la tercera ciudad más congestionada del mundo, detrás de Mumbai y Bogotá, con un índice de congestión del 58% [16]. La ciudad de Lima cuenta con pocos espacios destinados a la carga y descarga de mercancías; por ejemplo, el distrito de Miraflores tiene un área de 9,62 km² [17] y cuenta con 148 bahías de carga y descarga privadas [11]. La determinación de soluciones innovadoras de logística es importante para mejorar la distribución de mercancías en las áreas urbanas altamente congestionadas. En el presente artículo, se caracteriza la infraestructura logística de la zona comercial de Chosica en la ciudad de Lima (Perú), se analiza la problemática asociada a la falta de bahías de carga y descarga, así como se propone un conjunto de iniciativas para mejorar la distribución de mercancías en la zona.

2. Marco teórico. - La logística urbana es un eslabón de la cadena del transporte de mercancías, la cual tiene como objetivo comprender, estudiar y analizar las diferentes organizaciones con el propósito de optimizar las actividades de transporte [18], cuya complejidad se evidencia conforme crece la población y sus requerimientos [19]. Según Dablanc [8] y Hall y Hesse [2], este traslado de mercancías hacia el consumidor es fundamental para la cadena de suministro, pero no está considerado en el proceso de planeamiento urbano; en consecuencia, ha obligado a las empresas proveedoras a implementar medidas particulares, no siempre alineadas con el contexto urbano para poder realizar la distribución de mercancías [3]. A pesar de esto, las políticas públicas tienen como objetivo, maximizar los beneficios sociales netos con relación a las actividades de carga; a la vez que minimizan las externalidades negativas del tráfico y maximizan los flujos de carga confiables [20]. Sin embargo, la inclusión de medidas eficientes es limitada, no solo por la fragmentación de los actores del sistema urbano [4] y la importancia, sino también por el sesgo existente al transporte de pasajeros [21-22].

Holguín-Veras et. al [20] propone el proceso de toma de decisiones para el transporte urbano de mercancías con una metodología para encontrar soluciones y plantear acciones que permitan mejorar el transporte de carga. Este proceso puede ser utilizado en cualquier área geográfica, en varios tipos de planificaciones, en ventanas de tiempo de diversas duraciones y se estructura en los siguientes pasos: delimitación del problema y sus causas raíz; definición del objetivo y sus medidas de desempeño; identificación de las potenciales soluciones al problema; selección de las opciones más viables; creación de un plan de acción para su implementación y una posible prueba piloto. Los autores presentan una serie de políticas públicas de transporte como la mejora e innovación de la infraestructura, el desarrollo de

clústeres de carga, rampas para carretillas, restricciones de carga y estacionamiento, entre otras. Por su parte, Blanco y Merchán [4] presentan un conjunto de políticas públicas y soluciones de logística urbana observadas en zonas de alta congestión de Latinoamérica: restricciones al acceso de los vehículos de transporte de mercancías según sus dimensiones y el tamaño de su carga, ventanas de tiempo para las operaciones logísticas, bahías de carga y descarga de mercancías, así como espacios de transbordo de carga.

Con relación al transporte de carga, Blanco y Merchán [4] consideran que la implementación de zonas de estacionamiento destinadas para los vehículos de carga son las políticas de infraestructura de menor costo y de sencilla ejecución. Para ellos, estacionar a distancia de los locales conlleva a tiempos más largos de entrega y al aumento de sanciones contractuales. Aumentar la capacidad de estacionamiento, además de áreas para carga y descarga permite reducir la congestión a un costo bajo, como confirma Nourinejad et al. [23] en un estudio de simulación de tráfico que evaluó los impactos de estrategias alternativas de estacionamiento de carga. Adicionalmente, Holguín Veras y Sánchez-Díaz [24] prueban la efectividad de una política de entregas fuera de horario (de las 15:00 P.M. a 06:00 A.M.), la cual puede reducir hasta en un 20% el tráfico de carga. Además, este tipo de acciones permite organizar las entregas, reducir la cantidad de emisiones y costos de transporte [25].

La ciudad de Tokio es uno de los ejemplos de implementación de estos espacios. Con una ordenanza de estacionamiento fuera de la vía pública en el año 2002 obligó a todos los grandes almacenes, oficinas y bodegas a brindar bahías de carga y descarga cuando excedían una superficie mayor a 2.000 m². La ciudad de París impone la existencia de una bahía cada 100 metros en las calles de la ciudad [8]. Por su parte, Nueva York aumentó la asignación de estacionamiento para vehículos comerciales [20]. Otra iniciativa fue la implementación de un sistema de reservas para estacionamientos de carga y descarga en la ciudad de Toyota (Japón); así se redujo la cantidad de vehículos de transporte de carga en el tráfico en un 56% aproximadamente [26].

Sin embargo, la literatura recién está discutiendo el planeamiento urbano basado en datos y no hay un consenso en la actualidad. Existe una carencia de teoría y metodologías apropiadas para el manejo apropiado de transporte urbano de mercancías [27-28], los cuales son necesarios para una correcta implementación de políticas [29]. Estos modelos en su mayoría, como lo explica Mancini [30], tienden a ser optimizaciones basadas en la carga de transporte. Pero estas solo son una parte de lo requerido. No hay una política actual que permita satisfacer las demandas y requerimientos del transporte de carga, con relación a los diferentes efectos que tienen cada una [30]. Por lo tanto, es necesario integrar no solo la logística urbana, sino que, en adición, las políticas dirigidas a estos cubran el ámbito precisado.

3. Metodología. - Para la caracterización urbana de la zona comercial del distrito de Lurigancho-Chosica, se utilizó la metodología del km² propuesta por Blanco y explicada por Merchán [5] del Massachusetts Institute of Technology (MIT) [27], la cual propone la definición y posterior segmentación de la zona de estudio para luego proceder a recolectar el inventario de la zona y la observación de un frente seleccionado. La Figura I presenta los pasos de la metodología.

La primera fase de la metodología propone un inventario de la zona con los siguientes formularios: inventario de comercios, regulaciones y vías. La segunda fase tiene el propósito de observar el desenvolvimiento del frente más denso, sus factores variables (no son fijos en el corto plazo) en un periodo para establecer la cantidad de interrupciones, número de entregas y el conteo del tráfico. La observación se realizó en una semana desde las 08:00 hasta las 17:00 horas, y los formularios usuarios fueron los siguientes: entregas, interrupciones y tráfico.

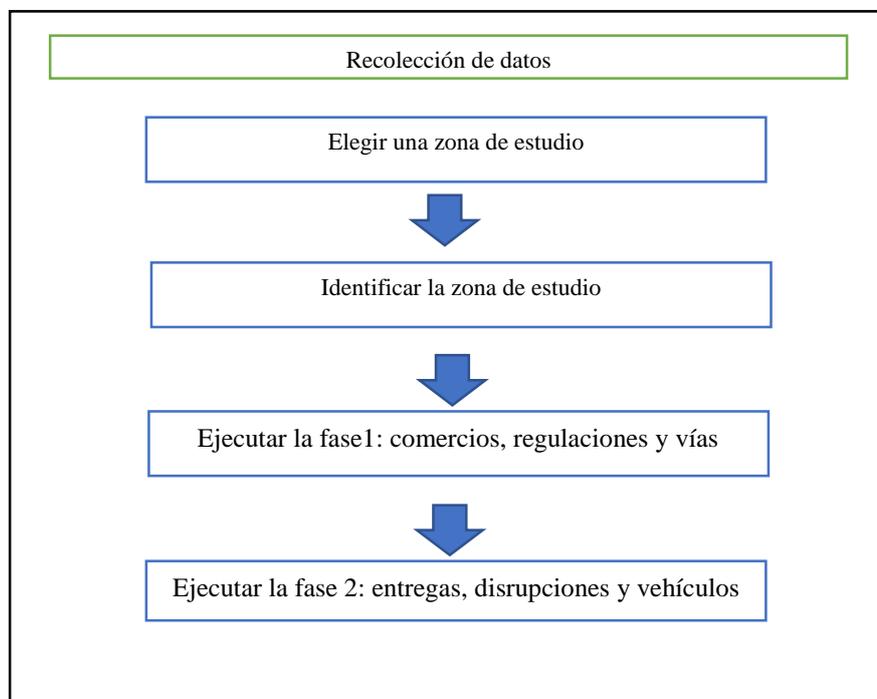


Figura I: Recolección de datos. Fuente: Massachusetts Institute of Technology [31]

4. Definición de la zona de estudio. -El área de aplicación de la metodología está ubicada en la zona comercial del distrito de Lurigancho-Chosica, en la ciudad de Lima (Perú) con una superficie de 236,47 km² [32]. La ciudad de Chosica, capital del distrito de Lurigancho-Chosica, se encuentra en la Carretera Central, vía de penetración a la sierra del Perú, con una población urbana de 173 345 habitantes para el 2017 y una densidad de 733,05 habitantes/km² [33].

La metodología se aplicó en la zona comercial de Chosica, (Figura II) y en cuatro frentes (Figura III) [34]: dos frentes en el Jr. Libertad y dos frentes en la Av. Prolongación 28 de Julio. Los frentes se codificaron de la siguiente manera: 1, ubicado en la cuadra 1 del Jr. Libertad; 2, ubicado en la cuadra 2 del Jr. Libertad; 3, ubicado en la cuadra 7 de la Av. Prolongación 28 de Julio y 4, ubicado en la cuadra 7 de la Av. Prolongación 28 de Julio.

carecen de una zona de carga y descarga, además de estacionamientos de los locales comerciales.

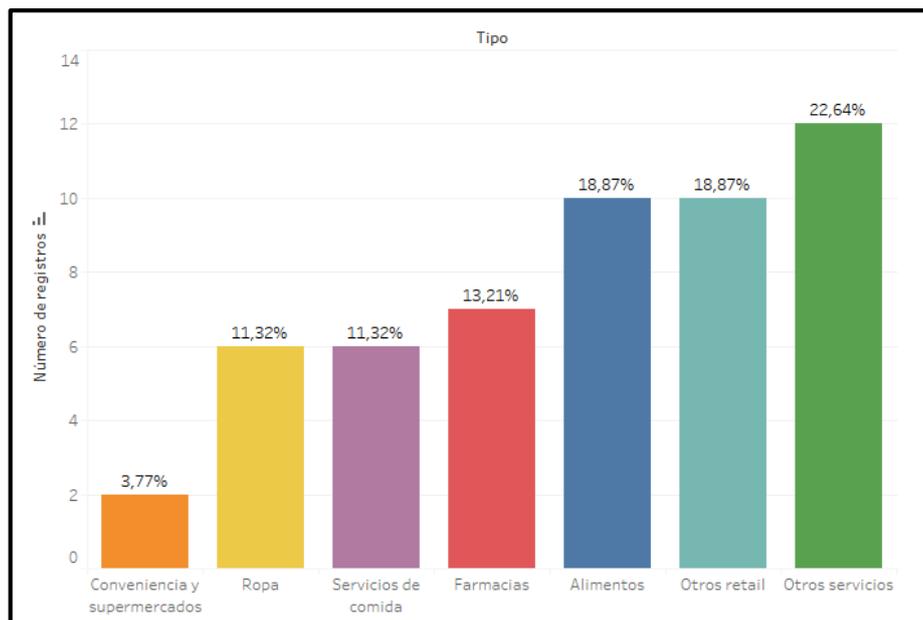


Figura IV: Proporción de tiendas según tipo de comercio. Fuente: Elaboración propia

5.2. Inventario de vías. - Las vías de las cuatro cuadras de la observación son de un sentido con dos carriles de circulación de vehículos. Se contabilizaron un total de treinta y cinco estacionamientos. Debido a la ausencia de las regulaciones y las bahías de carga y descarga, hay una competencia por el uso de los estacionamientos, así como del uso de uno de los carriles para estas operaciones, las mismas que ocasionan frecuentes congestiones vehiculares.

5.3. Inventario de regulaciones. - La ausencia de regulaciones fue una característica de atención en la primera fase. La única regulación fue la prohibición de estacionamiento al lado derecho de la vía, por el borde de la calzada o de las aceras pintadas de amarillo.

5.4. Seguimiento de entregas. - En las Figuras V-IX se analizan los frentes.

5.4.1. El primer frente fue el más concurrido, con un 50% de las entregas y una distancia promedio de 24,60 metros entre el vehículo y el establecimiento, la cual fue calculada comparando los metros de la ubicación del vehículo estacionado con los puestos, durante su abastecimiento. Los vehículos utilizados por los transportistas fueron camiones de cinco y ocho toneladas. En el primer frente, el 65% de las entregas se realizaban entre las 8:00 y las 12:00 horas con una duración promedio de 39,21 minutos. El comercio con mayor número de entregas fue un establecimiento de venta de comidas: pollos a la brasa y papas procesadas.

5.4.2. El segundo frente tuvo un comportamiento similar en la mañana, con un horario adicional entre las 13:00 y las 16:00 horas con una duración promedio en la entrega de 31,25 minutos. El movimiento de carga es considerablemente menor. Entre los comercios, se encontraron tiendas, verdulerías y una pastelería. La distancia promedio de los vehículos a los establecimientos fue de tres metros.

5.4.3. El tercer frente tuvo entregas desde las 09:00 hasta las 16:10 horas con un promedio de 40,20 minutos por entrega. Un restaurante recibió el mayor número de entregas y una cadena de farmacias el menor número de entregas. La distancia promedio de carga fue de 10,20 metros.

5.4.4. El cuarto frente tuvo el 80% de las entregas entre las 09:00 y las 12:00 horas con una duración promedio de 42,55 minutos. Los negocios con mayor número de entregas fueron dos restaurantes con el suministro de pollos y papas procesadas. La distancia promedio de los vehículos a los comercios fue de 10,80 metros.

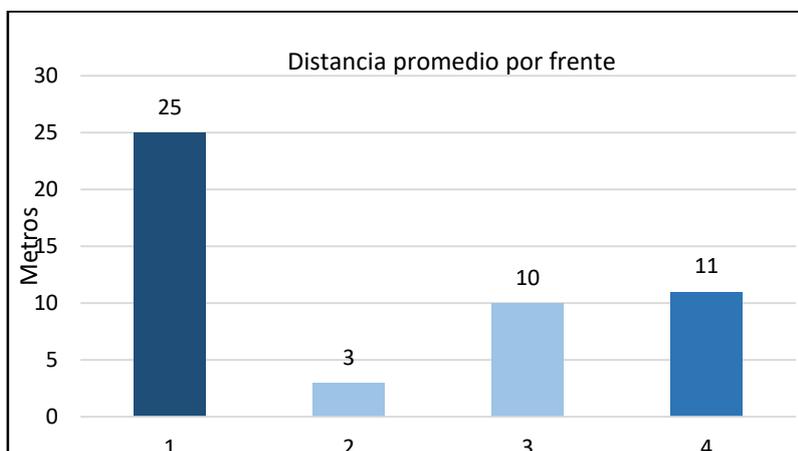


Figura V: Distancia entre la fuente de abastecimiento y los establecimientos observados. Fuente: Elaboración propia

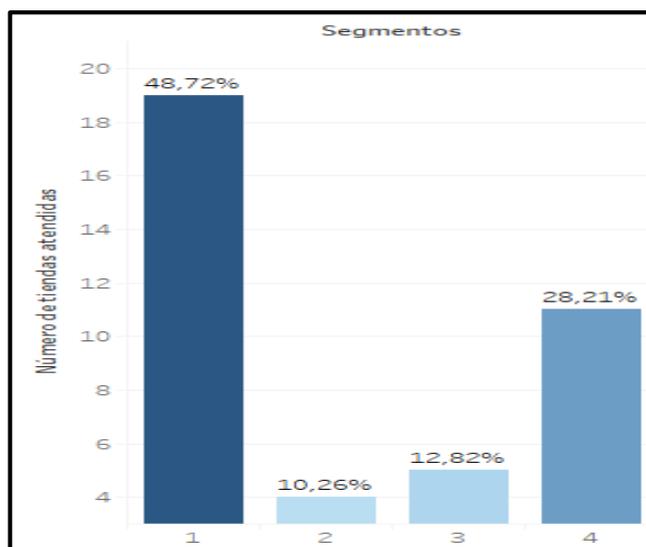


Figura VI: Proporción de entregas según frente. Fuente: Elaboración propia

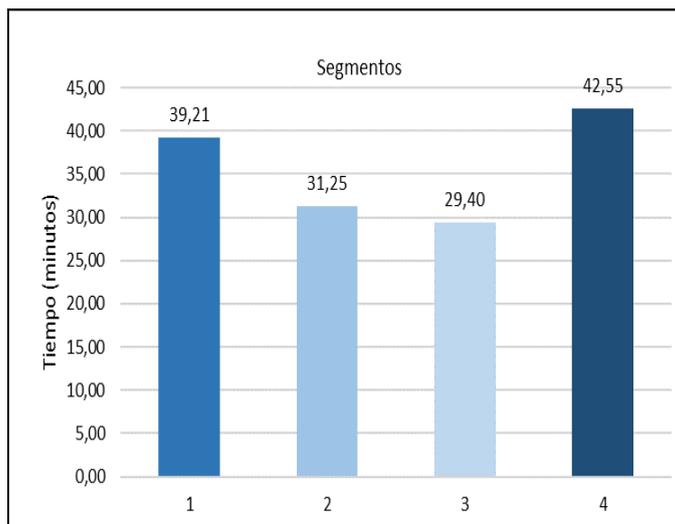


Figura VII: Tiempo en minutos para realizar las entregas. Fuente: Elaboración propia

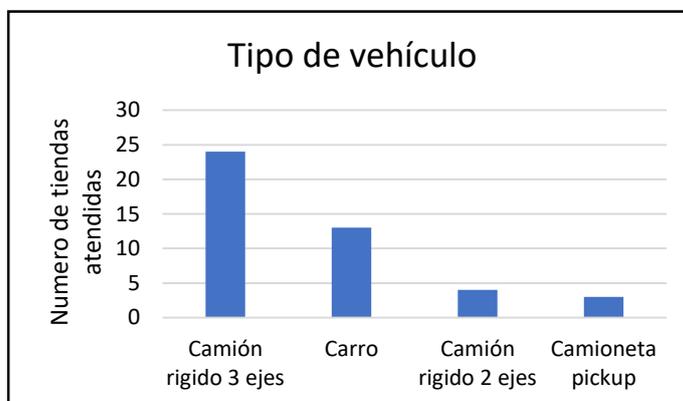


Figura VIII: Tipo de vehículo usado en las entregas. Fuente: Elaboración propia

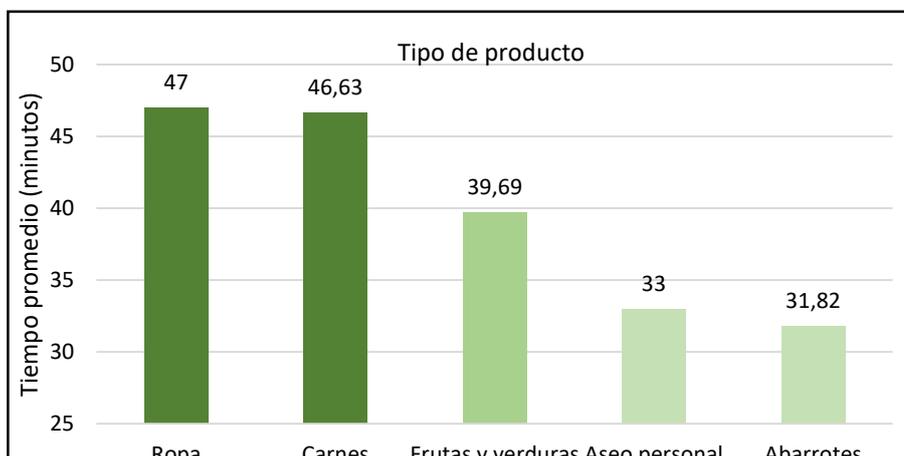


Figura IX: Tiempo promedio de duración de entrega por tipo de producto. Fuente: Elaboración propia

5.5. Disrupciones. - Durante el periodo de observación, se apreciaron setenta y nueve disrupciones. Las disrupciones más frecuentes fueron los vehículos estacionados en doble fila, estacionamiento en ambas vías, interrupciones del tráfico y de peatones. Las interrupciones

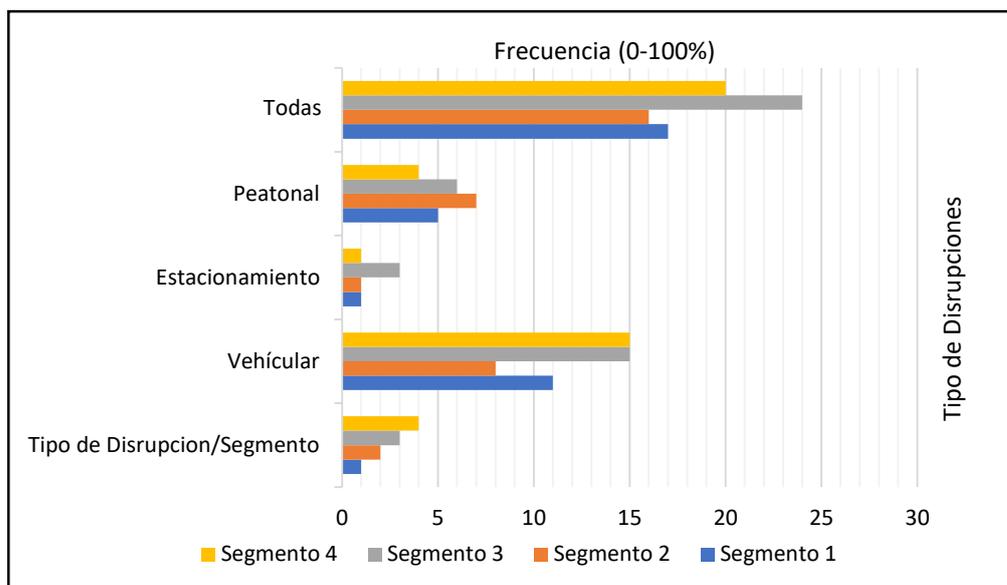
Figura X: Tipo de disrupciones por frente. Fuente: Elaboración propia

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

vehiculares en cada uno de los frentes fueron de 64%, 57%, 62,5% y 75%. La Figura X muestra las interrupciones por frente y tipo.



5.6. Flujo de vehículos y personas. - El flujo vehicular se observó entre las 08:00 y las 17:00 horas. En la Figura XI se muestra un flujo en los frentes 1 y 2; con 101 vehículos/hora y 55 personas/hora. Los frentes 3 y 4 tuvieron 138 vehículos/hora y 71 personas/hora.

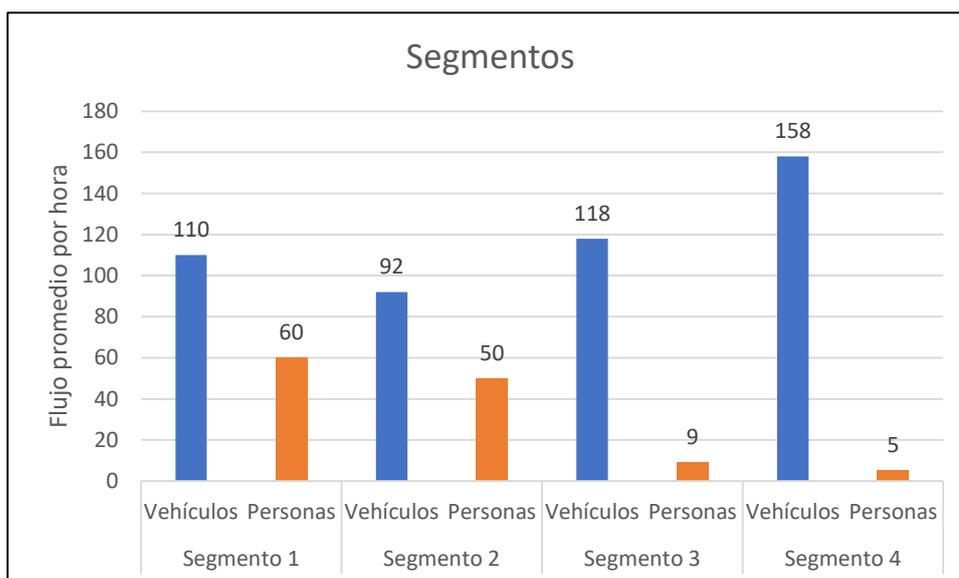


Figura XI: Flujo de tráfico promedio entre frentes. Fuente: Elaboración propia

6. Acerca de las bahías de carga y descarga. - El área comercial de Chosica no posee bahías de carga y descarga de mercancías. Los locales comerciales no poseen un estacionamiento privado; y el uso del espacio público está en constante competencia. La zona tiene 35 estacionamientos y, en muchos casos, ocupados por los comerciantes desde el inicio de la jornada laboral. Las Figuras XII y XIII muestran algunas de las interrupciones por la ausencia de las bahías de carga y descarga.



Figura XII: Auto estacionado en la vía para abastecer su mercancía a tienda minorista.
Fuente: Elaboración propia



Figura XIII: Camión estacionado en la vía para abastecer su mercancía a tienda minorista.
Fuente: Elaboración propia

7. Políticas propuestas para mejorar la distribución de mercancías en la zona. - La falta de infraestructura, el desorden en la distribución de mercancías y la congestión vehicular en la zona de Chosica evidencian una inexistente planificación urbana. En esta sección se presentará una serie de estrategias para la gestión de mercancías y entregas con el objetivo de usar, de manera adecuada, el espacio público en base a la caracterización de la zona de estudio y el impacto en los ciudadanos.

7.1. Implementación de bahías de carga y descarga. - La política de asignación del espacio en la vía para actividades de carga y descarga sería recomendable en el tercer y cuarto frente, por el estacionamiento en doble fila para estas actividades y, muchas veces, ambas vías, causado por la falta de espacios dedicados. Una eficaz implementación de esta política reduciría en un 63,64% la cantidad de interrupciones totales, apoyando a un mejor flujo vehicular, el cual mejoraría en un promedio de 7 minutos por viajes en la zona. El objetivo es reducir el tiempo de las interrupciones y evitar sanciones a los transportistas. Actualmente, se requiere una distancia mínima de 3,0 a 4,2 metros para abastecer locales [35], el segundo frente cumple con esta norma. Esta política se ha aplicado en San Francisco, donde tomó la decisión de ampliar las aceras y designar el uso compartido de la vía para actividades de estacionamiento

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

y carga. En Washington DC, un estudio de flete en la vía recomendó proporcionar espacios de estacionamiento y carga más largos [36]. Otras recomendaciones son aumentar el tamaño de las áreas de carga a 30 metros lineales [20]. El Departamento de Transporte de la ciudad de Nueva York aumentó los estacionamientos de carga asignados a vehículos comerciales e instaló parquímetros. La industria del transporte de mercancías ha reaccionado favorablemente a esta política y ha facilitado el flujo de los productos [20]. En Lima, se está empezado a implementar estas bahías [11] con un efecto en la competitividad económica de las ciudades al reducir los costos de transporte de carga en estos sistemas urbanos [37].

7.2. Ampliación de vías. - Los nuevos o mejorados caminos consideran los radios de giro amplio de los camiones [38]; los camiones grandes no pueden girar a la derecha sin interferir con el tráfico de sentido contrario o cortan las aceras. Un ejemplo de esta iniciativa son los corredores de carga, implementados en el Georgia Logistics en Atlanta [39]. Las vías en la zona de estudio son de un solo sentido. La ampliación de las vías permitiría reducir el tráfico, además los vehículos de carga tendrían más espacio para transitar, realizar los repartos y abordar con más seguridad los giros amplios. La ampliación de las vías reduciría aproximadamente en un 26,50% la cantidad de interrupciones totales relacionadas al uso vehicular [39]. Sin embargo, las implementaciones de proyectos viales en el Perú son altamente ineficientes con un promedio de 36,78% de atraso acumulado [40].

7.3. Implementación de rampas. - La construcción de rampas en las aceras para transportar mejoraría la eficiencia de las actividades de carga y descarga [38]. Estas rampas facilitan a los conductores la entrega de grandes cantidades de carga y reduce el tiempo en las áreas de estacionamiento y carga. Las rampas también permiten descargar los productos para una ubicación general, dividir la carga y distribuirla a varios lugares cercanos, además de contar con un único lugar de carga y descarga [20]. Del total de entregas, el 46,15% se realizó con carretillas. Estas se concentraron en el primer y cuarto frente. La implementación de rampas permitiría mejorar la productividad del abastecimiento a un bajo costo.

7.4. Regulaciones para las actividades de carga y descarga. - La implementación de bahías de carga y descarga con zonas de usos flexibles [20] fue implementada en el programa del Department of Transportation (DOT) de la ciudad de Nueva York [41]. Estas regulaciones podrían mejorar el sistema de planificación de las empresas; y reduciría el tiempo de descarga dependiendo de la ventana de abastecimiento y su posterior costo. La viabilidad de la política va a depender de las regulaciones a los operadores logísticos. Esta opción ha demostrado, a nivel mundial, una mejora en la gestión en un 69% [37]. Sin embargo, si bien la restricción podría reducir la congestión de transporte de carga y mejorar la seguridad y movilidad de la zona, su efectividad podría verse limitada por la falta de control y de incentivos. Esta fue una observación en el perfil logístico de Quito [5].

7.5. Sistemas de reserva de plazas de estacionamiento. - Los sistemas inteligentes de transporte permiten reservar plazas de estacionamientos a los conductores, y ayudan a la asignación y el uso de espacios de estacionamiento [20]. Esta política, bien implementada, puede optimizar el transporte de carga, como ya se evidencio en la ciudad de Toyota [26] Esta política sería factible en zonas altamente transcurridas, tales como el primer y cuarto frente, por las entregas. En el primer frente, un 65% de entregas se dan antes del mediodía, en comparación con 80% del cuarto frente. Esto genera una temprana congestión de vehículos de carga, generando un mayor tráfico y cantidad de interrupciones. Se estima que, si el sistema de reservas fuera eficaz, la cantidad de entregas se regularía en cuanto horas de llegada (un 50% en la mañana y un 50% en la tarde), tal y como ocurre en los frentes 2 y 3, mejorando en 12,82% de las distribuciones totales.

7.6. Carriles de uso exclusivo para camiones. - Las vías en la zona comercial de Chosica se podrían convertir en una vía exclusiva para la circulación de carga. Los carriles exclusivos permiten mejorar las operaciones, con una mayor confiabilidad de los tiempos de entrega y menores impactos ambientales y riesgo de accidentes. El desarrollo de carriles exclusivos podría darse con una adecuada planificación de las instalaciones urbanas [42]. Las experiencias y lecciones aprendidas de la implementación previa, problemas típicos que enfrentan los planificadores al principio del proceso de planificación, así como y un marco y métodos para evaluar los beneficios e impactos de las instalaciones dedicadas para camiones [20] hacen posible lograr una circulación efectiva y eficaz.

8. Conclusiones. - Las ciudades son ambientes creados por el hombre, con una interacción de múltiples sistemas con el fin de satisfacer las necesidades de los ciudadanos, dentro de una competencia constante por el uso de los espacios públicos de manera eficiente. Uno de los sistemas relacionados con el transporte y distribución es la gestión de carga y entrega de mercancías; en un sistema donde el mercado debe recibir las mercaderías, y los transportistas deben usar los espacios públicos considerando infracciones de tránsito, uso de las vías públicas y generación de gases contaminantes.

Este artículo presentó el caso de Chosica, una ciudad en Lima; y propuso alternativas para las entregas de mercancías con un uso multimodal del espacio público que contiene la implementación de bahías de carga y descarga; ampliación de las vías; implementación de rampas; regulación a las actividades de carga y estacionamiento; sistema de reserva de plazas de estacionamiento; y regulación de carriles de carga. La planificación urbana, incluyendo a todos los actores, permitió tener una ciudades más ordenada y eficiente en la distribución de mercancías. Se puede concluir que Las bahías de carga y descarga cumplen un rol importante para agilizar el flujo de las operaciones, permitirá mejorar el flujo de entrega de las mercancías a un bajo costo y de sencilla implementación.

Las tres políticas siguientes permiten, en conjunto, reducir en gran magnitud los costos de transporte de carga de la ciudad: (1) las bahías de carga y descarga reducirían en un 63,64% las interrupciones en el flujo vehicular; y reduciría el tiempo de los viajes en la zona a siete minutos, en promedio; (2) La implementación de rampas y el sistema de reservas reduciría el tiempo de respuesta en un 12,82%; y (3) las regulaciones de la carga y descarga permitirían planificar las actividades de las zonas. Sin embargo, la demanda por vías públicas seguirá siendo grande y esto representa un límite a la reducción del total de ineficiencias.

Para lograr un impacto en la zona comercial de Chosica, las políticas públicas deben contar con la participación de los *stakeholders*, sector público con los gobiernos municipales y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones; el sector público con los transportistas, comerciantes, peatones, empresas de servicios y el sector académico, con una solución estratégica basada en el consenso con la participación, la colaboración y la asociación de las entidades.

Referencias

- [1] Grupo Banco Mundial, Perú Hacia un Sistema Integrado de Ciudades. Lima: Banco Mundial, 2016.
- [2] P. Hall, M. Hesse, *Cities, Regions and Flows*. London: Routledge, 2012.
- [3] E. Blanco, A. Bateman, y D. Merchán, “Urban Metrics for Urban Logistics: Building an Atlas for Urban Freight Policy Makers,” en *International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, 2015.

- [4] E. Blanco, y D. Merchán, “Desafíos para la movilidad de carga en zonas de alta congestión,” *Economía Industrial*, no. 400, pp. 13-19, 2016.
- [5] D. Merchán, “El perfil logístico de Quito,” *Cuestiones Urbanas*, vol. 5, no. 1, pp. 93-135, 2015.
- [6] L. Dablanc, “Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 41, no. 3, pp. 280–285, 2007 doi:10.1016/j.tra.2006.05.005
- [7] L. De Oliveira, “Diagnóstico das vagas de carga e descarga para a distribuição urbana” *Journal of Transport Literature*, vol. 8, no.1, pp. 178-209, 2014.
- [8] L. Dablanc, *Freight transport for development toolkit: urban freight*. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2010.
- [9] S. Greenbaum, *Loading dock*. NIBS: Washington, 2016.
- [10] L. Dablanc, *Freight transport for development toolkit: Urban freight*. Washington: The World Bank, 2009.
- [11] Massachusetts Institute of Technology, *km2 Guide*, 2018.
- [12] M. Jaller, J. Holguín-Veras, y S. Hodge, “Parking in the city: Challenges for freight traffic,” *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2379, no.1, pp. 46–56, 2013.
- [13] J. Holguín-Veras et al., “An investigation on the effectiveness of joint receiver–carrier policies to increase truck traffic in the off-peak hours,” *Networks and Spatial Economics*, vol. 8, no. 4, pp. 327–54, 2008. doi:10.1007/s11067-006-9011-6.
- [14] Ministerio de Comercio y Turismo del Perú, *Análisis integral de la logística en el Perú*. Lima: Ministerio de Comercio y Turismo del Perú, 2016.
- [15] Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, *Mejora de la gestión urbana y territorial*. Lima: Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2017.
- [16] I. Thomson y A. Bull, *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. Santiago de Chile: CEPAL, 2001.
- [17] Municipalidad de Miraflores, *Plano urbano distrital*. Lima: Municipalidad de Miraflores, 2015.
- [18] J. Gonzalez-Feliu et al., *Sustainable Urban Logistics: Concepts, Methods and Information Systems*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi:10.1007/978-3-642-31788-0
- [19] Institut Cerdà, *Logística urbana. Ciudad y mercancías*. Barcelona: Marge Books, 2010.
- [20] J. Holguín-Veras et. al., “Improving Freight System Performance in Metropolitan Areas: A Planning Guide,” *Transportation Research Board*, Washington, NCFRP Rep. 33, 2015.
- [21] Un-Habitat, *Planning and Design for Sustainable Urban Mobility*. Abingdon: Routledge, 2013.
- [22] E. Lindholm y M. Blinge, “Assessing knowledge and awareness of the sustainable urban freight transport among Swedish local authority policy planners,” *Transport Policy*, vol. 32, pp. 124-131, 2014.
- [23] M. Nourinejad et. al. *Truck parking in urban areas: application of choice modelling within traffic simulation*. Woodstock: Canadian Transport Research Forum, 2013.
- [24] J. Holguín-Veras, I. Sánchez-Díaz, y M. Browne, “Sustainable urban freight systems and freight demand management”, *Transportation Research Procedia*, vol. 12, pp. 40-52, 2016.
- [25] J. Holguín-Veras et al, “Direct impacts of off-hour deliveries on urban freight emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 61, pp. 84-103, 2018.
- [26] PIARC, *Public Sector Governance of Urban Freight Transport*. Paris: PIARC: 2012.
- [27] E. Ballantyne y M. Lindholm, “Identifying the need for freight to be included in local authority transport planning,” en *Sustainable urban logistics: Concepts, methods and information systems*, Jesus Gonzalez-Feliu, Frédéric Semet, Jean-Louis Routhier, Eds. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 37-48.
- [28] T. Crainic, N. Ricciardi, y G. Storchi, “Models for evaluating and planning city logistics systems,” *Transportation science*, vol. 43, no. 4, pp. 432-454, 2009.
- [29] A. May et al., “An option generation tool for potential urban transport policy packages,” *Transport Policy*, vol. 20(C), pp. 162-173, 2012.

- [30] R. Danielis, L. Rotaris, y E. Marcucci, "Urban freight policies and distribution channels: a discussion based on evidence from Italian cities," *European Transport*, vol. 46, no. 46, pp.114-146, 2010.
- [31] Massachusetts Institute of Technology, Megacity Logistic Lab: Last Mile. Cambridge: Center of Transportation and Logistics, 2013.
- [32] OBNASEC, Ficha informativa sobre seguridad ciudadana del distrito de Lurigancho-Chosica. Lima: OBNASEC, 2016.
- [33] Instituto Nacional de Estadística e Informática. Perú: Población. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017.
- [34] Open Street Maps, 2018.
- [35] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Muelles de Carga y Descarga: Seguridad. NTP 1.076, 2013.
- [36] E. Jones, A. Chatterjee, y R. Marsili, "A Collaborative Plan for Curbside Freight Delivery in Washington D.C.," *ITE Journal*, vol. 79, no. 5, pp. 22–25, 2009.
- [37] I. Sánchez-Díaz et al., *Urban Freight Initiatives: State of the Art and State of the Practice*. Gothenburg: Urban Freight Platform, 2017.
- [38] K. Ogden, *Urban Goods Movement: A Guide to Policy and Planning*. Farnham: Ashgate Publishing Company, 1992.
- [39] Departamento de Transporte de Georgia. *Statewide Truck Lane Needs Identification Study*, 2007, Departamento de Transporte de Georgia
- [40] Contraloría General de la República. *Informe de Seguimiento y Monitoreo de Proyectos N° 00010-2017-CG/MPROY*. Lima: Contraloría General del Perú, 2017.
- [41] Departamento de Transporte de Nueva York. *Citywide Congested Corridors Study*. Nueva York: Departamento de Transporte de Nueva York, 2012.
- [42] J. Douglas, *Handbook for Planning Truck Facilities on Urban Highways*. New York: Parsons Brinckerhoff, 2004.

Efectos de aplicar la gestión de ingresos en la industria aeronáutica

Effects of the application of Revenue Management in the aeronautical industry

Daniela Álvarez¹ Renato Quiliche² Mario Chong³

Recibido: 08/2018

Aceptado 09/2019

Resumen. - Las aerolíneas alrededor del mundo se han visto afectadas por los desafíos de rentabilidad, participación de mercado y el comportamiento de la demanda, lo cual ha contribuido al desarrollo de la gestión de ingresos o *Revenue Management*. El modelo de gestión busca maximizar el nivel de ingreso en las empresas con la gestión de la demanda. La aplicación de este modelo en empresas de diversos rubros ha generado un incremento en sus ingresos anuales en orden del 4 a 5% favoreciendo oportunidades de negocio a través del desarrollo de nuevos mercados basados en la rentabilidad empresarial. La industria aeronáutica fue una de las pioneras en aplicar este modelo de gestión a nivel mundial. En esta oportunidad, el caso aplica el modelo en un mercado dinámico y con nuevas restricciones: mercado regional, vuelos cortos, tarifas desreguladas e impacto de las aerolíneas de bajo costo.

Palabras clave: Gestión de ingresos, rentabilidad, competencia.

Abstract. -Airlines around the world have been affected by the challenges of profitability, market share and demand behavior, which has contributed to the development of revenue management or Revenue Management. The management model seeks to maximize the level of income in companies with demand management. The application of this model in companies of various sectors has generated an increase in their annual income in order of 4 to 5% favoring business opportunities through the development of new markets based on business profitability. The aviation industry was one of the pioneers in applying this management model worldwide. On this occasion, the case applies the model in a dynamic market with new restrictions: regional market, short flights, deregulated fares and impact of low-cost airlines.

Keywords: Revenue management, profitability, competition

¹Universidad del Pacífico, alvarezada@alum.up.edu.pe . ORCID 0000-0002-4846-2605

²Universidad del Pacífico r.quilichealtamirano@up.edu.pe . ORCID 0000-0001-7937-5929

³Universidad del Pacífico, m.chong@up.edu.pe . ORCID 0000-0002-1231-0992

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

1. **Introducción.** El reporte de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA por sus siglas en inglés) de 2016 [1] presentó la influencia del transporte aéreo en la economía global y su impacto en el desarrollo de las comunidades, por la dinámica en la conexión entre ciudades, el intercambio comercial, la generación de empleo, el turismo y las inversiones directas. Sin embargo, las diversas aerolíneas alrededor del mundo han enfrentado problemas relacionados a rentabilidad, participación en el mercado, demanda fluctuante y aparición de las aerolíneas de bajo costo (low cost).

En el caso del Perú, el transporte aéreo tiene un rol significativo para el desarrollo de las comunidades y el intercambio comercial de productos diferenciados y valorados en los mercados globales [1], todo esto debido a la diversidad, agreste geográfica y al centralismo de su capital, Lima. Esta industria genera en este contexto aproximadamente 4,4 mil millones de Dólares Americanos al año, con una participación del 2,1% del Producto Bruto Interno (PBI) del país. Esta industria participa en un mercado de competencia monopolística de características oligopólicas, con actores nacionales e internacionales, mercado competitivo, con tasas de crecimiento atractivas y enfocado en el precio, así como en la promoción. Las estrategias enfocadas en costo han generado una coyuntura interesante, en un entorno logístico basado principalmente en transporte terrestre. A pesar del entorno, en un país de casi 33 millones de habitantes, se generó un flujo interno de más de 11 millones de pasajeros en el año 2017, con un aumento del 8,5% con referencia al año anterior [3]. La participación en el mercado interno está dominada por Aerolínea 1, por sus precios, destinos y frecuencias, frente a los actores presentados en la Figura I.

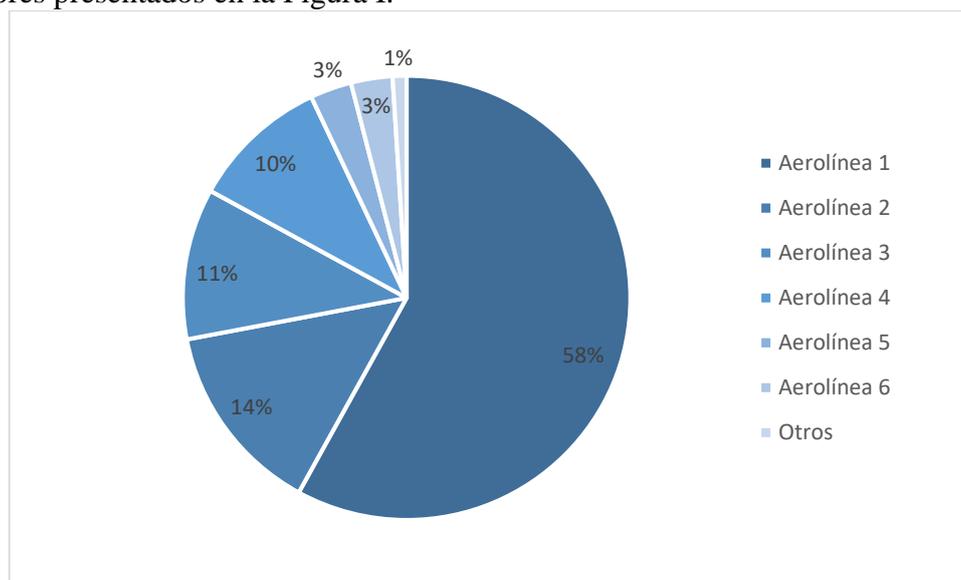


Figura I: Participación de mercado de Aerolíneas que transportan pasajeros comerciales en Perú en el 2017. Fuente: Elaboración propia

Una característica de este mercado es la competencia abierta a los destinos para todas las aerolíneas, estas coinciden en la mayoría de los casos en los puntos de origen y destino de los pasajeros locales es (O-D), como se muestra en la matriz a nivel nacional de la Figura II. Bajo este escenario de competencia el ingreso para nuevas aerolíneas no es fácil enfrentar -lograr ser competitivas- manteniendo dos estrategias genéricas, costo y diferenciación. La estrategia de diferenciación se basa en la construcción de una experiencia para el pasajero; a través de una variedad de productos y servicios relacionados como hoteles por perfil de usuario, renta de servicios, visitas especializadas, programas de viajeros frecuentes; enfocado en el

objetivo principal, el transporte desde el origen al destino. Además, la facilidad para complementar con servicios para cambios de fechas o devoluciones de la compra, tipo de equipajes, considerando el origen y destino principal.

A	DISTANCIA Km.	AEROLÍNEAS					
C1 <>C2	572	1	2	3	4	5	6
C1 <>C3	764	1		3	4	5	
C1 <>C3	1010	1	2	3		5	6
C1 <>C4	857	1	2	3		5	
C1 <>C5	624	1		3		5	6
C1 <>C6	488	1	2		4		
C1 <>C7	489	1		3	4		6
C1 <>C8	661	1			4		
C1 <>C9	837	1	2				
C1 <>C10	983	1		3			
C1 <>C11	565	1			4		6
C1 <>C12	1565	1	2				
C1 <>C13	328	1			4		
C1 <>C14	1014	1					
C1 <>C15	169	1		3	4		
C1 <>C16	951	1					
C1 <>C17	730	1					

Figura II: Operadores de rutas del doméstico Perú. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la competitividad de las aerolíneas: los costos de operación establecidos por las horas de vuelo efectivo y la aparición en el mercado de aerolíneas de bajo costo genera un desafío constante. El ingreso de aerolíneas de bajo costo origina un movimiento interesante en la industria aeronáutica [22] debido al incremento en la oferta de producto y el modelo simplificado en estructura tarifaria. El equilibrio alcanzado en la industria pierde armonía con el ingreso de aerolíneas de bajo costo. La diferencia principal entre ambas propuestas de aerolíneas (tradicionales y de bajo costo) está centrada en la flexibilidad de servicios como reprogramar y cancelar vuelos, así como los productos y servicios ofrecidos durante el vuelo. La tabla I, muestra un comparativo de tarifas entre ambos tipos de aerolíneas. En consecuencia, como respuesta a esta nueva condición en el mercado, algunas aerolíneas han optado por optimizar sus ingresos mediante la gestión de la demanda conocida como “Revenue Management” (RM por sus siglas en inglés), la cual tiene como objetivo alinear demanda y oferta considerando tres dimensiones: 1) producto, en este caso el pasaje aéreo; 2) tipo de cliente y preferencias; y 3) tiempo programado de servicio. El manejo de las tres dimensiones con la gestión de ingresos se ha vuelto prioridad en la industria por el efecto en el aumento de ingresos entre 4% a 5% anual en las operaciones. Una de las consideraciones es eliminar la regulación tarifaria de mínima estadía, la cual permite viajes sólo de ida sin requerir regresar. A través de este método de apalancamiento se espera capturar pasajeros ofreciendo vuelos más flexibles.

Regulación	Aerolíneas de bajo costo	Aerolínea de modelo tradicional
Estadía	No tiene mínimos de estadía	Maneja mínimos de estadía
Anticipación	Sí regula por anticipación	Sí regula por anticipación
Cambios de fecha	Sí permite con penalidad	Permite sólo en tarifas altas y con penalidad
Devoluciones	Sí permite con penalidad	Permite sólo en tarifas altas y con penalidad
Ratios entre mínimo y máximo	Bajo ratio entre precio mínimo y máximo.	Alto ratio entre precio mínimo y precio máximo

Tabla I: Comparación de regulaciones entre las aerolíneas de bajo costo y modelos tradicionales. Fuente y elaboración propias.

Esta nueva dinámica en el mercado peruano representa un desafío, dado que existe el riesgo de eliminar la regulación tarifaria mínima de estadía a los clientes con alta disposición de pago, que valoran esta flexibilidad y comprarán los pasajes a un precio bajo. Sin embargo, los ingresos monetarios incrementales derivados de la estimulación de la demanda atribuida a la ganancia en términos de participación de mercado servirán como indicador del nivel relativo de éxito de esta práctica de gestión de ingresos. En consecuencia, al desregular la tarifa de mínimo de estadía, se espera tener ingresos incrementales positivos.

2. **Marco teórico.** -La gestión de ingresos es una práctica que ha nacido y evolucionado en la industria aeronáutica. American Airlines la aplicó al intentar recuperar la demanda perdida por la aparición de aerolíneas que ofrecían pasajes a precios muy bajos; la empresa logró determinar que la demanda variaba según criterios tales como la ruta, día de la semana, hora de vuelo y temporada; de esta forma se propicia que cada vuelo tenga una necesidad particular de asientos asignados a tarifas descontadas [5]. En 1985, la competitividad de American Airlines fue amenazada por la compañía People Express; en respuesta, American desarrolló un programa de gestión de ingreso monetario basado en la diferenciación de precios entre viajeros de placer y de negocios. Este programa incluía un sistema de "gestión de rendimiento" que utilizó algoritmos de optimización para determinar el número de asientos que permitiera proteger las futuras reservas de pasajeros con tarifa completa en cada vuelo, simultáneamente aceptaba a los pasajeros con tarifas bajas y pronta reserva. La gestión de ingresos de American Airlines fue reconocida como una aplicación estratégica importante de la ciencia administrativa [6]. American Airlines, definió la gestión de ingresos en sus inicios como la práctica que busca "vender el asiento correcto, al cliente correcto, al precio correcto" [7]. Su objetivo es la optimización del inventario de asientos, que es fijo y perecible, a través de decisiones tácticas en el corto plazo.

El modelo RM comprende establecer precios y asignar productos complementarios o sustitutos enfocándose en la gestión de la demanda y es considerada como un complemento a la gestión cadena de suministro, con relación a las decisiones de suministro y los procesos de una empresa con el fin de reducir costos de producción y entrega [4]. El modelo se basa en un planeamiento para diversas industrias y particularmente en aerolíneas de transporte de

pasajeros, cuyo objetivo es maximizar los ingresos monetarios a través de un planeamiento estratégico sostenible y dirigido a clases de tarifas. El modelo RM es aplicable con las siguientes condiciones [13]: 1) El vendedor -valga la redundancia- vende un stock fijo de capacidad perecedera; 2) Los pasajeros realizan reservas antes de la salida; 3) El vendedor maneja un conjunto de clases de tarifas, donde cada una tiene un precio fijo (al menos a corto plazo); 4) El vendedor puede cambiar la disponibilidad de las clases de tarifas a lo largo del tiempo. El modelo facilita establecer y actualizar la disponibilidad de clases de tarifas, donde cada una tiene un precio asociado que permanece constante durante el período de reserva. Gracias al éxito de aplicar el modelo RM en las aerolíneas, ha sido posible su aplicación en otras industrias tales como hoteles, alquiler de automóviles, transporte de mercancías y líneas de cruceros, muchas de las cuales usan los mismos (o similares) sistemas de reserva que las aerolíneas de pasajeros [9].

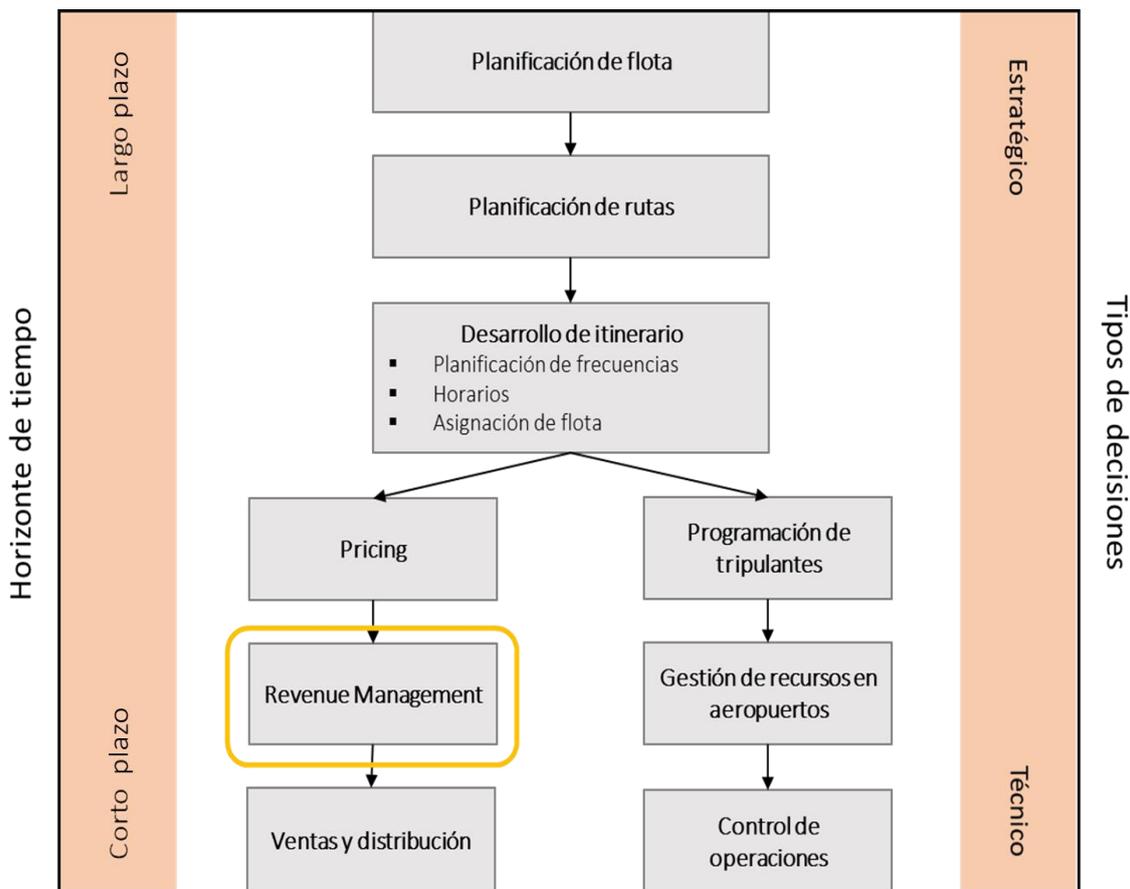


Figura III: Pasos en la gestión de una aerolínea. Fuente: *Airline Schedule Optimization* [8]

La fijación de tarifas de las aerolíneas de bajo costo, en general sigue un esquema general agresivo de competencia en precios, como resultado de la política actual de gestión de ingresos [13]. El precio es una respuesta adaptativa de la política de gestión de ingresos que se ajusta estratégicamente para aprovechar la segmentación de la demanda y maximizar los beneficios. Todo esto sin desviar la filosofía de mantener simple su sistema tarifario. En consecuencia, la estrategia de gestión de ingresos identifica segmentos de clientes estableciendo productos y servicios dirigidos a los mismos. Un elemento importante de la estrategia es la distinción entre los clientes de ocio y los comerciales identificados por las

aerolíneas. Las aerolíneas aprovecharon este conocimiento y lo utilizaron para segmentar su mercado y crear productos virtuales orientados a los diferentes segmentos [9].

Esfuerzos computacionales se han realizado para aproximarse a la política óptima de gestión de ingresos. En la industria aeronáutica, la demanda ha sido evaluada a través de distintos modelos matemáticos [16] y estadísticos [15] para entender su comportamiento [13]. También se han empleado estrategias de predicción de capacidad, demanda y precios [17]. Debido a la complejidad de la competencia en la industria, muchas aproximaciones añaden a la modelación supuestos de competencia vertical y horizontal [18] y alianzas empresariales mediante aplicaciones de teoría de juegos [16] [19]. Adicionalmente se incluyeron otro grupo de supuestos sobre la naturaleza estocástica [15] [20] [21] y determinística [19] de los procesos. Por otro lado, algoritmos de optimización basados en el aprendizaje profundo reforzado constituyen la actual frontera de conocimientos usada por American Airlines [14]; esta aproximación es estadística y emplea un modelo que se entrena con datos simulados para realizar la optimización de forma automática con datos reales. Talluri y Van Ryzin (2005) [4] proponen novedosamente que, para un modelamiento más preciso de la demanda, es recomendable dividirla y agruparla en segmentos según sus preferencias y disposición de pago. Predecir el comportamiento de la demanda a partir de un segmento más homogéneo es más apropiado que hacerlo del universo total. De esta manera se conoce las características de este grupo y se puede ofrecer un producto que se acomode a sus necesidades.

El concepto de “Pricing” nace de la interpretación del correcto uso del producto, que se basa en encontrar la estrategia de precios adecuada para cada segmento de mercado identificado, a partir del modelo de demanda agregada. Desde el momento que se realiza la disposición de pago se da origen a una estructura tarifaria, por la agrupación de distintos productos. Esta diversidad de productos permite maximizar ingresos abarcando la mayor cantidad de puntos dentro de la curva de demanda. Phillips [9] afirma que, para muchas organizaciones, el precio incluye un conjunto de decisiones complejas. Si bien la mayoría de las empresas tienen conocimiento acerca de los precios de lista que han establecido para sus productos, no suelen conocer con claridad los precios que realmente pagan los clientes debido a que frecuentemente aplican en simultáneo diferentes descuentos, ajustes y rebajas a cada venta. Por esta razón, es fundamental distinguir entre el precio de lista de un bien y el precio final pagado por el cliente. El precio de lista es genérico, mientras que el precio final puede ser diferente para cada cliente. Aquellas aerolíneas que deseen ser competitivas deben adoptar las condiciones de regulación tarifaria. Sin embargo, es posible que esta acción genere una guerra de precios en donde el valor de mercado caiga y el mayor beneficiario sea el pasajero, esto se conoce como “Spiral-down”. Este efecto sucede cuando interpretaciones o suposiciones erróneas del comportamiento del pasajero producen que, ventas de boletos con tarifas altas, así como los niveles de protección e ingreso monetario se reduzcan de manera sistemática. El espiral es resultado de una falla en la gestión de ingresos donde existe una mayor disponibilidad de pasajes de tarifa baja y menor nivel en ventas de tarifas altas, entonces se forma el patrón de descenso en espiral [10].

Adicionalmente, las aerolíneas pueden gestionar también el concepto llamado “Capacity”, el cual permite asignar una cantidad de asientos por la cantidad esperada de pasajeros en cada nivel de tarifa específico. Este concepto permite realizar un cálculo de costos exacto, incluyendo los costos de operación individual para aviones y vuelos, así como de asiento disponible por kilómetro [11]. La combinación de “Pricing” y “Capacity” busca, a través de identificar los precios que los pasajeros están dispuestos a pagar, maximizar ingresos monetarios priorizando espacios para aquellos pasajeros con mayor disposición de pago y

capturando a aquellos más sensibles al precio. El rol principal que tiene la mejora de los aeropuertos en el desarrollo de las ciudades es permitir una mayor conectividad entre mercados laborales internacionales o regionales. No solo el comercio de bienes es importante en términos de competitividad global y sostenibilidad local [23], sino la movilidad de las personas que dinamiza el trabajo y permite una mayor división de este [24], así como una aproximación cultural e inclusiva entre ciudades lejanas [25].

3. Caso de negocio.

3.1. **Planteamiento del problema.** -En los últimos años se ha podido observar la entrada de aerolíneas con un nuevo modelo de bajo costo modificando el comportamiento en la industria aeronáutica mundial. Las aerolíneas de bajo costo tienen un modelo simplificado en cuanto a niveles y regulaciones en las tarifas, dificultando la competitividad del modelo tradicional de las aerolíneas. Como consecuencia, la disposición de pago en segmentos de alto valor ha disminuido, así mismo, la flexibilidad y el nivel de servicio ya no son suficientes para atraer a los clientes. Esto se evidencia en el bajo nivel de ocupación de asientos con tarifas altas, lo cual indica que la demanda de pasajeros corporativos se contrae. En la figura 4 se representa la caída de la curva de utilidad de la demanda, donde la disposición de pago se mantiene, pero la cantidad de pasajeros dispuestos a pagar los niveles tarifarios establecidos disminuye. Frente a este contexto, se considera la eliminación de restricciones tarifarias como técnica para alcanzar mayor competitividad esperando capturar a los clientes con mayor flexibilidad. A nivel global, esto ha representado un gran desafío, dado que existe el riesgo de que al eliminar las restricciones en las estructuras tarifarias los clientes no mantengan el tipo de comportamiento esperado, de acuerdo a la segmentación en la cual se les agrupó, y que, por el contrario, tomen el primer precio disponible.

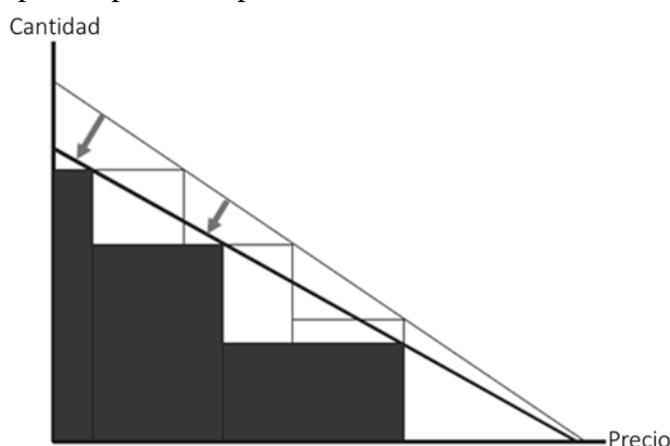


Figura IV: Contracción de demanda de segmentos con alta disposición de pago [12]

Dada la coyuntura competitiva entre aerolíneas tradicionales en la industria peruana, una de las empresas que opera a nivel nacional e internacional, ha optado por explorar e implementar la propuesta mencionada en este artículo; permitiendo comprobar que, eliminar las restricciones de mínimo de estadía, incrementa la competitividad e incentiva el crecimiento de pasajeros en la industria.

4. **Metodología.** -Con el fin de experimentar la eliminación de la regulación de mínimo de estadía en las tarifas de una aerolínea tradicional, este estudio sugiere los siguientes pasos: a) Planteamiento de objetivos; b) hipótesis; c) parámetro de medición; d) resultados; y e)

conclusiones. De esta forma se busca mantener un orden que permita identificar los efectos generados y obtener conclusiones positivas o negativas con relación a ingresos monetarios.

El objetivo principal es identificar el efecto de la implementación mediante la comparación reflexiva entre el tipo de demanda de una estructura de precios de pasaje pre-implementación con la respectiva estructura de demanda de pasajes post implementación (ver *Tabla II*). Los objetivos secundarios implican, en primer lugar, analizar los fenómenos de estimulación y dilución de acuerdo al comportamiento de compra del pasajero y la tarifa que adquiere. Segundo, analizar y determinar si el cambio producido en estos fenómenos es producto de la implementación o también es influenciada por otros factores.

Nivel tarifario	Estadía		Anticipación	
	Pre medida	Post medida	Pre medida	Post medida
S1	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
S2	Ninguna	Ninguna	3 días	3 días
S3	2 días	Ninguna	7 días	7 días
S4	3 días	Ninguna	14 días	14 días
S5	4 días	Ninguna	30 días	30 días

Tabla II: Estructura tarifaria con regulaciones de estadía y anticipación para un periodo Pre y Post implementación. Fuente: Elaboración propia

En relación a la hipótesis se declara esperar los siguientes comportamientos:

- Dilución: Pasajeros que valoran comprar pasajes sin mínimo de estadía pagando la tarifa base si es que la encuentran disponible.
- Estimulación o ganancia de participación de mercado: Existen pasajeros que valoran comprar pasajes sin mínimo de estadía y no encuentran tarifas que se acomoden a su disposición de pago por lo cual escogen otras aerolíneas.

La hipótesis formulada que existen ganancias monetarias considerables después de la implementación; además, sucede en paralelo con una dilución de pasajeros que previamente pagaban tarifas altas pero que actualmente escogen la tarifa baja desregulada; Finalmente, esta desregulación tarifaria captura una parte del mercado de pasajeros que demandan pasajes sin límite de estadía, pero no compraban en la aerolínea estudiada por no encontrar tarifas que se acomoden a su disposición de pago. Las ganancias monetarias se deben a distintos factores que estimularon la demanda en el periodo de estudio, el cual comprende la comparación reflexiva (como el crecimiento económico, shocks exógenos de demanda, publicidad, entre otros); sin embargo, hubo un efecto claro en el cambio en la estructura de demanda de tarifas de vuelo que probablemente se deba a la implementación del piloto.

Para medir los efectos de dilución y estimulación en primer lugar se realizó una segmentación de los pasajeros de la ruta considerando su comportamiento de estadía y la tarifa adquirida. Dentro del comportamiento de estadía se diferenció a aquellos que no ocupaban estadía de los que sí, y en cuanto a tarifa adquirida se diferenció a quienes compraban tarifa base de a los que compraban cualquier tarifa más alta. Con esta segmentación se distribuyó en cuatro cuadrantes. En ellos se podía encontrar a (1) pasajeros que no ocupaban estadía y compraban tarifa base (antes de la implementación de esta opción no estaba disponible), (2) pasajeros que no ocupaban estadía y compraban una tarifa más cara, (3) pasajeros que ocupaban estadías de 1 día a más y pagaban tarifas base y (4) pasajeros que ocupaban estadías de 1 día a más y pagaban tarifas altas. En los cuatro grupos se sumó la información de cantidad de

pasajeros y se mostró la composición en términos porcentuales de la cantidad total de pasajeros transportados.

5. **Resultados.** -El estudio se implementó en dos rutas de Perú que transportan aproximadamente 50 mil pasajeros comerciales al mes, a través de una aerolínea internacional con operaciones en Latinoamérica. El resultado arrojó un incremento en la cantidad de pasajeros de 13% en el periodo de prueba versus el periodo anterior, lo que se arrojó un promedio de 63 mil pasajeros al mes. Se identificó cambio de comportamiento en cada uno de los cuadrantes (ver *Tabla III*). Los pasajeros que no ocupaban estadía aumentaron 12 puntos porcentuales respecto al periodo anterior. Esto se refleja en la composición del grupo de quienes no ocupan estadía, sin tener en cuenta la tarifa que pagaron, que pasó de representar un 13% a 25% del total de pasajeros. La composición de los pasajeros que compraban tarifas altas, sin diferenciar estadía, cae 6 puntos porcentuales respecto al periodo previo. Esto se traduce en una dilución de -235 mil USD considerando la menor composición de este segmento por la tarifa promedio que dejan estos pasajeros.

Dado que se abre la regulación y se permite comprar desde tarifas base, el cuadrante (1) de pasajeros que compran tarifas base sin ocupar estadía aumenta. A estos pasajeros se les considera como demanda frustrada, que antes no volaba con la aerolínea porque no encontraba el precio que estaba dispuesto a pagar teniendo en cuenta las condiciones de estadía. Esta mayor composición, un total que ha crecido, genera 230 mil USD por estimulación. Los pasajeros que ocupaban estadías mayores a 1 día y compraban tarifas altas, lo hacen porque son las tarifas que encuentran disponibles y se acomodan a lo que están dispuestos a pagar, no muestran sensibilidad al atributo de estadía, por el contrario, pueden estar más enfocados en la anticipación con que compran u otras condiciones de las regulaciones tarifarias que no fueron modificadas. Mantener a estos pasajeros en su nivel tarifario permitió incrementar las ventas en 75 mil USD adicionales. En ingresos totales se calculó un aporte de 70 mil USD, lo que representa una mejora de 3% de los ingresos de la ruta con un incremento de 13% de pasajeros totales.

Pre medida

Nivel tarifario	Comportamiento de estadía del pasajero								TOTAL
	OW	0	1	2	3	4	5	NS	
S1	7%	1%	3%	1%	1%	0%	0%	6%	19%
S2	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	6%
S3	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	6%
S4	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	13%
S5	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	53%	56%
TOTAL	13%	1%	3%	3%	3%	2%	0%	73%	100%

Post medida

Nivel tarifario	Comportamiento de estadía del pasajero								TOTAL
	OW	0	1	2	3	4	5	NS	
S1	4%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	5%	13%
S2	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	6%
S3	3%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	4%	9%
S4	4%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	8%	14%
S5	12%	0%	1%	2%	1%	1%	0%	39%	58%
TOTAL	25%	2%	4%	4%	3%	2%	1%	60%	100%

Tabla III: Matriz de comportamiento de estadía del pasajero según nivel tarifario para mercado nacional en periodos Pre y Post eliminación de regulación de mínimo de estadía. Fuente: Elaboración propia.

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

6. Conclusiones. -El modelo de “gestión de ingresos” es una práctica estratégica que aporta mayor rentabilidad a una aerolínea. Está comprobado que en un entorno de crecimiento industrial donde operan muchas aerolíneas, se puede utilizar este modelo para modificar la composición de la demanda y proteger simultáneamente la industria de una guerra de precios aportando soluciones alternativas como la búsqueda de competitividad a partir de flexibilización, tal y como se demostró en el caso de estudio. Los nuevos pasajeros que obtuvo la aerolínea generaron ingresos incrementales que superaron la dilución de los pasajeros antiguos quienes compraron también en tarifas base, según la comparación reflexiva. Sin embargo, es necesario aislar el efecto de otros factores que estimulen la demanda. Adicionalmente, esto puede variar por la cantidad de cupos que se asignan a la tarifa base u otras características en el comportamiento del cliente.

Existen pasajeros en la industria que valoran comprar pasajes sin mínimo de estadía resultando aparentemente positivo el incremento de la competitividad por la eliminación de la regulación tarifaria de mínimo de estadía, dado que los pasajeros valoran este atributo y muestran sensibilidad al precio de acuerdo al cambio en la composición de la demanda. Esto se ilustra al habilitar tarifas base sin mínimo de estadía resultando el incremento absoluto de pasajeros. La dilución es generada al habilitar tarifas base para quienes valoraban el atributo estadía menor a 1 día, quienes estaban dispuestos a pagar una tarifa mayor, pero eligieron la más baja ahora disponible. Así mismo, existe un segmento de pasajeros que no se diluye porque su comportamiento está segmentado con otras regulaciones tarifarias que no fueron estudiadas en este documento.

En síntesis, este modelo de gestión de ingresos, de aplicarse en distintas aerolíneas tradicionales en el mercado peruano, puede generar considerables ingresos incrementales; sin embargo, se debe hacer énfasis en la mejora de competitividad obtenida respecto a las aerolíneas de bajo costo, en un entorno donde cada vez estas últimas son más numerosas. La contribución del modelo es socialmente importante porque, según la información sobre operadores de ruta, algunas regiones solo están conectadas por aerolíneas tradicionales, lo que impactaría en la mejora de competitividad y productividad aportando a la integración económica entre regiones.

Referencias

- [1] Asociación Internacional de Transporte Aéreo, La importancia del transporte aéreo en Perú, Oxford Economics Report, 2016.
- [2] Portal de turismo, Transporte aéreo en Perú genera 280 mil empleos y aporta US\$ 4.400 millones al PBI, 2017.
- [3] Gestión, Transporte aéreo nacional de pasajeros en Perú creció 8.5% en 2017, 2017.
- [4] Talluri, K. T., & Van Ryzin, G., The theory and practice of Revenue Management, 2005, New York: Springer.
- [5] García, F., Revenue management: maximización de ingresos de las aerolíneas, 2016, México.
- [6] Anderson, C. K., P. Bell, and S. P. Kaiser., Strategic operations research and the Edelman Prize finalist applications 1989 –1998, *Operations Research*, 2003, 52(1): p. 1– 13.
- [7] Smith, B., Leimkuhler, J., & Darrow, R., Yield Management at American Airlines. *Interfaces*. 1992. 22(1): p. 8-31.
- [8] Barnhart, C., Airline Schedule Optimization, The Global Airline Industry, 2009, London: John Wiley & Sons.
- [9] Phillips, R. Pricing and Revenue Optimization, 2005, Stanford University Press.
- [10] Cooper, W. L., Homem-de-Mello, T., & Kleywegt, A. J. Models of the Spiral-Down Effect in Revenue Management, *Operations Research*. 2006, 54(5): p. 968-987.

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

- [11] Tsa, W.-H., & Kuo, L., Operating costs and capacity in the airline industry. *Journal of Air Transport Management*, 2004, 10(4): p. 269-275.
- [12] Belobaba, P. P., Fundamentals of Pricing and Revenue Management, In P. P. Belobaba, A. Odoni, & C. Barnhart, The global airline industry, 2009, p. 84-87, UK: John Wiley and Sons.
- [13] Alderighi, M. et al. (2019). Is low-cost carriers' revenue management a firm capability? *Journal of Air Transport Management*, 78, 15-22.
- [14] Mohd, S. et al. (2019). Autonomous Airline Revenue Management: A Deep Reinforcement Learning Approach to Seat Inventory Control and Overbooking.
- [15] Büsing, C., Kadatz, D., & Cleophas, C. Capacity Uncertainty in Airline Revenue Management: Models, Algorithms, and Computations, 2019. *Transportation Science*, 53, 2, 383-400.
- [16] Liu, M., Hou, Y., Chu, F., & Huo, J. Revenue management of airline alliances with integral planning strategy, 2017. 14th *International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)* 1-6.
- [17] Zaki, H. Forecasting for Airline Revenue Management, 2000. *Journal of Business Forecasting Methods and Systems*, 19, 2-7.
- [18] Netessine, S., & Shumsky, R. A. Revenue Management Games: Horizontal and Vertical Competition, 2005. *Management Science*, 51, 5, 813.
- [19] Grauberger, W., & Kimms, A. Revenue management under horizontal and vertical competition within airline alliances, 2016. *Omega*, 59, 228-237.
- [20] Gao, J. & Le, M. Mathematical programming of airline revenue management with passenger choice behavior, 2018. 14th *International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. 669-676.
- [21] Arslan, A. M., Frenk, J. B. G., & Sezer, S. O. On the single-leg airline revenue management problem in continuous time, 2015. *Mathematical Methods of Operations Research*, 81, 1, 27-52.
- [22] Mohd, S. et al. Autonomous Airline Revenue Management: A Deep Reinforcement Learning Approach to Seat Inventory Control and Overbooking, 2019.
- [23] Conventz, S., In Derudder, B., In Thierstein, A., & In Witlox, F. *Hub cities in the knowledge economy: Seaports, airports, brainports*. 2016
- [24] Appold, S. J., & Kasarda, J. D. The airport city phenomenon: Evidence from large US airports, 2016. *Urban Studies*, 50, 1239-1259.
- [25] Leeuw, P. Airport city development at mature airports: Structural, strategic and commercial aspects along the path of a massive change process, 2019. *Journal of Airport Management*, 13, 2, 122-132.

Estudio exploratorio en gestión de proyectos

Project Management: an exploratory study

Arturo Rodolfo Saenz Arteaga¹ Jhony Ostos Mariño² , Kerstin Bremser³ Edmundo Lizarzaburu Bolanos⁴

Recibido: 01/2019

Aceptado: 09/2019

Resumen. - Diversos autores sostienen que la gestión de proyectos se conduce con técnicas cuantitativas que corresponden a un comportamiento de causa-efecto lineal; sin embargo, debería ser tratada con técnicas que corresponden a un comportamiento de causa-efecto no lineal. Este estudio explora el comportamiento de la gestión de proyectos bajo un enfoque de causa-efecto no lineal utilizando la teoría del caos y cuatro variables de gestión proyectos: tiempo, recurso humano, calidad, y costo. Se utiliza la ley de Parkinson y la teoría del caos, se formulan ecuaciones matemáticas para explicar el comportamiento de causa-efecto no lineal en la gestión de proyectos. El estudio fue realizado considerando la experiencia de la gestión en proyectos mineros. El modelo matemático encontrado puede ser utilizado por los académicos para profundizar el análisis de los motivos de la complejidad de la gestión de proyectos. Asimismo, este estudio es de utilidad para los gerentes en la toma de decisiones para el cálculo de la duración esperada del proyecto.

Palabras clave: Complejidad, caos, proyecto.

Abstract. -Several authors argue that project management is conducted with quantitative techniques that correspond to a linear cause-effect behavior; however, it should be treated with techniques that correspond to a nonlinear cause and effect behavior. This study explores the behavior of project management under a non-linear cause-effect approach using chaos theory and four project management variables: time, human resources, quality, and cost. Parkinson's law and chaos theory are used; mathematical equations are formulated to explain nonlinear cause-effect behavior in project management. The study was conducted considering the experience of management in mining projects. The mathematical model found can be used by academics to deepen the analysis of the reasons for the complexity of project management. Also, this study is useful for managers in making decisions to calculate the expected duration of the project.

Keywords: Complexity, chaos, Project

¹Esan University (Universidad Esan), asaenz@esan.edu.pe , ORCID iD: 0000-0002-4240-480X

²Esan University (Universidad Esan) jostos@esan.edu.pe ORCID iD: 0000-0003-1888-7378

³Pforzheim University, Kerstin.bremser@hs-pforzheim.de ,ORCID iD: 0000-0002-8263-7763

⁴Esan University (Universidad Esan) elizarzaburub@gmail.com ORCID iD: 0000-0002-8862-5624

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

Introducción. - Desde que los proyectos son considerados como parte fundamental del logro de los objetivos estratégicos de la organización y no como un aporte artificial [1,2], el éxito de los proyectos se ha convertido en el tema más mencionado por los investigadores de la gestión de proyectos en los últimos años [3]. Los modelos de madurez [4], la lógica difusa [5], los modelos de simulación dinámica [6], el trabajo en equipo [7], la toma de decisiones [8] y la concepción misma del éxito del proyecto [9] han sido las principales áreas de investigación de la última década las cuales aportan conocimiento nuevo a los modelos ya establecidos [10].

A pesar de que estos modelos han sido desarrollados para lograr el éxito de un proyecto, algunas instituciones como: “The Standish Group”, “eGovernment for Development Exchange (eGov4Dev)” [11], y “The Treasury Board of Canada Secretariat” han reportado, para sorpresa de muchos, que el éxito de los proyectos solo alcanza el 28% o 30% de los casos. Valores que son considerados muy bajos por Herzog [12] y que parecen no mejorar con el paso del tiempo [13].

Como reporta Rolfe et al. [13], en la Universidad de Oxford se realizó un estudio entre McKinsey y el BT Center for Major Program Management. Este estudio se desarrolló sobre una muestra de 5,400 proyectos de tecnología e investigación en un amplio rango de industrias. Los resultados del estudio fueron similares a los de “The Standish Group”. La ejecución presupuestal del 50% de los proyectos, con un presupuesto de más de US\$ 15 millones, estaban en 45% por encima del presupuesto, y fueron finalizados con un retraso del 7% y con 56% menos de funcionalidad respecto de lo requerido originalmente [14]. Por otro lado, las fallas en los proyectos de tecnología e innovación no están aislados de las fallas que ocurren en otros tipos de proyectos, las cuales se pueden medir utilizando variables relevantes conocidas como triángulo de hierro: costo, tiempo y calidad [13].

En la investigación realizada en grandes proyectos de construcción en más de 20 países, [15] observo que "nueve de cada diez proyectos tienen sobrecostos. Los excesos de costos mayores a 50% es algo común, mientras que los excesos de costos en más del 100% no son tan frecuentes". Textualmente, Flyvbjerg [15] señaló: "Para un periodo de setenta años, para los cuales los datos están disponibles, los excesos de costos han sido constantes, lo que indica que ninguna mejora en la estimación y gestión de costos se ha hecho a lo largo del tiempo".

En concordancia con los comentarios anteriores, se puede sostener que el comportamiento real de los proyectos sufre de distorsiones en su calidad y retraso en los cumplimientos, por lo que es necesario proponer nuevas ópticas de análisis de la gestión de proyectos. Esto nos lleva a pensar que los modelos actuales, con sus variables involucradas, no están reflejando o explicando el comportamiento real de la gestión de proyectos [16].

En el ámbito de las perspectivas teóricas, se encuentra que las teorías formales como la teoría organizacional y las teorías relacionadas proveen información útil para el análisis de la gestión de proyectos. Tanto las teorías relacionadas, la teoría de la reestructuración, y la teoría de la complejidad proporcionan supuestos nuevos que permiten la aplicabilidad de un análisis matemático [17]. En concordancia con lo establecido previamente se plantea la pregunta de investigación: ¿Es posible proponer una ecuación matemática que ayude a predecir el comportamiento de la gestión de los proyectos en empresas (mineras) de países emergentes?

Revisión de literatura. -A pesar que a la fecha no existe un análisis claro de la teoría de proyectos [3], el objetivo del estudio es explorar la complejidad del comportamiento de la gestión de proyectos en un país emergente, usando las teorías formales y las relacionadas, para el cual se analizan cuatro constructos (gestión del tiempo, gestión del recurso humano, gestión de la calidad, y gestión del costo), las cuales forman tres variables del modelo de estudio propuesto (tiempo programado, tiempo expandido, cantidad de recurso humano).

Teoría de la complejidad en proyectos. -La complejidad de un proyecto se puede percibir con mucha frecuencia en aspectos como la dificultad de este (para lograr los objetivos del proyecto) y sus riesgos, asimismo Dao et al. [18], sostiene que estos dos factores principales influyen en gran medida en cómo se gestiona y ejecuta un proyecto. Se relaciona frecuentemente la dificultad del proyecto con la experiencia y conocimientos del equipo que está a cargo del proyecto, y al riesgo con la incertidumbre de las características del proyecto, asimismo la ISO, en su guía ISO 31000 del 2009 [19] define al riesgo como “el efecto de la incertidumbre en la consecución de los objetivos”.

Existen muchas definiciones de la teoría de complejidad y este es uno de los problemas teóricos, ya que no existe una definición exacta y común que haya sido aceptada. Asimismo, Valle (2000) [20] define: “un sistema complejo, es un conjunto que consta de varios elementos que interactúan entre sí de muchas maneras diferentes”. Por otra parte, Dao et al. [18], define: “la teoría de la complejidad generalmente explica lo que es un sistema complejo dentro de un área específica de interés (por ejemplo, natural, biológica, ecosistema, informática, sociedad humana o mercado financiero, etc.) y estudia la interacción entre los elementos de ese sistema”.

En función a lo anterior, podemos decir que el límite del conocimiento de la gestión de proyectos se evidencia más por conocimiento práctico que por investigación académica [3] y su complejidad está basada en conceptos de equipo y riesgo.

Es en base a esta limitada cantidad de información académica que podemos considerar lo indicado por Crawford, Hobbs and Turner (2004) [21] y Pich et al. [22], acerca de buscar teorías relacionadas que finalmente y a nuestro parecer nos ayuden a formular una ecuación matemática. Una teoría que puede tener relevancia en el estudio de la gestión de proyectos es la teoría del caos que se deriva de la teoría de la complejidad, dicha teoría fue sugerida para estudios de complejidad tecnológica por Shenhar and Dvir [23] y luego para estudios de complejidad organizativa por Baccharini [24].

La gestión de proyectos, una forma especializada de gestión, al igual que otras estrategias funcionales que se utilizan para lograr objetivos de negocio, estrategias y actividades dentro de un programa y presupuesto definidos [25], está asociada a la teoría de la complejidad debido al dinamismo que enfrentan los proyectos y la dependencia de sus condiciones iniciales. La teoría del caos, que es parte de la teoría de complejidad, es la ciencia más adecuada para intentar explicar el comportamiento de la gestión de proyectos [26].

Debido a que la gestión de proyectos sigue un patrón altamente dinámico, utilizaremos la teoría del caos para buscar una explicación del comportamiento del equipo (recurso humano) y las variables relevantes (tiempo, costo y calidad) las cuales fueron establecidas tempranamente por Atkinson [27]; Hazebroucq and Badot [28] y Westerveld [29]. De esta forma y usando diversos principios matemáticos formularemos proposiciones determinísticas.

El comportamiento Dinámico de la Gestión de Proyectos. -Singh, H. and Singh, A [26], afirman que una buena cantidad de conceptos sobre la teoría de la complejidad pueden ser obtenidos de la literatura relacionada a las ciencias y a la gerencia; mucho del comportamiento de la gerencia tiene una base implícita en la matemática y en la física, motivo por el cual en esta investigación utilizaremos estas ciencias para analizar el comportamiento de la gestión de proyectos. Siguiendo el pensamiento de Singh, H. and Singh, A. [26], la conducta de la gestión de proyectos debería estar representada en ecuaciones matemáticas cómo lo está las Finanzas, el Marketing, y la Economía entre otros, pero aún no se conoce en forma concluyente las ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento de la gestión de proyectos. Este es el reto ya que, si aún no hay una explicación con una variable basada en la ciencia, no significa que no exista ninguna correspondencia para profundizar el análisis [30].

Si ya existieran ecuaciones basadas en la ciencia que explique los factores que influyen en el comportamiento de las variables, la conducta de la gestión de proyectos podría ser mejor explicada y hasta predecible. Dado que la gestión de proyectos tiene comportamientos cambiantes y dinámicos que dificultan su predictibilidad, se generan dudas de su aplicación en el logro de los objetivos estratégicos [31]. La gestión de proyectos tiene un comportamiento dinámico y la teoría del caos, como parte de la teoría de la complejidad, es la que mejor explica este comportamiento no lineal [30] e incluso en función de la estructuración matemática podría ser utilizado para predecir el comportamiento futuro [32]. Este es el escenario en el cual la teoría del caos y los sistemas dinámicos cobran importancia.

El modelo de la gestión de proyectos. -Así cómo Singh, H. and Singh, A. [26] profundizan el análisis del comportamiento dinámico de la gestión de proyectos, otros autores como Shenhar and Dvir [3] buscan definir un modelo del comportamiento de la gestión de proyectos. Singh, H. and Singh, A. [26] sostienen que buscar un modelo para la gestión de proyectos puede ser osado, pero no restrictivo si el análisis parte de la teoría del caos, el cual es una ciencia que puede ser aplicada a todos los campos de estudio social. Por otro lado, Olaniran et al. [33], concluye que conceptualizar los megaproyectos como un sistema caótico o no lineal puede proveer más contextos prácticos que ayuden a comprender como emergen los sobrecostos en este tipo de proyectos.

En este contexto varios investigadores en temas de gerencia han acordado que el “modelo esencial” de la relación de la teoría del caos con la gestión gerencial debe tener un comportamiento no lineal¹², por la imprevisibilidad que tiene cualquier proyecto [30]. Una premisa para aplicar la teoría del caos en la gestión de proyectos es que el escenario de ocurrencia debe tener un comportamiento dinámico y no lineal. La ciencia del caos ha tenido impactos en diversos estudios, tales como el económico y el tiempo atmosférico entre otros, y el planteamiento es que la teoría del caos puede aplicarse en la planificación, en la dirección, en las inversiones, y en la gestión de proyectos, por las ocurrencias que siguen un patrón complejo. La teoría del caos siempre busca determinar un orden oculto en las ocurrencias naturales complejas y caóticas [34].

Para buscar la explicación de un “modelo esencial” primero se debe poner a prueba un planteamiento que pueda ser aceptado o falseado [35], entonces surge la siguiente pregunta ¿Cuál podría ser el modelo de la gestión de proyectos? El PMI [36], en su cuarta edición del PMBOK guide, sostiene que las fallas en el éxito de los proyectos se deben a la práctica de acciones débiles en planificación y en una inadecuada conformación del equipo de trabajo,

¹² Comportamiento no lineal tiene que ver con la relación causa-efecto; es decir a una causa le corresponde no solo un efecto sino varios efectos dinámicos

entre otros. Estas afirmaciones de los motivos de éxito o falla de la gestión de proyectos tienen un aporte limitado porque el planteamiento se basa más en apreciaciones empíricas que en ciencia. Al respecto, Shenhar and Dvir [3] objetan esta limitada explicación y plantean la búsqueda de nuevos modelos que profundicen el análisis de la gestión de proyectos como es el caso del modelo de diamante.

Se pueden construir algunos modelos para analizar el rendimiento de las organizaciones en diversas áreas, tales como: comportamiento organizacional, equipos de producción, cultura organizacional y otras áreas que afectan la toma de decisiones y el rendimiento en el trabajo [26], no obstante, los estudios de la teoría del caos y su aplicación en la gestión de proyectos han traspasado los esfuerzos teóricos tempranos de Parker and Stacey y; están tratando de formular modelos prácticos que expliquen los sobre costos en megaproyectos sobre todo del sector hidrocarburos [17].

Es por ello que el modelo esencial del comportamiento de la gestión de proyectos debería incluir como patrón lo genérico en lugar de distinguir solamente lo específico, un ejemplo es la astronomía, que busca analizar el comportamiento del universo en lugar de sólo analizar las estrellas y las galaxias del universo. La búsqueda de un modelo de gestión de proyectos puede ayudar a mejorar el rendimiento y prevenir fracasos entre otros [26].

La teoría del caos. -El caos tiene diversas definiciones, por un lado, existen definiciones lingüísticas y de otro lado se tienen definiciones científicas [37]. Parker and Stacey [30] sostiene una definición lingüística, el caos consiste en un estado, condición o lugar donde existe gran desorden y confusión total. Singh, H. and Singh, A. [26], plantean una definición científica, el caos es un sistema sumamente sensible a la variación de las condiciones iniciales, con un comportamiento no periódico e imprevisible que por lo general está asociado a fenómenos turbulentos.

La definición científica plantea que el comportamiento dinámico de los sucesos es tal que la ciencia aún no ha desarrollado un modelo suficiente para determinarlo, si existe una relación causa efecto en el comportamiento lineal (predecible) es posible que existe una relación de causa y efecto en el comportamiento dinámico (impredecible). Haciendo una extensión del análisis, el tiempo atmosférico corresponde a flujos de materia y energía el cual supone que sigue las leyes de la mecánica newtoniana por lo que podría ser predecible, el problema se basa en encontrar todas las variables que se requieren para hacer predicciones exactas [26,38].

La teoría matemática del caos no estudia sistemas caóticos en el sentido literal de la palabra, sino formas particulares de comportamiento, es un contraste directo al pensamiento lineal o mecanicista, que explica que los sistemas son regulares, únicos, estables y predecibles [32]. El principio del universo ha sido catalogado como caótico en discrepancia con el orden relativo del movimiento de las estrellas y de las galaxias que deberían seguir un patrón, mientras no se conozca este patrón siempre se afirmará que el comportamiento es dinámico. El nombre genérico de la ciencia del caos es “la teoría de la complejidad” bajo la cual el “caos” es una forma particular de comportamiento [39].

El caos y la gestión de proyectos. -Establecer una relación directa entre la teoría del caos y la gestión de proyectos es una tarea complicada debido a que la información de casos comprobados es aún escasa, sin embargo diversos autores sostienen que la teoría del caos puede ser aplicada, aunque de manera matemática, al comportamiento de ciertos eventos que suceden en la gestión de las organizaciones [40,41,42,34] , esto significa que es viable entender el comportamiento de la gestión de proyectos y entender su modelo bajo la de la teoría del caos.

La gestión de proyectos sucede en realidades complejas y muchas veces con desorden en su ejecución, si revisamos las condiciones del inicio de cada proyecto, encontramos distintos problemas en el transcurso de su ejecución, los cuales podrían estar en concordancia con la teoría del caos; por ejemplo, los suministros de los equipos y maquinaria no llegan a tiempo, las grúas tienen problemas de mantenimiento, la programación de trabajos está fuera de control, los costos de preparación exceden el presupuesto, los dibujos y los planos tienen errores de precisión, y existe falta de comunicación, entre otros. Es aquí en donde la teoría del caos empieza a tener sentido para tratar de explicar los vacíos del comportamiento de la gestión de proyectos [30].

Por otro lado, la teoría del caos contradice la teoría convencional de la Gestión de Proyectos, ya que esta última define que el éxito de la gestión de proyectos depende de muchas variables como: Planeamiento, programa, control de calidad, tecnología, comunicación, liderazgo, recurso humano, así como monitoreo y control [43]. A la fecha, los factores que miden el éxito o fracaso de los proyectos han sido estudiados a posteriori, sin embargo, es necesario profundizar la evaluación a priori, la razón es que mucho del éxito del proyecto depende de las decisiones que se toman al inicio del proyecto, por ejemplo, el control excesivo del gasto de instalación, y la distribución equitativa de los recursos entre otros. El problema es que la relación entre el comportamiento del costo del proyecto y el apoyo sostenido de la organización depende de los resultados iniciales que se van obteniendo y estos factores aún no se han profundizado [26].

La manifestación de la teoría del caos en la gestión de costos de proyectos significa que pequeños cambios en las condiciones iniciales del costo, generan la necesidad de hacer otros cambios en estimados futuros de los costos [44]. Estos cambios iniciales generarán otros cambios hasta que el impacto total en los costos tenga un impacto considerable, es decir la incertidumbre del costo total del proyecto se incrementa con el tiempo y puede ser expresado mediante formulación matemática usando el exponente Lyapunov [17].

Estos pequeños cambios en las condiciones iniciales no son considerados en los estudios previos de Ahmed, Ruwanpura and Clark [45] los cuales indican que esta variable es aleatoria determinística por lo que un valor de contingencia debe ser añadido para poder estimarla. Por otro lado, Baccharini and Love [46] reportan que una aproximación determinística tradicional no es efectiva y por lo tanto se recomienda usar la teoría de probabilidades como una mejor aproximación al resultado. Esta dicotomía es resuelta por Olaniran et al. [17], quien señala que el comportamiento del costo ha sido el más estudiado por la teoría del caos. Se evidencia que su comportamiento es sensible a las condiciones iniciales y por lo tanto su dependencia se puede escribir matemáticamente.

Las decisiones iniciales del proyecto ocurren en condiciones de complejidad y muchas veces con poco control, es aquí donde la teoría del caos cobra importancia porque el descontrol puede llevar a sobrecostos [17]. No obstante, existen casos de éxito cuando se tienen proyectos que fueron terminados a tiempo, con alta rentabilidad, y con clientes satisfechos; estos dos escenarios se dan en un ambiente de complejidad donde la teoría del caos interviene, más aún cuando no hay casos de proyectos que fueron bien elaborados pero que al final sus resultados

fueron un fracaso. Estos eventos parece que suceden en un escenario caótico, pero debe existir un patrón oculto, quizás un modelo que explica en el tiempo las ocurrencias importantes que suceden y que el ser humano todavía no lo reconoce.

Aproximación determinística en la gestión de proyectos.

Gestión del tiempo. -Al momento de gestionar proyectos, ya sea de cualquier sector, se toman en cuenta tres fundamentos que son determinante para el cumplimiento de los objetivos, a estos fundamentos se les conoce como la triple restricción COSTO-TIEMPO-CALIDAD. Teniendo en cuenta esto, nos enfocaremos en la gestión de tiempo, Fons [47] sostiene que, la gestión de tiempo por su naturaleza y de forma consciente o inconsciente, está omnipresente en todos los proyectos. Por otro lado, el principal objetivo de la gestión del tiempo en proyectos según Valenzuela [48], es concluir el proyecto a tiempo, logrando el alcance del proyecto, en tiempo, costes y calidad requerida por el cliente, sin rebasar los riesgos inherentes del proyecto. Según la ley de Parkinson [49]: El trabajo se expande hasta llenar el tiempo disponible para que su culminación. Por lo que el valor esperado del tiempo para la culminación de una actividad siempre será mayor que el tiempo dado para la actividad. Veamos su aplicación en la Gestión de Proyectos cómo una forma de calcular la posible relación entre recurso y tiempo. Para encontrar dicha relación utilizaremos los conceptos preliminares de Gutiérrez and Kouvelis [50].

Sea la actividad “A”, la cual la podemos dividir en dos subtareas A1 y A2, tal que A2 suceda a A1, además podemos considerar que T1 y T2 sean los tiempos para cada subtarea. Si consideramos que “T” es el tiempo de culminación de la actividad A, entonces podemos afirmar que:

$$T = T_1 + T_2 \dots\dots\dots (1)$$

Esto según Parkinson [51] es incorrecto ya que el tiempo de culminación de una actividad deberá ser una función del tiempo disponible que se tiene para la actividad y no del tiempo de cada actividad ya que el trabajo se expande hasta llenar el tiempo disponible, y este puede ser igual o mayor que el tiempo de culminación o mejor llamado tiempo programado para cada actividad.

Denotando el tiempo disponible cómo “d”, entonces el tiempo de culminación deberá ser función de este tiempo, por lo que la ecuación de tiempos quedaría escrita así:

$$T = T(d) \dots\dots\dots (2)$$

Para poder ser consistentes con la Ley de Parkinson, el término “expansión de trabajo o $\omega(d)$ ” es ingresado para dar equilibrio a la ecuación (2), la cual podrá ser escrita cómo sigue:

$$T(d) = T_1 + T_2 + \omega(d) \dots\dots\dots (3)$$

Ahora, si la primera tarea es completada en T1, el valor esperado de la actividad “A” será $T_1 + E(T_2)$, donde “E” es la esperanza matemática, luego en la ecuación (3), la expansión del trabajo percibida por el trabajador será:

$$\omega(d) = (d - T_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots (4)$$

Nuevamente, para poder ser consistentes con la Ley de Parkinson, el resultado de la ecuación (4) deberá ser positivo y mayor o igual a cero, lo que indica que el trabajador ha expandido su trabajo. Reemplazando la ecuación (4) en (3) y por la ley de la monotonía, podemos fácilmente encontrar el tiempo de culminación esperado de la actividad “A”, así:

$$ET(d) = ET_1 + ET_2 + E(d - T_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots (5)$$

Para poder resolver la ecuación (5), debemos usar la inecuación de Jensen, pero para ello debemos demostrar que la ecuación (4) es convexa.

Teorema. – Sea, X_i , una variable aleatoria arbitraria y $f: R-R$, una función convexa tal que $E(f(x))$ es finita $\Rightarrow f(E(x)) < E(f(x))$, lo mismo ocurre si y solo si $f(x) = a + bx$; es decir: $E f(x)) > E(g(x)) = E(a+bx) = a+bE(x) = f(E(x))$; siempre y cuando $E(f(x)-g(x))=0$

Aplicando este Teorema a la ecuación (4) podemos ver que está es convexa en su rango y podemos afirmar que:

$$E(d - T_1 - ET_2)^+ \geq E(d) - T_1 - ET_2 \dots\dots\dots (6)$$

Pero cómo T_1 es completado en el tiempo, entonces $E(T_1)=T_1$; y la $E(d) = d$, luego la ecuación (6) se transforma cómo sigue:

$$E(d - T_1 - ET_2)^+ \geq d - ET_1 - ET_2 \dots\dots\dots(7)$$

y reordenando los términos tenemos:

$$ET_1 + ET_2 + E(d - T_1 - ET_2)^+ \geq d \dots\dots\dots (8)$$

luego (8) en (5)

$$ET(d) \geq d \dots\dots\dots(9)$$

Cómo lo indica la ecuación (9), según la ley de Parkinson, el tiempo esperado real para culminar la actividad “A” siempre será mayor que el programado cuando el trabajador tiene el perfil de “trabajador expansivo”. Este trabajador expansivo siempre percibe que el tiempo puede expandirse y es, en todos los casos, el culpable de que la programación no alcance el 100% de eficiencia. Al mismo tiempo puede existir su contraparte al perfil de trabajador expansivo, el cual es el “trabajador ocupado”, este trabajador no expande el tiempo por lo que los valores de los tiempos T_1 y T_2 serán siempre valores con una esperanza igual a la función. Nuevamente tomando la ecuación (3)

$$ET'(d) = ET_1 + ET_2 + \omega(d) \dots\dots\dots(10)$$

el valor de la expansión será igual a:

$$\omega(d) = (d - ET_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots(11)$$

reemplazando (11) en (10) tenemos:

$$ET'(d) = ET_1 + ET_2 + (d - ET_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots(12)$$

La ecuación (11) puede tomar los valores de:

si:

$$\omega(d) = (d - ET_1 - ET_2)^+ = 0 \Rightarrow ET'(d) = ET_1 + ET_2$$

$$\omega(d) = (d - ET_1 - ET_2)^+ \neq 0 \Rightarrow ET'(d) = d$$

luego

$$ET'(d) = \max \{d, ET_1 + ET_2\} \dots\dots\dots (13)$$

De la ecuación (4), podemos ver que $ET'(d)$ es una función no decreciente y no negativa por lo que la ecuación (5) es también no decreciente y no negativa, por lo que podemos deducir que:

$$ET(d) \geq ET_1 + ET_2 \dots\dots\dots(14)$$

Como la ecuación (13) tiene una variable “d” con pendiente de 45°, hay un rango en un tiempo “t1” en que la ecuación (13) está por debajo del valor $ET_1 + ET_2$, luego entonces podemos concluir que para este rango la ecuación (14) queda:

$$ET(d) \geq ET'(d) \geq d \dots\dots\dots (15)$$

Reformulando las ecuaciones, en la *Figura I* se puede apreciar el comportamiento de ambos trabajadores.

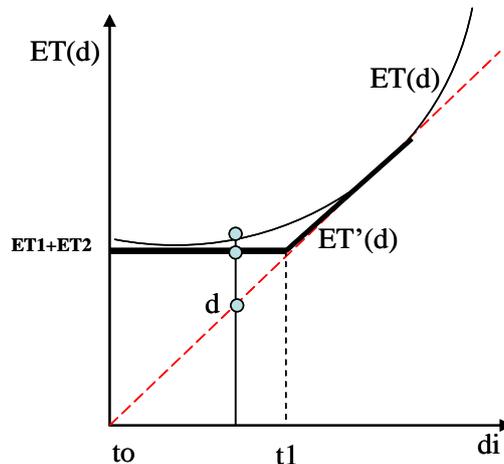


Figura I. - Valor esperado del tiempo ET(d) en función del tiempo programado (di)

El resultado de la ecuación (15) es muy importante, ya que indica que por más que se programe una actividad para que sea realizada en un tiempo “d”, el valor esperado para el culminar la actividad ET(d) siempre será mayor que la programada independiente del tipo de trabajador o recurso humano que se asigne a la actividad, luego la gráfica que podría resultar de esta proposición sería cómo lo indica la *Figura I* y podría seguir la siguiente ecuación cuadrática:

$$ET(d) = ET_1 + ET_2 + \Omega t^2 \dots\dots\dots (16)$$

Para facilidad de la ecuación podemos hacer que $E_0 = ET_1 + ET_2$, por lo que la ecuación (16) se podría escribir cómo:

$$ET(d) = E_0 + \Omega t^2 \dots\dots\dots (17)$$

además, según la *Figura I*:

$$\frac{\delta ET(d)}{\delta t} = \frac{\delta ET'(d)}{\delta d} \dots\dots\dots (18)$$

luego

$$\frac{\delta ET'(d)}{\delta d} = 1 \dots\dots\dots (19)$$

y

$$\frac{\partial ET(d)}{\partial t} = 2\Omega t \dots\dots\dots (20)$$

(20) y (19) en (18)

$$\Omega = \frac{1}{2d}; \forall t = d \dots\dots\dots (21)$$

(21) en (17)

$$ET(d) = E_0 + \frac{1}{2d}t^2 \dots\dots\dots (22)$$

Para un tiempo de actividad programado “d”, podemos reemplazar en (22) y tomar en cuenta la ecuación (19), para poder encontrar E0:

$$E_0 = \frac{d}{2} \dots\dots\dots (23)$$

Luego reemplazando (23) en (22), la ecuación del tiempo de una actividad en función del tiempo programado “d”, el cual es mayor a “t1” en la Fig. N°1, podría escribirse cómo sigue:

$$E(t) = \frac{d}{2} + \frac{1}{2d}T_{\text{exp}}^2 \dots\dots\dots(24)$$

donde:

$$E(d) = \frac{d}{2} + \frac{1}{2d}d^2$$

Si el trabajador es del tipo “trabajador ocupado” o “trabajador expandido”, el valor esperado del tiempo programado para la actividad será:

$$E(d) = d$$

Para este caso, “d” es el tiempo programado para una actividad y “Texp” es el tiempo de expansión de la actividad dependiendo del tipo de trabajador o recurso utilizado en el proyecto.

Gestión de los Recursos Humanos. -Debido a que todo proyecto necesita recursos humanos para cumplir con su alcance y tiempo, se tomará en cuenta los conceptos de ingreso y salida de personal del proyecto. La razón de ingreso de personal debería ser un valor casi lineal pero debido a que en todo proyecto existe reasignación de personal, la razón debería decrecer muy rápido. La ecuación de Parkinson¹³ establece que el aumento de personal en un ambiente administrativo, suponiendo un ambiente de paz, está representado por la ecuación siguiente:

$$\Delta N = \frac{2N^m + t}{n} \dots\dots\dots (25)$$

donde:

ΔN : Aumento de personal.

N : El número de recursos que pretenden ingresar al proyecto, para nuestro caso, es el número de trabajadores que se necesitan subcontratar en adición.

m : Número de horas hombre dedicadas al trabajo. Podemos suponer entre 2 y 8 horas por actividad.

t : Tiempo transcurrido.

n : Número de personas a administrar.

Se puede expresar así la ecuación (25) de una manera más simple:

$$\Delta N = \phi N^m + \xi \dots\dots\dots(26)$$

Ahora, podemos definir el ingreso de personal al proyecto como sigue:

¹³ Esta ley establece que el trabajo se expande hasta llenar el tiempo disponible para su culminación.

Al inicio del proyecto el número de recursos es igual a N_0 , pero si se cumple la primera ley de Parkinson, el número de recursos quedaría escrito de la siguiente forma:

$$N_1 = N_0 + \Delta N \dots\dots\dots (27)$$

reemplazando (27) en (26)

$$N_1 = N_0 + \phi N_0^m + \xi \dots\dots\dots (28)$$

Ahora, como un proyecto está sujeto a la planificación gradual, cada incremento o decremento de personal está en función siempre del personal anterior, por lo que la ecuación (28) puede suponerse recursiva. La ecuación (28) entonces puede ser escrita entonces como sigue:

$$N_{i+1} = N_i + \phi N_i^m + \xi \dots\dots\dots (29)$$

Debido a que todo proyecto está predestinado a reducir, localizar, o retirar personal, el efecto de estas variables afecta el normal flujo de personas y su permanencia en el proyecto. Definiendo al efecto de reducción como “D(N)”, la ecuación (29) puede ser modificada como sigue:

$$N_{i+1} = N_i + \phi N_i^m + \xi - D(N) \dots\dots\dots (30)$$

luego el valor esperado de la cantidad de personal podría ser representado así:

$$E(N_{i+1}) = E(N_i + \phi N_i^m + \xi) - E(D(N))^\pm \dots\dots\dots (31)$$

Como el efecto de reducción siempre obliga al número inicial de recursos a disminuir, el valor esperado de D(N), siempre será negativo, por lo que siempre deberá ser mayor que el número de recursos que ingresan por la Ley de Parkinson. Entonces podremos representar D(N) como:

$$D(N) = K(N_{i+1} - N_i) = K\Delta N = K(\phi N_i^m + \xi) \dots\dots\dots (32)$$

donde: $K > 1$, entonces reemplazando (32) en (31) se tiene

$$E(N_{i+1}) = N_i + (1-K)\xi - (K-1)\phi N_i^m \dots\dots\dots (33)$$

Acomodando la ecuación (33) y suponiendo, por practicidad, $m = 2$; esta quedaría como sigue:

$$E(N_{t+1}) = \gamma N_t - \beta N_t^2 \dots\dots\dots (33)$$

Donde γN_t , representa el ingreso proporcionado de personal al proyecto y βN_t^2 , representa la reducción natural del personal del proyecto debido a la colocación, reducción o rotación. Con el fin de normalizar la ecuación, podemos reemplazar, N_t por $\frac{\gamma}{\beta} N_t$, luego reemplazando en la ecuación (33) obtenemos:

$$E(N_{t+1}) = \gamma \frac{\gamma}{\beta} N_t - \beta \left(\frac{\gamma}{\beta} N_t \right)^2$$

$$E(N_{t+1}) = \frac{\gamma^2}{\beta} N_t - \frac{\gamma^2}{\beta} N_t^2$$

luego la ecuación (33) quedaría como sigue:

$$E(N_{t+1}) = \frac{\gamma^2}{\beta} N_t (1 - N_t)$$

y cambiando el valor $\frac{\gamma^2}{\beta}$ por un Υ , tendremos la ecuación (34) normalizada.

$$E(N_{t+1}) = \Upsilon N_t(1 - N_t) \dots\dots\dots (34)$$

Donde Υ , representa la razón intrínseca del crecimiento de los recursos durante la ejecución del proyecto. Debido a que el valor N_{t+1} , es un valor futuro, el valor esperado es que mejor se ajusta en estos casos, por ello la ecuación (34) finalmente puede ser escrita como sigue:

$$E(N) = \Upsilon N(1 - N) \dots\dots\dots (35)$$

Gestión de la calidad. La calidad es un factor importante que se debe considerar en la gestión de proyecto, ya que según Cuatrecasas [52], la calidad es “el conjunto de características que posee un producto o servicio obtenidos en un sistema productivo, así como la capacidad de satisfacción de los requerimientos del usuario” (p.575). Por otro lado, Lizarzaburu [53] sostiene que, la calidad tiene que ver con cuan adecuado es un producto o servicio para el uso que se pretende hacer de él.

Considerando el concepto de la “triple restricción” (costo, calidad, y tiempo), en la fórmula matemática la calidad será considerada como variable dependiente de dos variables independientes: el costo y el tiempo de expansión, la razón es que esta variable está inmersa en el logro de los objetivos de costo del proyecto dentro de un tiempo programado. Normalmente se pueden satisfacer dos de las tres variables siguientes: Costo (C), Calidad (Q) y Tiempo (T), por lo que formularemos tres supuestos:

Supuesto N°1: Si se necesita terminar el proyecto dentro del tiempo o antes del mismo, probablemente tendremos que sacrificar la calidad y/o se tendrá que aumentar el costo.

Supuesto N°2: Si el proyecto se culmina antes de tiempo y con un costo bajo, entonces el resultado del mismo no tendrá la calidad esperada.

Supuesto N°3: Si se requiere que el producto tenga alta calidad, pero a bajo costo, entonces el tiempo de culminación se extenderá.

Estas tres suposiciones se pueden resumir en la *Tabla I* y formular las respectivas dependencias entre ellas.

Supuesto	Tiempo (T)	Costos (C)	Calidad (Q)	Dependencia
1	-	+	-	$Q \propto \frac{T}{C}$
2	-	-	-	$Q \propto TC$
3	+	-	+	$Q \propto \frac{T}{C}$

Tabla I. - Dependencias de calidad en función del tiempo y el costo

Dependiendo de la aleatoriedad del tiempo y costo, la calidad podría ser directa o inversamente proporcional al costo, por lo tanto, para mantener esta restricción, un exponente “n” será agregado a la ecuación en la variable costo (C), la cual puede ser (+) o (-), dependiendo de la condición inicial del proyecto o del alcance de este. Para esta primera aproximación suponemos que el valor del tiempo no tiene exponente. Siendo así, la ecuación para la Gestión de la Calidad podría ser escrita como sigue:

$$Q = K T_{exp} C^n \dots\dots\dots (36)$$

Gestión del costo. La variable costo debería ser constante o con varianza mínima, pero en la evaluación de proyectos es una de las variables más dinámicas y están sujetas a permanentes ajustes los cuales limitan el tiempo y el alcance del proyecto. El dinamismo del costo está en función del tiempo de expansión (T), las variables: costo y calidad condicionan los recursos del proyecto y el logro de los objetivos estratégicos en el tiempo programado (N). Por lo tanto, se pueden elaborar los siguientes supuestos:

Supuesto N°4: Si se necesita que el proyecto acabe antes de su tiempo de culminación, probablemente tendremos que invertir en más recursos lo cual incrementará el costo del proyecto.

Supuesto N°5: Si se necesita que el proyecto termine antes de su tiempo de culminación y a un costo por debajo del presupuestado, entonces el número de recursos tiene que ser escaso.

Supuesto N°6: Si requieres que el proyecto tenga un bajo costo y consuma un número bajo de recursos, entonces nos vamos a tardar en entregarlo.

Estas tres proposiciones se pueden resumir en la *Tabla II* y formular las respectivas dependencias entre ellas.

Supuesto	Tiempo (T)	Recursos (N)	Costo (C)	Dependencia
4	-	+	+	$C \propto \frac{N}{T}$
5	-	-	-	$C \propto NT$
6	+	-	-	$C \propto \frac{N}{T}$

Tabla II. - Dependencias del costo en función del tiempo y recurso

Dependiendo de cómo sea la aleatoriedad del tiempo y el recurso, el costo podría ser directa o inversamente proporcional al tiempo, por ello para salvar esta restricción, un exponente “n” será agregado a la ecuación en la variable tiempo (T), la cual puede ser (+) o (-), dependiendo de la condición inicial del proyecto o del alcance de este. Para esta primera aproximación suponemos que el valor del recurso no tiene exponente. Entonces la ecuación para la gestión del costo podría ser escrita como sigue:

$$C = \theta NT_{\text{exp}}^m \dots\dots\dots (37)$$

Evaluación determinística bajo la teoría del caos. -En el análisis de la gestión del tiempo se referenciaron dos tipos de trabajadores o de recursos humanos: “el trabajador que expande” el trabajo, y “el trabajador ocupado”. Si el trabajador es del tipo: “ocupado”, es muy probable que no expanda el trabajo debido a que tiene labores subsiguientes que desarrollar por lo que esta consiente que el programa debe ser completado en el tiempo dado. Para este tipo de trabajador, los factores de desmotivación, rotación de personal o reducción no son preocupantes porque él se encuentra dentro de una estructura funcional de proyectos donde el conocimiento reconocido en la organización. Si el trabajador es del tipo: “trabajador que expande”, dilatará lo más que pueda la culminación de la actividad, porque así puede aplazar la reducción, la rotación de personal el mayor tiempo posible. Estos tipos de comportamiento de trabajadores se observa en organizaciones orientadas a proyectos.

Entonces, para medir el dinamismo del comportamiento de la gestión de proyectos incluimos la variable recursos humanos en el modelo de gestión. Considerando el tiempo en expansión, el recurso humano, la calidad y el costo, podemos encontrar ecuaciones parciales en función del tiempo, los cuales según el teorema de Poincaré-Bedixon [54] y los estudios de

Sprott [55], generan caos y no son lineales. Se demuestra entonces que la gestión de proyectos tiene un comportamiento caótico no lineal y por lo tanto es afectado por un cambio en las condiciones iniciales. Las ecuaciones caóticas para la gestión del proyecto son las siguientes¹⁴:

$$\dot{Rat} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{exp}^2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\Upsilon(1-2N)} - \frac{T_{exp}}{(1-N)}} \right) \dots\dots\dots (I)$$

$$\dot{T}_{exp} = \left(\frac{\Upsilon}{m} \right) T_{exp} \left(\frac{1}{N} - 2 \right) \dots\dots\dots (II)$$

$$\dot{N} = \Upsilon - 2\phi \left(\frac{Rat}{1-N} \right) T_{exp}^2 \dots\dots\dots (III)$$

Rat, Texp y N, son variables referidas a la rotación programada (ecuación I), tiempo expandido (ecuación II), y cantidad de recurso humano del proyecto (ecuación III). Para este caso Υ ; ϕ y m , son parámetros constantes cuyo valor nos posiciona en el mundo caótico o determinístico. La resolución de estas tres variables nos lleva a identificar un amplio espectro de comportamiento de la gestión del proyecto el cual es dependiente del tipo de proyecto que se esté ejecutando. Dependiendo con que parámetro se empiece, el comportamiento de estas tres variables puede o no ser dependiente de las condiciones iniciales, es allí cuando ocurre el Caos.

Determinismo, falsación y caos. -Para comprender el determinismo, la falsación y el comportamiento caótico podemos hacer una representación gráfica que ilustren estos conceptos. Como se observa en la *Figura II*, la ecuación determinística que relaciona el tiempo de trabajo que expande un trabajador versus el tiempo del proyecto bajo un paradigma Newtoniano, tiene la forma de una línea continua con una ecuación cuadrática de la siguiente forma:

$$T_{exp} = -0.0002t^2 + 0.0006t + 1.02 \dots\dots\dots(38)$$

La tendencia de está gráfica es cuadrática descendente ya que cuando se inicia un proyecto, casi todos los trabajadores buscan conocer el proyecto en todos los aspectos y expanden mucho el tiempo de elaboración de la ingeniería, pero cuando el tiempo se acorta, la expansión del tiempo proyectada se recorta ya que hay límites y fecha de entrega para evitar penalidades y comenzar con otro proyecto, esto por supuesto en condiciones estables. Si observamos la ecuación (38),

La tendencia de ésta siempre será hacia abajo para cualquier valor del tiempo (t). Utilizando la ecuación de Parkinson, los eventos que involucra la expansión del tiempo de trabajo por parte del trabajador, depende de la cantidad de recursos “N” la cual fue formulada en la ecuación (II).

La ecuación (II) mantiene una tendencia ascendente primero y descendente después, el cual está representada por la línea negra gruesa (Fig. 2). Si notamos las tendencias de la ecuación (38) y (II), podemos decir que ambas son muy cercanas y pareciera que la variable “N”, correspondiente a los recursos del proyecto, no influye en nada con esta tendencia. Pero

¹⁴ Para mayor referencia ver el Anexo A.

¿qué pasa en el punto “A” ?, según se aprecia en la fig.2, está solución no corresponde a las ecuaciones (38) y (II) pero si existe en la realidad. De acuerdo con la ley de la falsación de Popper diremos que las ecuaciones (38) y (II) han sido falseadas tomando en cuenta el punto “O”. Entonces ¿a qué ecuación corresponde la línea de cuadrados que pasa por el punto “A” ?, la respuesta es: a la misma ecuación (II), la que anteriormente fue falseada. Lo que sucede es que la ecuación (II) es el resultado de un juego de tres ecuaciones diferenciales no lineales formuladas bajo la teoría del caos en la gestión de proyectos, por lo tanto, no es una ecuación determinística Newtoniana. Cómo se puede ver en la Figura No 2, la ecuación (II) que fue falseada, empieza con la curva de línea gruesa de color negro hasta el punto “O” y desde este punto hay una divergencia que pasa por el punto “A”, la cual resulta de pequeños cambios en las condiciones iniciales de la gestión de proyectos.

Si el proyecto empieza con unas condiciones iniciales establecidas, se espera que su comportamiento sea como lo muestra la curva negra de línea gruesa, pero lo que vemos aquí es que, si esas condiciones iniciales sufren una pequeña variación, los resultados en la extensión del tiempo para un proyecto, que parecía bajar, comienza a subir como lo muestra la línea de cuadros. De allí el caos.

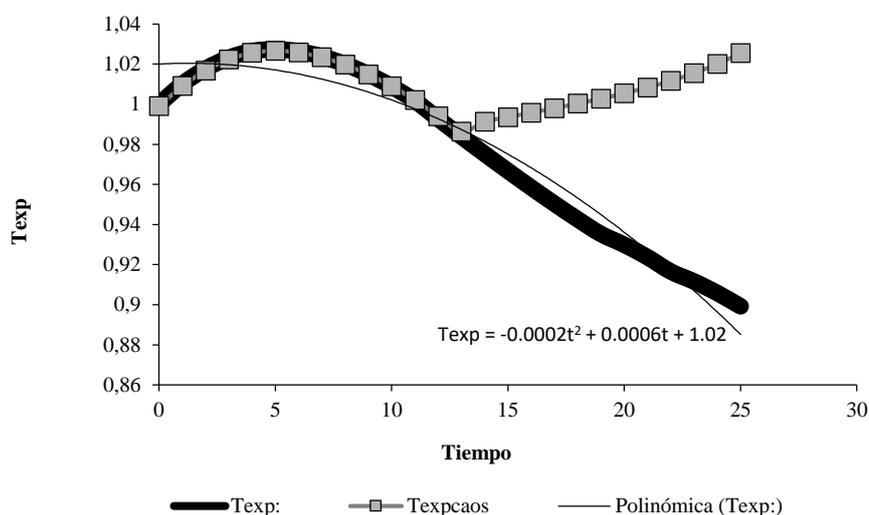


Figura II. Determinismo, falsación y Caos

6. Conclusión. -En el transcurso del desarrollo del estudio se encontraron tres ecuaciones matemáticas: Rotación programada (Rat), tiempo expandido (Texp), y cantidad de recurso humano (N), que explican la complejidad de la gestión de proyectos, las cuales se pueden observar en la Figura II como resultado de las ecuaciones I, II y III respectivamente. Mediante dichas ecuaciones se puede comprobar que existen razones para sostener que la gestión de proyectos es compleja, cuya duración esperada es difícil de predecir y que por lo general se subestima. En otras palabras, la duración real de los proyectos por lo general es mayor que la duración programada. Por poner un ejemplo, ¿Qué pasa cuando un proyecto está por concluir?, los trabajadores se preocupan por su futuro laboral, más aún si no tienen claro si van a continuar laborando en un nuevo proyecto, entonces ellos prefieren que el proyecto actual continúe y así buscan dilatar el tiempo de culminación. Esto significa que en la práctica la gestión de proyectos pasa por un proceso real de variables complejas difíciles de predecir, en donde el

ciclo de vida del proyecto está sujeto a eventos sensibles que empiezan en las condiciones iniciales, en las etapas de la ejecución, y en los ajustes de las condiciones del entorno.

En cuanto a la teoría del caos y su relación con la gestión de proyectos, Singh and Singh [26] indica que, debido al dinamismo del proyecto y su dependencia con las condiciones iniciales, la teoría del caos es la más adecuada para explicar el comportamiento dinámico no lineal del proyecto. De acuerdo con esta apreciación, en esta investigación se diseña un modelo con tres ecuaciones matemáticas que comprueba la complejidad de la gestión de proyectos.

El estudio está limitado a la gestión de proyectos en la gran minería, sin embargo, podría ser extendida a otro tipo de industrias tales como tecnología de información (TI), agroindustriales, así como a proyectos de pequeñas y medianas empresas. La investigación es de utilidad para los académicos porque pone en consideración un modelo matemático que sustenta la necesidad de seguir explorando los motivos de la complejidad de los proyectos.

En cuanto a los gerentes, se pone en consideración la revisión de más variables para tomar decisiones de calidad, costo, y recurso humano, los cuales influyen en el tiempo o en la duración esperada del proyecto.

En este ámbito empresarial se pueden construir a futuro relaciones causa -efecto mediante modelos cuantitativos que relacionen éxito con equipos y que puedan moderarse por variables como clientes, proveedores o tal vez el mismo efecto caos propuesto en estas ecuaciones.

Referencias

- [1] Kenny, J. (2003), "Effective Project Management for Strategic Innovation y Change in an Organizational Context", *Project Management Journal*, 34 (1): 43-53
- [2] Blasco, J. (2001), *Los proyectos, el proyectar y el proyectado*. POLITEXT Àrea d'Enginyeria Mecànica, Barcelona-España: Edicions UPC. En prensa.
- [3] Shenhar, A. J., y Dvir, D. (2007), "Project management research, The challenge y opportunity", *Project Management Journal*, 38 (2): 93-99.
- [4] Jugdev, K., y Thomas, J. (2002), "Project Management Maturity Models: The Silver Bullets of Competitive Advantage", *Project Management Journal*, 33 (4): 04-14
- [5] Liberatore, M. (2002), "Project Schedule Uncertainty Analysis Using Fuzzy Logic", *Project Management Journal*, 33 (4): 15-22.
- [6] Doloi, H. K., y Jaafari, A. (2002), "Toward a Dynamic Simulation Model for Strategic Decision-Making in Life-Cycle Project Management", *Project Management Journal*, 33 (4): 23-28.
- [7] Loo, R. (2002), "Journaling: A Learning Tool for Project Management Training y Team-Building", *Project Management Journal*, 33 (4): 61-66.
- [8] McCray, G. E., Purvis, R. L. y McCray, C. G. (2002), "Project Management Under Uncertainty: The Impact of Heuristics y Biases". *Project Management Journal*, 33 (1): 49-57.
- [9] Pennypacker, J.S. y Grant K.P. (2003), "Project Management Maturity: An Industry Benchmark", *Project Management Journal*, 34 (1): 4-11.
- [10] Bredillet, C. N. (2008), "Mapping the Dynamics of the Project Management Field: Project Management in Action (Part 1). From Editor", *Project Management Journal*, pp. 2-4.
- [11] eGovernment for Development Exchange, eGov4Dev (2005), *Un proyecto coordinado por el Institute for Development Policy y Management (IDPM) de la Universidad de Manchester* (www.egov4dev.org)
- [12] Herzog, V.L. (2001), "International student paper award winner: Trust building on corporate collaborative project teams", *Project Management Journal*, 32(1), 28-35.
- [13] Rolfe, B., Seagal, S., y Cicmil, S (2016), "An Existential Hermeneutic Philosophical Approach to Project Management", *Project Management Journal*, 47 (3): 48-62.

- [14] Bloch, M., Blumberg, S., y Laartz, J. (2012), Delivering large scale IT projects on time, on budget, y on value. McKinsey Quarterly. Retrieved from <http://www.mckinsey.com/businessfunctions/business-technology/our-insights/delivering-large-scale-itprojects-on-time-on-budget-y-onvalue>.
- [15] Flyvbjerg, B. (2014), "What you should know about megaprojects y why: An overview", *Project Management Journal*, 45(2), 6–19.
- [16] Solarte, Leonardo & Sanchez-Arias, Luis. Gérance De Projets Et Stratégie Organisationnelle: Le Modèle De Maturité En Gestion De Projets (Cp3m©) V5.0. Innovar [online]. 2014, vol.24, n.52, pp.5-18. ISSN 0121-5051. <http://dx.doi.org/10.15446/innovar.v24n52.42502>.
- [17] Olaniran, O. J., Love, P. E. D., Edwards, D., J., Olatunji, O., y Matthews, J. (2015), "Chaotic Dynamics of Cost overruns in Oil & Gas Megaprojects: A Review", *International Scholarly y Research y Innovation*, 9 (7).
- [18] Dao, B., Kermanshachi, S., Shane, J., Anderson, S., & Hare, E. (2016). Identifying and measuring project complexity. *Procedia Engineering*, 145, 476-482.
- [19] ISO, I. (2009). ISO 31000: 2009. Risk management–Principles and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [20] Valle Jr, V. 2000. Chaos, Complexity and Deterrence, National Defense Univ Washington DC
- [21] Crawford, L., Hobbs, J.B., y Turner, J.R. (2004), *Project Categorization systems*, Newton Square, PA: Project Management Institute.
- [22] Pich, M.T., Loch, C.H. y De Meyer, A. (2002), "On uncertainty, ambiguity and complexity in project management", *Management Science*, 48 (8), 1008-1023.
- [23] Shenhar, A. J., y Dvir, D. (1995), "Managing Technology Projects: A Contingent Exploratory Approach". *Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Pub. IEEE, pp. 494-503.
- [24] Baccarini. (1996), "The concept of project complexity – a review". *International Journal of Project Management*, 14, pp 201-204.
- [25] Casares, I., & Lizarzaburu, E. (2013). *Introducción a la Gestión Integral de Riesgos Empresariales*.
- [26] Singh, H., y Singh, A. (2002), "Principles of Complexity y Chaos Theory in Project Execution: A New Approach to Management", *Cost Engineering*, 44(12), pp. 23-33.
- [27] Atkinson, R. (1999), "Project Management: Cost, time y quality, two best guesses y a phenomenon, it's time to accept other criteria", *International Journal of Project Management*, 17(1), 337-342.
- [28] Hazebroucq J.M., y Badot, J. (1996), *Le Management de project*. Paris: Presses Universitaires de France.
- [29] Westerveld, K. (2003), "The project excellence model: Linking success criteria y critical success factors", *International Journal of Project Management*, 21, 411-418.
- [30] Parker, D. y Stacey, R. (1996), "Chaos, Management y Economics" (IEA Hobart)", *Organization Studies*, 17: 150-153
- [31] Singh, A., y Vlatas, D. (1991), "Using Conflict Management for Better Decision Making", *Journal of Management in Engineering*, ASCE, Vol. 7 (1), pp.70-82, Jan.
- [32] Schuldberg, D., (2011), *Chaos Theory y Creativity*, in *Encyclopedia of Creativity*, Mark y R.P. Steven, Editors. Academic Press: San Diego. p. 183-191.
- [33] Olaniran, O. J., Love, P. E. D., Edwards, D., J., Olatunji, O., y Matthews, J. (2016), "Cost Overruns in Hydrocarbon Megaprojects: A Critical Review y Implications for Research", *Project Management Journal*, 46 (6): 126-138.
- [34] Stacey, R. D. (1992), *Managing the Unknowable: Strategic Boundaries between Order y Chaos in Organizations*, Jossey-Bass, San Francisco.
- [35] Popper, K.R. (1967), *Conocimiento Objetivo*. Barcelona, Ediciones Paidós Ibérica SA.
- [36] Project Management Institute Standards Committee - PMI (2008), *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK™ Guide)*. Project Management Institute, Upper Darby, PA

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

- [37] Gleick, J. (1988), *Chaos: Making a New Science*, Penguin Books: New York, New York
- [38] Kellert, S.H. (1993), *In the Wake of Chaos*, Chicago: The University of Chicago Press, p2.
- [39] Markarian, R. y Gambini, R. (1997), *Certidumbres, Incertidumbres, Caos. Reflexiones en torno a la ciencia contemporánea*. Ediciones Trilce. Montevideo.
- [40] Gharajedaghi, J. (1999), *Systems Thinking, Managing Chaos y Complexity – a Platform for Designing Business Architecture*. Butterworth y Heinemann, MA.
- [41] Merry, U. (1995), *Coping with Uncertainty: Insights from the New Sciences of Chaos, Self-organization, y Complexity*. Praeger, Westport, Conn.
- [42] Pascale, R. T., Millemann, M., y Gioja, L. (2000), *Surfing the Edge of Chaos: The Laws of Nature y the New Laws of Business*. Crown Business, Ryom House, NY.
- [43] Cooke-Davies T, et al., (2007), “Mapping the strange landscape of complexity theory, y its relationship to project management”, *Project Management Journal*, 2007. 38(2): p. 50-61.
- [44] Moon, F.C. (2008), *Chaotic y Fractal Dynamics: Introduction for Applied Scientists y Engineers*: John Wiley y Sons.
- [45] Ahmed, T., Ruwanpura, J. Y. y Clark, R. (2005), “Predicting Schedule y Cost Elements Variation for EPC Projects in Alberta”, *Proceedings of Construction Research Congress*.
- [46] Baccarini, D, y Love, P. E. (2013), “Statistical Characteristics of Cost Contingency in Water Infrastructure Projects”, *Journal of Construction Engineering y Management*, 140(3).
- [47] Fons, T. (2010). *Omnipresente Gestión del Tiempo*. *Revista Profesional de la Gestión de Personas*, no. 4, 54-63.
- [48] Valenzuela, E. (2008). *Gerencia de Proyectos, Gestión del Tiempo*. Recuperado de: <http://gerenciadeproyectos88.blogspot.com>
- [49] Parkinson, C.N. (1957), *Parkinson’s Law or The Pursuit of Progress*, Edición Española Parkinson: La ley 1982. Ediciones Grijalbo, S.A.
- [50] Gutierrez y Kouvelis, (1991), “Parkinson law and its implications for Project Management”, *Management Science*, 37(8), pp. 990-1001.
- [51] Parkinson, C.N. 1957. *Parkinson’s Law, or The Pursuit of Progress*. Edición Española Parkinson: La ley 1982. Ediciones Grijalbo, S.A.
- [52] Cuatrecasas, L. (2012). *Gestión de la calidad total*. Madrid: Díaz de Santos
- [53] Lizarzaburu, E. R. (2016). *La gestión de la calidad en Perú: un estudio de la norma ISO 9001, sus beneficios y los principales cambios en la versión 2015*. *Universidad & Empresa*, 18(30), 33-54
- [54] Coddington, Earl A. y Levinson, Norman (1955), *The Poincaré–Bendixson Theory of Two-Dimensional Autonomous Systems. Theory of Ordinary Differential Equations*, New York: McGraw-Hill, pp. 389–403. ISBN 0-89874-755-4.
- [55] Sprott, J.C, (1994), *Some simple chaotic flows*. *Physical Review E*. 50.

Anexo: Demostración de las ecuaciones.

A1. Eficacia de los equipos de proyectos

Dividiendo (35) entre (24), la nueva ecuación sería como sigue:

$$Rat(N, T_{exp}) = \frac{\Upsilon N(1-N)}{\frac{d}{2} + \frac{1}{2d} T_{exp}^2} \dots\dots\dots (41)$$

Para dar más flexibilidad a la ecuación (41), su denominador lo podríamos remplazar por el término de modo que la ecuación quedaría como sigue:

$$Rat(N, T_{exp}) = \frac{\Upsilon N(1-N)}{\phi T_{exp}^2} \dots\dots\dots (42)$$

en la ecuación (42), derivamos parcialmente respecto a N y Texp

$$\frac{\partial Rat(N, T_{exp})}{\partial N} = \frac{\Upsilon(1-2N)}{\phi T_{exp}^2} \dots\dots\dots (43)$$

$$\frac{\partial Rat(N, T_{exp})}{\partial T_{exp}} = -\frac{2\Upsilon N(1-N)}{\phi T_{exp}^3} \dots\dots\dots (44)$$

la ecuación (43) se puede escribir como:

$$\frac{\partial Rat(N, T_{exp})}{\partial N} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{exp}^2} - \frac{2\Upsilon N}{\phi T_{exp}^2} \dots\dots\dots (45)$$

la ecuación (44) se puede escribir como:

$$\frac{T_{exp} \partial Rat(N, T_{exp})}{(1-N) \partial T_{exp}} = -\frac{2\Upsilon N}{\phi T_{exp}^2} \dots\dots\dots (46)$$

luego (46) en (45)

$$\frac{\partial Rat(N, T_{exp})}{\partial N} - \frac{T_{exp} \partial Rat(N, T_{exp})}{(1-N) \partial T_{exp}} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{exp}^2} \dots\dots\dots (47)$$

en la ecuación (36), derivamos parcialmente respecto a “Texp “y “C”

$$\frac{\partial Q}{\partial T_{exp}} = KC^n \dots\dots\dots (48)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C} = nKT_{exp} C^{n-1} \dots\dots\dots (49)$$

luego (49) en (48)

$$\frac{\partial Q}{\partial C} = \frac{nT_{exp}}{C} \frac{\partial Q}{\partial T_{exp}} \dots\dots\dots (50)$$

En la ecuación (37) derivamos respecto a “N” y “Texp”

$$\frac{\partial C}{\partial N} = \theta T_{exp}^m \dots\dots\dots (51)$$

$$\frac{\partial C}{\partial T_{exp}} = m\theta N T_{exp}^{m-1} \dots\dots\dots (52)$$

luego (52) en (51)

$$\frac{\partial C}{\partial T_{\text{exp}}} = \frac{mN}{T_{\text{exp}}} \frac{\partial C}{\partial N} \dots\dots\dots (53)$$

Colocando la ecuación (47) en función del tiempo “t”, tendremos el siguiente cambio en la derivada parcial:

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial N} \left(\frac{\partial T_{\text{exp}}}{\partial T_{\text{exp}}} \right) - \frac{T_{\text{exp}} \partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{(1-N) \partial T_{\text{exp}}} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots (54)$$

luego la ecuación se transforma en lo siguiente:

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial T_{\text{exp}}} \left(\frac{1}{\frac{\partial N}{\partial T_{\text{exp}}} - (1-N)} \right) = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (55)$$

De la ecuación (35), vemos que el valor esperado del recurso está en función del recurso anterior por lo que la ecuación es simultanea se podrá graficar como una parábola inversa. Si hacemos analogía al histograma de recursos de los proyectos en función del tiempo para un delta de tiempo pequeño, podemos ver que la gráfica de los histogramas tiene también la forma de una parábola invertida, por lo que puede suponerse que:

$$\text{Lim}_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta T_{\text{exp}}} \cong \text{Lim}_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E(N)}{\Delta N}; \forall N : 0-1; \forall T : t_1 \rightarrow T_{\text{exp}} \quad (56)$$

luego:

$$\text{Lim}_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\partial E(N)}{\partial T_{\text{exp}}} = \Upsilon(1-2N) \dots\dots\dots (57)$$

entonces (57) en (56)

$$\dot{\text{Rat}} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\Upsilon(1-2N)} - \frac{T_{\text{exp}}}{(1-N)}} \right) \dots\dots\dots (58)$$

Tomando la inversa a la ecuación (50) y colocándola en función del tiempo “t”, tendremos el siguiente cambio en la derivada parcial:

$$\frac{\partial T_{\text{exp}}}{\partial C} \left(\frac{\partial T_{\text{exp}}}{\partial T_{\text{exp}}} \right) = \frac{T_{\text{exp}}}{mN} \frac{\partial N}{\partial C} \dots\dots\dots (59)$$

luego, poniendo la derivada en función del tiempo:

$$\dot{T}_{\text{exp}} = \left(\frac{\Upsilon}{m} \right) \frac{T_{\text{exp}}}{N} (1-2N) \dots\dots\dots (60)$$

luego en la ecuación (60), podemos remplazar la nueva variable de modo que:

$$\frac{\partial N}{\partial T_{\text{exp}}} = \Upsilon - 2\phi \left(\frac{\text{Rat}}{1-N} \right) T_{\text{exp}}^2 \dots\dots\dots (61)$$

$$\dot{N} = \Upsilon - 2\phi \left(\frac{\text{Rat}}{1-N} \right) T_{\text{exp}}^2 \dots\dots\dots (62)$$

A.2. Limitación de variables

De la ecuación (35), podemos encontrar el rango de valores para la variable normalizada “N” que en su forma original era N_i .

$$E(N) > 0 \Leftrightarrow N_i < 1 \dots\dots\dots (63)$$

$$N = \frac{\beta}{\gamma} N_i \dots\dots\dots (64)$$

pero de la ecuación (I), vemos que además en su denominador debe de cumplirse que:

$$(1 - 2N) \neq 0; (1 - N) \neq 0 \rightarrow N \neq \left\{ \frac{1}{2}; 1 \right\} \dots\dots\dots (65)$$

además, en el denominador de la ecuación (I) debe de cumplirse que:

$$\frac{1}{\Upsilon(1 - 2N)} - \frac{T_{\text{exp}}}{(1 - N)} > 0 \dots\dots\dots (66)$$

luego;

$$T_{\text{exp}} < \frac{(1 - N)}{(1 - 2N)} \left(\frac{1}{\Upsilon} \right) \dots\dots\dots (67)$$

con estas salvedades, podemos decir que la ecuación (I), siempre será positiva.

$$Rat > 0 \dots\dots\dots (68)$$

Evaluación comparativa de sistemas de reconocimiento de locutor basados en los algoritmos LPC, CC y MFCC

Comparative Evaluation of Speaker Recognition Systems Based on the LPC, CC and MFCC Algorithms.

Yesenia González¹, Héctor Juárez², Oscar Rocha³, Rubén Hernández⁴, Alfredo Bermúdez⁵.

Recibido: 06/2019

Aceptado: 09/2019

Resumen. - El presente documento propone realizar la evaluación de sistemas de reconocimiento de locutor basados en los algoritmos LPC (Coeficientes de Predicción Lineal), CC (Coeficientes Cepstrales) y MFCC (Coeficientes Cepstrales en Frecuencias Mel), empleados en la extracción de parámetros de voz. La evaluación, siguiendo una metodología cuantitativa experimental, consiste en determinar el cambio de desempeño cuando la señal de entrada es expuesta a diferentes condiciones de ruido (bullicio y gaussiano), es decir, a distintos niveles de SNR, comparando los resultados de verificación para 2 locutores. Aunque todos los sistemas disminuyen su desempeño en ambientes ruidosos, cada uno posee de forma intrínseca cierto nivel de robustez. Esta evaluación servirá de referencia en la construcción de sistemas de reconocimiento de locutor, los cuales incluyan sistemas de mejora de voz para disminución del ruido.

Palabras clave: Reconocimiento de locutor, ruido de bullicio, algoritmo MFCC, algoritmo CC, algoritmo LPC.

Summary. - This document proposes the evaluation of speaker recognition systems based on the LPC (Linear Predicting Coding), CC (Cepstral Coefficients) and MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients) algorithms, used in the extraction of voice parameters. The evaluation, following an experimental quantitative methodology, consists of determining the change in performance when the input signal is exposed to different noise conditions (crowd and Gaussian noise), namely, at different levels of SNR, comparing the verification results for 2 speakers. Although all the systems decrease their performance in noisy environments, each one possesses intrinsically a certain level of robustness. This evaluation will serve as a reference in the construction of speaker recognition systems, which include voice enhancement systems to reduce noise.

Keywords: Speaker recognition systems, crowd noise, MFCC algorithm, CC algorithm, LPC algorithm.

¹Instituto Politécnico Nacional. ygonzalezn@ipn.mx, ORCID 0000-0003-2370-4660

²Instituto Politécnico Nacional. hjuarez11400@alumno.ipn.mx, ORCID 0000-0003-1347-0645

³Instituto Politécnico Nacional. orochaa1400@alumno.ipn.mx, ORCID 0000-0002-1676-6620

⁴Instituto Politécnico Nacional. rhtovar@ipn.mx, ORCID 0000-0001-7059-6426

⁵Instituto Politécnico Nacional. jbermudezs@ipn.mx, ORCID 0000-0001-5714-0061

1 Introducción. - Los sistemas de procesamiento de voz se han desarrollado a la par que las comunicaciones digitales y su principal uso es en los sistemas de telefonía. Además, existen aplicaciones en otros campos, como en el reconocimiento de palabras y reconocimiento de locutor.

En éste análisis se plantea el método de la verificación de locutor, el cual consiste en obtener un análisis de las características de la voz, las cuales están determinadas por factores físicos del locutor (tráquea, laringe y labios) y por el hábito o manera de hablar (ritmo, entonación y pronunciación), que permiten la comparación con una referencia y que, a su vez, pueda definir si la persona que habla es quien se encuentra en el registro.

En particular, el reconocimiento de locutor tiene utilidad en sistemas de acceso seguro y en cuestiones forenses, es decir, el procesamiento de voz para el reconocimiento de locutor puede auxiliar en la restricción de acceso por medios electrónicos, donde sirve para la identificación de la persona, con base en parámetros característicos de su voz. Asimismo, puede auxiliar en procedimientos en ciencias criminalísticas para determinar si la voz de una persona coincide con algún actor involucrado en algún hecho delictivo o bajo proceso legal [1].

En los sistemas de reconocimiento de locutor se han empleado diversos métodos de extracción de parámetros de voz como lo son: Coeficientes de Predicción Lineal (LPC, por sus siglas en inglés), Coeficientes Cepstrales (CC, por sus siglas en inglés), Coeficientes Cepstrales en Frecuencias Mel (MFCC, por sus siglas en inglés), bajo diferentes circunstancias y en combinación con diferentes sistemas de clasificación incluyendo redes neuronales, distancias específicas y sistemas difusos [2].

Resulta de interés medir la eficiencia, bajo ambientes ruidosos, de los diferentes procedimientos de extracción de parámetros de voz: LPC, CC y MFCC. Estos procedimientos, han sido evaluados con diferentes propósitos, y son utilizados ampliamente en diferentes sistemas modernos. Por ejemplo, los LPC se emplean para la síntesis de voz en telefonía celular y telefonía IP [3], mientras que los MFCC son preferidos para el reconocimiento de voz en sistemas de dictado o de conversación emulada [4] [5].

Un método para poder medir la eficiencia de un sistema de reconocimiento de voz es el porcentaje de éxito al reconocer un locutor, es decir, si de 100 vectores de prueba el sistema identifica al locutor en todos los casos, para este conjunto se tendrá un 100% de éxito. El incorrecto reconocimiento puede ser causa de: los efectos sonoros que hay en el ambiente, el ruido que se agrega a la señal digitalizada, los dispositivos y/o materiales (propiedades acústicas, mala calidad de los materiales) empleados en la captura de la voz, el algoritmo empleado en el sistema, la mala pronunciación del hablante, entre otros.

2 Desarrollo. - La investigación aquí desarrollada pretende brindar información para la selección de los sistemas de reconocimiento de locutor de acuerdo con su porcentaje de reconocimiento, viabilidad de aplicación en ambientes ruidosos y la cantidad de coeficientes que son usados por sus algoritmos de extracción de características.

El trabajo consiste en la programación de tres sistemas de reconocimiento de locutor que difieren en la etapa de extracción de características. Un diagrama a bloques de un sistema de reconocimiento de locutor se puede observar en la Figura I.

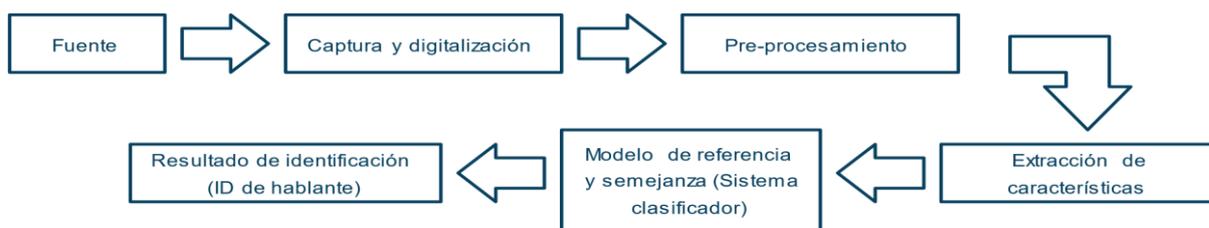


Figura 1. Etapas en un sistema de reconocimiento de locutor [6].

Cada sistema es evaluado con las diferentes señales de voz originales, obteniéndose así un conjunto de estadísticas de desempeño. Posteriormente, se evalúan reiteradamente empleando las señales con diferentes niveles de ruido aditivo (ruido de bullicio y ruido gaussiano), lo cual, permite comparar las variaciones en el desempeño de cada sistema respecto al obtenido con las señales originales. Es importante resaltar que no se encontraron trabajos previos donde se realice la comparativa de reconocimiento de locutor entre los 3 algoritmos aquí presentados y que incluyan una variación del SNR (relación señal a ruido) en las señales de entrada al sistema. Si bien, existen estudios comparativos [7] de rendimiento entre los algoritmos LPC y CC que obtienen como conclusión que la carga computacional para LPC es menor en comparación a CC, los cuales coinciden con los resultados obtenidos en esta investigación.

Se decidió utilizar una *metodología cuantitativa* de tipo *experimental* debido a que esta se caracteriza, básicamente, por la manipulación intencional de una o más variables independientes (nivel de SNR y número de coeficientes empleados en los algoritmos de extracción de características), para observar/medir su influencia en una o más variables dependientes (porcentaje de reconocimiento correcto).

Para el desarrollo del proyecto, se recolectaron grabaciones de voz de los dos alumnos participantes en el proyecto, pronunciando 9 palabras con 10 repeticiones cada una. Para la recolección del ruido de bullicio, se realizaron grabaciones de audio dentro de la Unidad Académica de los autores, en lugares donde se encontraban entre 10-30 personas hablando al mismo tiempo.

2.1 Algoritmos de reconocimiento de locutor. - Como se ha mencionado, el trabajo implementa los algoritmos LPC, CC y MFCC. A continuación, se realiza una descripción de cada uno de ellos.

2.1.1 Codificación de predicción lineal (LPC).- El modelo de Codificación de Predicción Lineal es considerado uno de los modelos más próximos (analogicamente hablando) al sistema vocal humano [8].

Lo fundamental de este modelo es representar una señal de voz como una función de excitación constituida por un tren de pulsos cuasi periódicos (para sonidos vocalizados) o una fuente de ruido aleatorio (para sonidos no vocalizados). La idea básica del modelo LPC es que una muestra de voz dada en un tiempo n , se puede aproximar mediante una combinación lineal de las últimas p muestras de voz, de manera que:

$$\hat{s}(n) = -a_1s(n-1) - a_2s(n-2) - \dots - a_p s(n-p), \quad (1)$$

donde los coeficientes a_1, a_2, \dots, a_p representan los coeficientes LPC [9].

$$\hat{s}(n) = -\sum_{k=1}^p a_k s(n-k), \quad (2)$$

se define al error de predicción $e(n)$ como:

$$\mathbf{e}(\mathbf{n}) = \mathbf{s}(\mathbf{n}) - \hat{\mathbf{s}}(\mathbf{n}), \quad (3)$$

sustituyendo (2) en (3) se tiene:

$$\mathbf{e}(\mathbf{n}) = \mathbf{s}(\mathbf{n}) + \sum_{k=1}^p \mathbf{a}_k \mathbf{s}(\mathbf{n} - k); \quad (4)$$

el error de una trama E_T de tamaño N se define como:

$$E_T = \sum_n \mathbf{e}^2(\mathbf{n}) = \sum_n (\mathbf{s}(\mathbf{n}) + \sum_{k=1}^p \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - k))^2, \quad 0 < n < N. \quad (5)$$

Para minimizar el error de predicción respecto al conjunto de parámetros \mathbf{a}_k , se suponen coeficientes \mathbf{a}_j para los cuales:

$$\frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{a}_j} = \mathbf{0}, \quad j = 1, 2, \dots, p. \quad (6)$$

Siendo la derivada de una sumatoria, la suma de sus derivadas, y teniendo la función de la forma: $y = x^n$; su derivada resulta $y' = n \cdot x^{n-1} dx$, donde dx es la derivada de la suma.

$$\frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{a}_j} = 2 \sum_n (\mathbf{s}(\mathbf{n}) + \sum_{k=1}^p \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - k)) \cdot dx \quad (7)$$

Dado que $\frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{a}_j}$ está derivando con respecto a j , el resultado de la derivada será 0 para todos los términos k diferentes de j . Resultando así:

$$\frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{a}_j} = 2 \sum_n (\mathbf{s}(\mathbf{n}) + \sum_{k=1}^p \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - k)) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - j) = \mathbf{0}; \quad (8)$$

reacomodando términos, con \mathbf{a}_k siendo los coeficientes de predicción óptimos

$$\sum_{k=1}^p \mathbf{a}_k \cdot \sum_n \mathbf{s}(\mathbf{n} - k) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - j) = - \sum_n \mathbf{s}(\mathbf{n}) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - j), \quad (9)$$

con la expresión de autocorrelación r_{ss} definida como:

$$\mathbf{r}_{ss}(\mathbf{j}) = \sum_n \mathbf{s}(\mathbf{n}) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{n} - \mathbf{j}). \quad (10)$$

Se puede observar que en (9) existe una autocorrelación en la parte derecha de la ecuación y una autocorrelación retrasada k unidades en la parte izquierda. Teniendo así:

$$\sum_{k=1}^p \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{j} - k) = -\mathbf{r}_{ss}(\mathbf{j}). \quad (11)$$

Lo que constituye un conjunto de p ecuaciones con p incógnitas. Las ecuaciones que deben cumplir los parámetros LPC se pueden expresar como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{0}) & \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{-1}) & \cdots & \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{-(p-1)}) \\ \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{1}) & \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{0}) & \cdots & \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{-(p-2)}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{p-1}) & \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{p-2}) & \cdots & \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{1}) \\ \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{2}) \\ \vdots \\ \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{p}) \end{bmatrix}; \quad (12)$$

como la función de autocorrelación es simétrica:

$$\mathbf{r}_{ss}(\mathbf{-j}) = \mathbf{r}_{ss}(\mathbf{j}); \quad (13)$$

teniendo así:

$$\begin{bmatrix} r_{ss}(0) & r_{ss}(1) & \cdots & r_{ss}(p-1) \\ r_{ss}(1) & r_{ss}(0) & \cdots & r_{ss}(p-2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{ss}(p-1) & r_{ss}(p-2) & \cdots & r_{ss}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_{ss}(1) \\ r_{ss}(2) \\ \vdots \\ r_{ss}(p) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

La matriz en (14) se puede resolver mediante el método recursivo de Levinson – Durbin [10] obteniendo así los coeficientes LPC.

2.1.2 Cepstrum y coeficientes cepstrales (CC).- De acuerdo con el modelo mostrado en Figura II, el habla está compuesta de una secuencia de excitación convolucionada con la respuesta al impulso del modelo del sistema vocal. Solo se tiene acceso a la salida, por lo que muchas veces es deseable eliminar algunas de sus componentes para que otras puedan ser examinadas, codificadas, modeladas, o usadas en un algoritmo de reconocimiento.

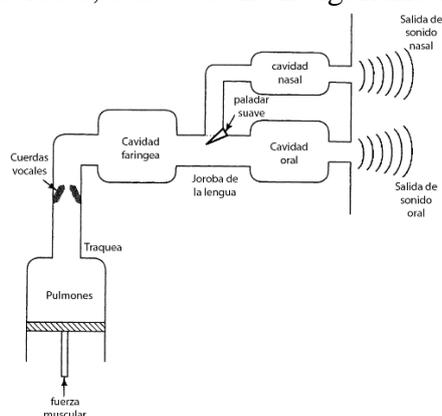


Figura II. Diagrama a bloques de producción de habla humano [11].

El cepstrum viene de aplicar una operación no lineal al espectro (función logaritmo) de una señal, y aplicar la operación contraria de la transformada de Fourier, de aquí su analogía al dominio espectral, teniendo así términos similares con silabas invertidas, por ejemplo, del inglés spectral, se invierte la primera silaba spec, a ceps, y se combina con la segunda silaba teniendo la palabra cepstral. Así como el espectro de una señal permite ver cada una de sus componentes en el dominio de la frecuencia, el cepstrum permite representar señales combinadas por convolución en las sumas de sus componentes cepstrales [9]. El proceso de extracción de los coeficientes cepstrales se muestra en el diagrama a bloques de la Figura III.



Figura III. Proceso de extracción de coeficientes cepstrales. siendo $s(n)$ la señal de entrada y $c(n)$ los coeficientes cepstrales [12].

La producción de la voz puede ser representada como un sistema con entradas y salidas. Por lo que, si la señal de voz es $s(n)$, la cual se compone de una excitación $v(n)$ que pasa a través de la respuesta al impulso de un sistema $h(n)$, este sistema se puede representar como:

$$s(n) = h(n) * v(n), \quad (15)$$

donde $*$ representa la operación de convolución. Por propiedades de la transformada de Fourier, se puede obtener lo siguiente:

$$S(n) = H(n)V(n). \quad (16)$$

Ahora, al aplicar la función absoluto y logaritmo en (16), se puede separar la señal correspondiente a la excitación $v(n)$ con respecto al sistema $h(n)$:

$$\log|S(n)| = \log|H(n)| + \log|V(n)|, \quad (17)$$

sin embargo, aún se encuentra en el dominio de la frecuencia, para regresar al dominio del tiempo se aplica la transformada de Fourier inversa, llegando así a un nuevo dominio llamado dominio cepstral.

$$c_s(n) = c_h(n) + c_v(n), \quad (18)$$

donde los valores de $c_s(n)$ son los coeficientes cepstrales.

Siendo que el modelo representativo de una persona no es algo que varíe mucho, mientras que la excitación sí lo es, los primeros $c_s(n)$ coeficientes corresponden al modelo que identifica a la persona, mientras que los siguientes corresponden a la excitación [19].

2.1.3 Coeficientes cepstrales en la frecuencia de Mel (MFCC). - En el procesamiento de sonido, el cepstrum en frecuencias Mel es una representación del espectro de potencia a corto plazo de un sonido. El cepstrum en frecuencias Mel (MFC), realmente es un cepstrum con su espectro mapeado en la escala Mel. Los coeficientes cepstrales en frecuencias Mel (MFCC) son coeficientes que colectivamente forman un MFC. La diferencia entre el “cepstrum” y el “cepstrum en frecuencia de Mel” es que, en la MFC, las bandas de frecuencia están igualmente espaciadas en la escala de Mel, esto se aproxima más a la respuesta del sistema auditivo humano que las bandas de frecuencia linealmente utilizadas en el cepstrum normal. Esta distorsión de frecuencia puede permitir una mejor representación del sonido.

Ventaneo y tramas. - En todas las aplicaciones de procesamiento de señales, es necesario trabajar con términos cortos o tramas de la señal, necesitando hacer la selección de esas tramas o intervalos elegidos; por lo que se requerirá hacer uso de una función de ventana.

Una función de ventana $w(n)$, es una secuencia real de longitud finita N usada para seleccionar una trama deseada de la señal, y que tiene un valor cero fuera del intervalo elegido.

Escala de Mel. - La escala de Mel relaciona la frecuencia percibida, o el tono, de un tono puro con su frecuencia real medida. Por ejemplo, los seres humanos son mucho mejores para discernir pequeños cambios en el tono en las frecuencias bajas a comparación de las frecuencias altas. Por lo tanto, esta escala hace que las características coincidan más estrechamente con lo que escuchan los humanos.

La escala Mel fue desarrollada por Stanley Smith Stevens, John Volkman y Edwin Newman [13]. El nombre “Mel” viene de la palabra “melodía”, para indicar que la escala está basada en comparaciones de tonos. El punto de referencia entre esta escala y la frecuencia normal se define equiparando un tono de 1000 Hz, 40 dB por encima del umbral de audición del oyente, con un tono de 1000 Mels. La fórmula empleada para calcular alguna frecuencia

f en Hertz a m de la escala Mel [13], se describe en (19). La operación inversa se describe en (20). La Figura IV describe el comportamiento de las ecuaciones (18) y (19).

$$m = 2595 \log_{10} \left[1 + \frac{f}{700} \right] = 1127 \ln \left[1 + \frac{f}{700} \right], \quad (19)$$

$$f = 700 \left(e^{\frac{m}{1127}} - 1 \right). \quad (20)$$

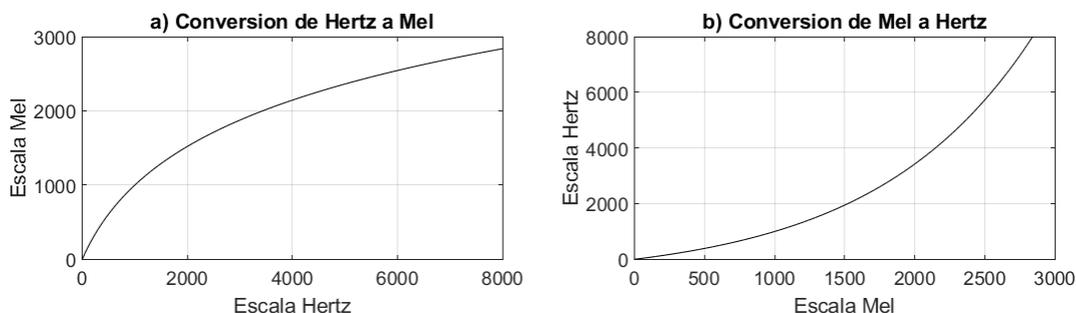


Figura IV. a) Gráfica de escala Mel versus escala Hertz. b) Gráfica de escala de Hertz versus escala de Mel.

Una vez filtrada la señal, se obtiene la potencia promedio de cada vector resultante.

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N |x(k)|^2, \quad (21)$$

y después, se aplica la función logaritmo y por último la transformada discreta de coseno.

$$c_s(n) = \sum_{k=1}^N S(k) \cos \left[\pi n \left(\frac{k-1}{N} \right) \right], \quad 1 \leq n \leq N \quad (22)$$

El resultado de la aplicación de las ecuaciones (20) y (21) es la obtención del espectro de potencia de la señal en los intervalos de frecuencia establecidos por la escala Mel. El cepstrum en frecuencias Mel (MFC), realmente es un cepstrum con su espectro mapeado en la escala Mel antes de aplicar la operación logarítmica y la transformada inversa de Fourier, como lo mostrado en la Figura V.

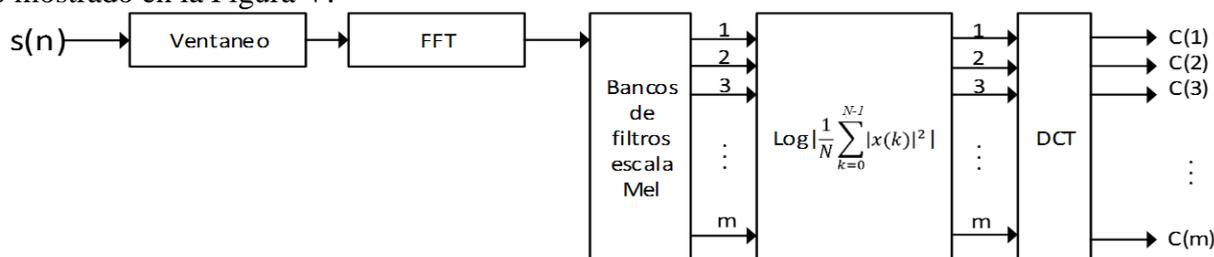


Figura V. Proceso de extracción de MFCC [20].

Al multiplicar la señal por un banco de filtros triangulares (Figura VI) se logra obtener las componentes de frecuencia que le aporta la señal analizada a cada banda del banco de filtros. Comúnmente se usan 24 filtros triangulares espaciados de acuerdo con la escala de frecuencias Mel. Con estos filtros se calcula el promedio del espectro alrededor de cada frecuencia central.

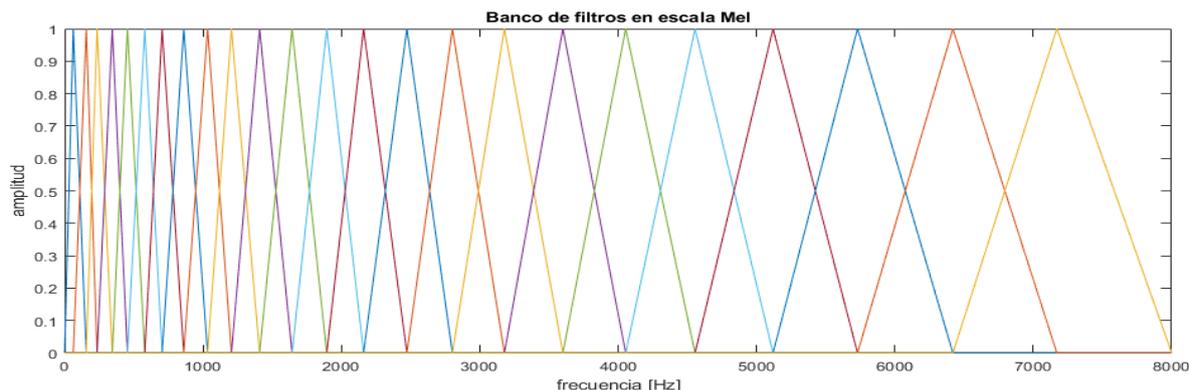


Figura VI. Banco de filtros triangulares superpuestos en escala de Mel.

Cada banco de filtros corresponde a la función (23), donde H_m corresponde al m -ésimo filtro. $1 \leq m \leq M + 2$; f_m corresponde a las $M + 2$ frecuencias Mel-espaciadas de los M filtros y k es la frecuencia en Hertz.

$$H_m(k) = \begin{cases} 0 & k < f_{m-1} \\ \frac{k - f_{m-1}}{f_m - f_{m-1}} & f_{m-1} \leq k \leq f_m \\ \frac{f_{m+1} - k}{f_{m+1} - f_m} & f_m \leq k \leq f_{m+1} \\ 0 & k > f_{m+1} \end{cases} \quad (23)$$

2.2 Diseño del sistema de reconocimiento de locutor.- Tomando como base el diagrama a bloques de la Figura I, en la Tabla I se describen cada una de las etapas de los sistemas de reconocimiento de locutor propuestos.

Tabla I. Descripción de las etapas de los sistemas de reconocimiento de locutor basados en los Algoritmos LPC, CC y MFCC.

Etapa	Descripción
Fuente	La fuente corresponde a las señales de audio grabadas de diferentes locutores, estas constan de emisiones de audio en idioma español. Se propone obtener muestras originales consideradas sin ruido y versiones diferentes de las mismas, pero con diferentes niveles de ruido, es decir con variaciones en el nivel de relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés). Las señales de ruido que se agregan a las muestras originales se pueden generar de forma artificial para el caso de ruido gaussiano y por la mezcla de diferentes voces para el caso de ruido de bullicio.
Captura y digitalización	Esta etapa consta de un transductor (micrófono) que convierte las vibraciones sonoras en variaciones de voltaje, después, mediante un convertidor analógico digital (ADC, por sus siglas en inglés) se realiza un muestreo de la señal.
Pre procesamiento	En la etapa de pre procesamiento se realiza el ventaneo y se aplican filtros para adecuar la señal antes de ser procesada. En esta investigación se propone utilizar un filtro preénfasis, ya que los segmentos de voz sonoros tienen una pendiente espectral negativa, este filtro permite contrarrestar esta pendiente,

	mejorando así la eficiencia de las etapas posteriores. Se utiliza una ventana de Hamming (proceso de ventaneo) para poder eliminar problemas causados por los cambios rápidos en los extremos de las tramas de voz.
Extracción de características	Para la extracción de las características del hablante se aplican los algoritmos LPC, CC y MFCC en los que se basa esta investigación. Cada algoritmo se implementó en Matlab el cual a comparación de Python permite un manejo sencillo de vectores en tiempo real gracias a su Workspace. Cabe resaltar que no se usaron las funciones nativas para una posible implementación en cualquier otro lenguaje de programación; se hizo la validación de estos algoritmos comparándolos con los de Matlab y, también se corroboraron con la reconstrucción del espectro de la señal original.
Modelo de referencia y semejanza	El modelo de referencia utilizado es una red neuronal, debido a su capacidad de clasificación y aprendizaje para determinadas tareas, con solamente datos y sin necesidad de conocer la fuente. Las redes neuronales se componen de dos etapas: etapa de entrenamiento y etapa de validación [14]. En la etapa de entrenamiento la red neuronal se ajusta de tal manera que relaciona los valores de entrada a su salida correspondiente, en este caso, relaciona cada grabación de voz con el usuario a verificar o rechazar. En la etapa de validación se introducen grabaciones que no se hayan utilizado en la etapa de entrenamiento, pudiendo tener un resultado exitoso o erróneo en la verificación de locutor, calculando así el porcentaje de eficiencia de la red.

2.2.1 Red neuronal .- Como modelo de referencia se utilizó una red neuronal tipo perceptrón multicapa con el algoritmo de entrenamiento de retropropagación, este tipo de red es el más usado [15]. Para encontrar la topología de la red que diera mejores resultados, se hizo variar entre el número de capas y número de neuronas, probando redes con 1, 3 y 5 capas ocultas, y usando valores de 16, 64 y 256 en el número de neuronas de cada una de las redes; como resultado, la topología con el mejor rendimiento fue de 5 capas ocultas y 16 neuronas en cada capa.

2.3 Variables de estado. - La Tabla II describe las diferentes variables de estado aplicadas a los sistemas de reconocimiento de locutor. Para determinar el número de bits de resolución, se utilizó la siguiente ecuación de error de cuantificación $SQNR_{dB}$:

$$SQNR_{dB} = 20 \log_{10}(2^n), \quad (24)$$

donde n es el número de bits. Para determinar el número de muestras por trama se utilizó:

$$T = fs * \text{tamaño}. \quad (25)$$

Tabla II. Descripción de variables de estado utilizadas.

Variable	Descripción
Frecuencia de muestreo	Se eligió la frecuencia de 16000 Hz. Se conoce como audio de banda ancha o audio de alta definición, debido a que permite una mejor calidad al grabar la voz, permitiendo grabar así hasta 8 hasta fonemas. Esta frecuencia de muestreo es utilizada en aplicaciones modernas de VoIP [16].
Bits de resolución	Se utilizaron 16 bits/muestra para minimizar el error de cuantificación. Con esta resolución utilizando la ecuación (23), el error de cuantificación $SQNR_{dB}$ máximo es 96.32 dB.
Tamaño de la ventana/trama	El tamaño elegido es de 32 ms, ya que en el artículo [17] se realizó un experimento para comparar distintos tamaños de ventana al grabar 6 consonantes oclusivas (consonantes cuyo tipo de sonido consonántico

	obstruyente es producido por una detención del flujo de aire y por su posterior liberación. Ejemplo: [b, d, g, p, t, k]). El resultado dictó que 20 – 40 ms es un tamaño apropiado para el correcto entendimiento de las palabras. Con una $fs = 16000 \text{ Hz}$, aplicando (24), el número de muestras en una trama T será de $T = fs * \text{tamaño} = 16000 * 0.32 = 512$. Es decir, cada trama contendrá 512 muestras por segundo, que es una potencia de 2, facilitando así el cálculo de la FFT.
Número de puntos en FFT	Se utilizan 512 puntos, correspondiente con el tamaño de la trama.
Número de repeticiones	Se eligieron 10 repeticiones, de las cuales 8 se utilizan para entrenar la red neuronal artificial y 2 repeticiones se utilizan para probar la red.
Palabras a utilizar	Estas palabras se seleccionaron basándose en [18], debido a que sus características fonéticas proporcionan más información (en estas palabras las cuerdas vocales vibran), que caracteriza a cada locutor que pertenecerá al sistema: “gama, mano, llave, barra, niño, lobo, mayo, daga, lava”.
Grabaciones con ruido de bullicio	Se han realizado grabaciones dentro de la Unidad Académica, buscando los lugares con mayor cantidad de personas hablando, destacando la cafetería de la Unidad.
Formato de audio	Se hizo la elección del formato “.wav”, tomando en cuenta que es un formato sin compresión, que es de los más usados y es soportado por una gran cantidad de reproductores y programas.
Número de coeficientes en los algoritmos	El número de coeficientes se puede seleccionar dentro del sistema, sin embargo, siguiendo las recomendaciones de [2], se han utilizado entre 16-40 coeficientes en cada algoritmo de extracción de características.

3 Resultados. - Esta sección describe la validación de los algoritmos utilizados y los distintos escenarios de prueba que se llevaron a cabo.

3.1 Validación de algoritmos. - Para corroborar la implementación de los algoritmos, es decir, que extraen de forma correcta las características de la voz, se realizó una aproximación al espectro de voz del locutor, basándose en los coeficientes de cada algoritmo. La Figura VII muestra la reconstrucción del espectro de voz para los algoritmos LPC, CC y MFCC respectivamente usando 8, 16, 32, 64, 128 y 256 coeficientes.

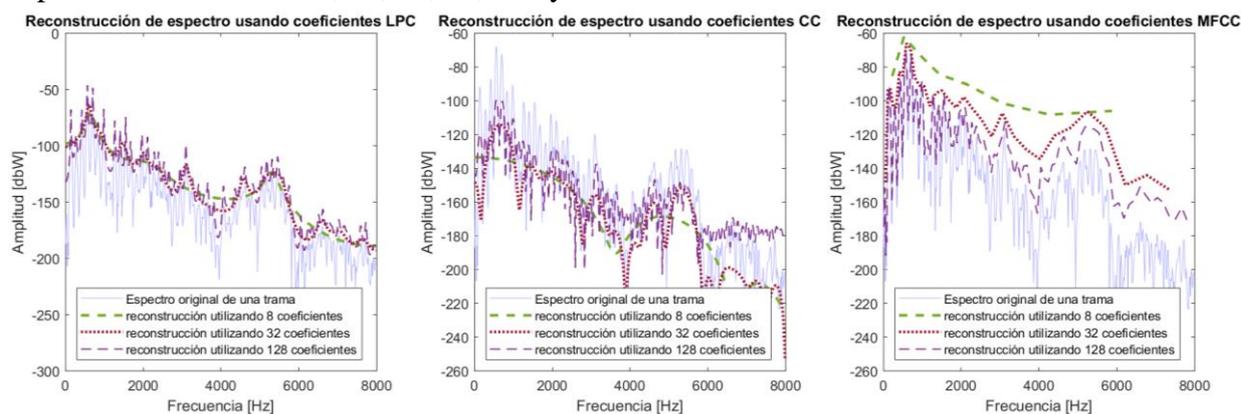


Figura VII. Espectro aproximado de voz variando los coeficientes LPC, CC y MFCC.

Se realizó una comparación entre los algoritmos implementados y los nativos de Matlab, para una palabra con 30 tramas de 32ms los resultados se muestran en la Tabla III. Para los algoritmos LPC y CC las funciones nativas muestran un menor tiempo, mientras que en MFCC es lo contrario, al revisar la documentación de Matlab se justifica el mayor tiempo

por el banco de filtros el cual presenta además de estar en intervalos logarítmicos, presenta amplitudes logarítmicas. Otra explicación, es que la función de Matlab nativa calcule el banco de filtros por cada vez que se manda a llamar la función, mientras que el algoritmo que se implementó permite guardar el banco de filtros en una variable para evitar tener que calcularlo en cada iteración. Por otra parte, al usar la función FFT nativa de Matlab se explica que el error cuadrático medio del algoritmo CC sea 0.

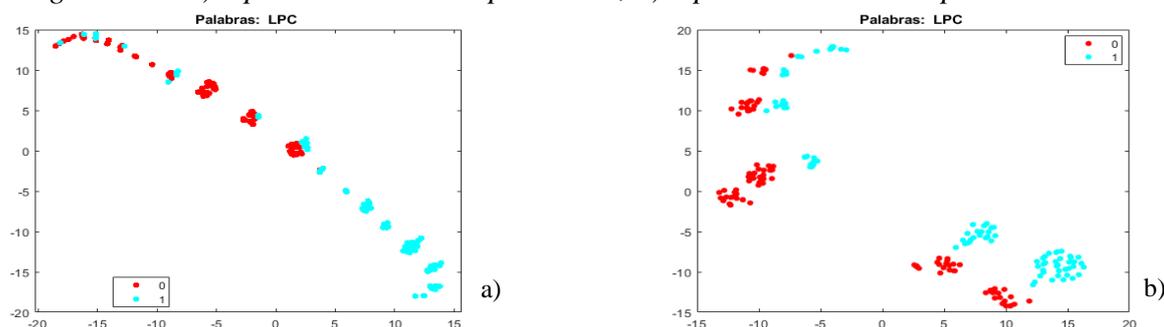
Para los algoritmos LPC y CC las funciones nativas muestran un menor tiempo, mientras que en MFCC es lo contrario, al revisar la documentación de Matlab se justifica el mayor tiempo por el banco de filtros el cual presenta además de estar en intervalos logarítmicos, presenta amplitudes logarítmicas. Otra explicación, es que la función de Matlab nativa calcule el banco de filtros por cada vez que se manda a llamar la función, mientras que el algoritmo que se implementó permite guardar el banco de filtros en una variable para evitar tener que calcularlo en cada iteración. Por otra parte, al usar la función FFT nativa de Matlab se explica que el error cuadrático medio del algoritmo CC sea 0.

Tabla III. Resultados con coeficientes de orden 30.

	Algoritmo LPC	Algoritmo CC	Algoritmo MFCC
Complejidad computacional	$O(Nm)$	$O(N \log_2 N)$	$O(Nm + N \log_2 N)$
Tamaño de la matriz resultante	30x32	30x512	30x32
Tiempo de ejecución Matlab [s]	0.016263	0.006297	0.297807
Tiempo de ejecución propio [s]	0.020659	0.010825	0.063452
Diferencia de tiempos	-0.004396	-0.004528	0.234355
Error cuadrático medio. [Amplitud ²]	7.2166e-20	0	0.8799
Error cuadrático medio [dB]	-881.5064	-Inf	-2.5596

Al realizar la prueba de las 9 propuestas con 10 repeticiones (Figura VIII.a), se observó que existen puntos (representaciones de cada muestra) que están sobrepuestos entre cada locutor, a diferencia de realizar la prueba para una palabra con 100 repeticiones (Figura VIII.b).

Figura VIII. a) 9 palabras con 10 repeticiones, b) 1 palabra con 100 repeticiones.



3.2 Escenarios de prueba. - Para la selección de los escenarios de prueba, se utilizaron 32 coeficientes en los algoritmos de extracción, se programó una red neuronal con 5 capas ocultas

y 16 neuronas por capa y un entrenamiento con 10,000 épocas para cada una de las palabras. El resultado del porcentaje de reconocimiento por cada locutor es mostrado en la Tabla III.

Tabla IV. Porcentaje de reconocimiento de locutor de una red neuronal entrenada por palabra.

Palabras	Locutor 1			Locutor 2		
	LPC	CC	MFCC	LPC	CC	MFCC
Barra	75	75	75	75	75	75
Daga	50	50	75	75	75	75
Gama	100	100	100	100	100	100
Lava	75	75	75	75	75	75
Llave	75	50	75	75	75	75
Lobo	100	100	100	100	100	100
Mano	75	75	75	50	50	50
Mayo	100	100	100	75	75	75
Niño	100	75	75	75	100	100
Murciélago	75	75	75	75	50	100
Aurelion	100	75	75	75	100	100

Tomando como punto de partida la palabra “Gama” en la que se obtuvo mayor porcentaje en los tres algoritmos de reconocimiento, se realizaron pruebas utilizando un mayor número de repeticiones, procurando tener los mismos parámetros (entonación y rapidez) en ambos usuarios para después corromper las muestras de voz con ruido (bullicio y gaussiano) y observar los resultados de eficiencia de estos sistemas.

3.3 Discusión de resultados.- El porcentaje de reconocimiento de locutor para las muestras contaminadas con ruido gaussiano con una variación en la SNR de 60 dB a -20 dB se muestra en la Tabla V. La Figura IX y la Figura X muestran las gráficas respectivas. Para ambos locutores, el algoritmo que presentó mejor desempeño fue el de MFCC, seguido del algoritmo LPC (el porcentaje de reconocimiento correcto logra mantenerse para valores más pequeños de SNR). Para el caso del algoritmo CC, incluso con valores altos de SNR mantuvo un bajo desempeño.

Tabla V. Porcentaje de reconocimiento de locutor para la palabra “Gama” obtenido al variar la SNR con ruido gaussiano y utilizando 16 y 32 coeficientes.

	Locutor 1						Locutor 2					
	LPC		CC		MFCC		LPC		CC		MFCC	
SNR [dB]	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.
60	100	100	5	5	97.5	100	100	100	7.5	5	100	100
50	97.5	100	5	7.5	97.5	100	100	100	7.5	5	100	100
40	92.5	92.5	5	7.5	97.5	100	97.5	97.5	7.5	5	100	100
30	52.5	62.5	5	5	97.5	97.5	70	82.5	7.5	5	100	100

20	50	50	5	5	95	95	40	50	7.5	5	100	85
10	50	32.5	5	5	70	70	42.5	45	7.5	5	72.5	55
0	50	2.5	5	5	55	52.5	45	45	7.5	5	55	50
-10	50	7.5	5	5	50	47.5	37.5	35	7.5	5	55	40

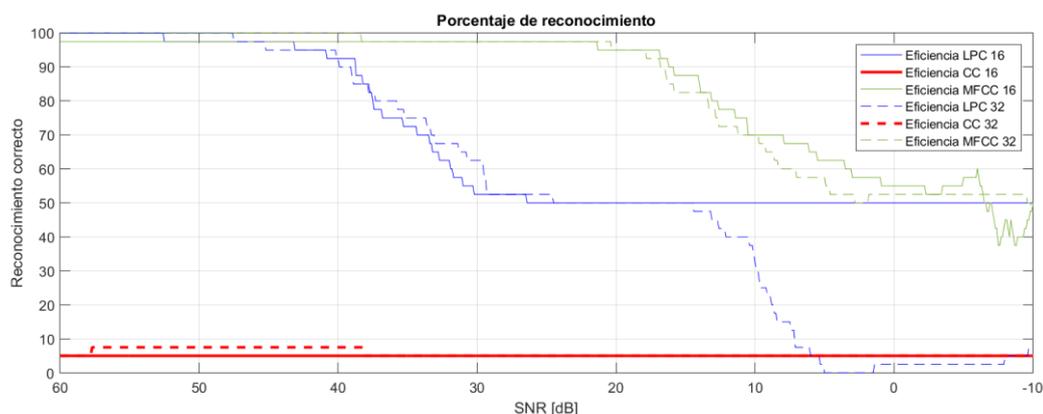


Figura IX. Porcentaje de reconocimiento en locutor 1 con ruido gaussiano.

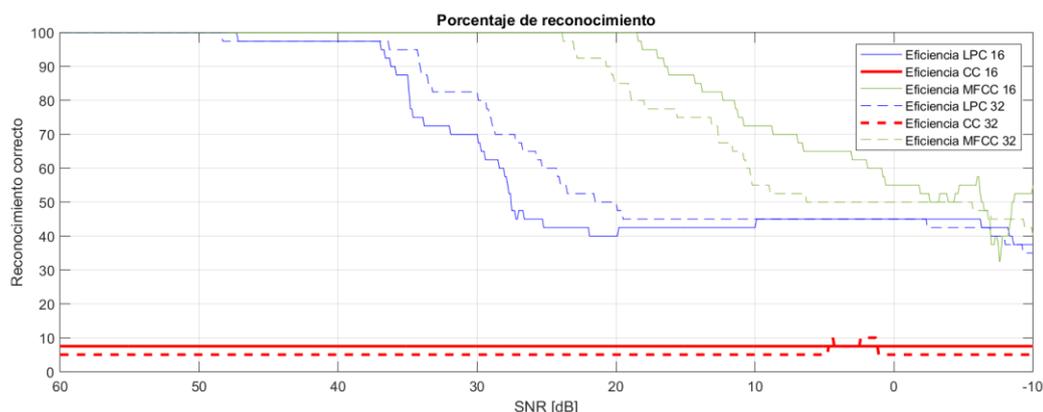


Figura X. Porcentaje de reconocimiento de locutor 2 con ruido gaussiano.

El porcentaje de reconocimiento de locutor para las muestras contaminadas con ruido de bullicio con una variación en la SNR de 60 dB a -20 dB se muestra en la Tabla VI. La Figura XI y la Figura XII muestran las gráficas correspondientes. Los algoritmos presentaron comportamientos similares a los obtenidos al aplicar ruido gaussiano, es decir, el algoritmo MFCC obtuvo el mejor desempeño, seguido por el algoritmo LPC y muy por debajo el desempeño del algoritmo CC.

Tabla VI. Porcentaje de reconocimiento de locutor para la palabra "Gama" obtenido al variar la SNR con ruido de bullicio y utilizando 16 y 32 coeficientes.

	Locutor 1						Locutor 2					
	LPC		CC		MFCC		LPC		CC		MFCC	
SNR [dB]	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.	16 c.	32 c.
60	100	100	5	5	97.5	100	100	100	7.5	5	100	100

50	97.5	100	5	7.5	97.5	100	100	100	7.5	5	100	100
40	100	100	5	5	97.5	100	97.5	100	7.5	5	100	100
30	92.5	92.5	5	5	97.5	97.5	95	100	7.5	5	100	100
20	72.5	57.5	5	5	95	95	70	87.5	7.5	5	95	87.5
10	50	50	5	5	80	65	50	57.5	7.5	5	82.5	62.5
0	50	42.5	5	5	65	60	40	45	7.5	5	50	52.5
-10	50	37.5	5	7.5	40	50	42.5	35	7.5	7.5	50	32.5

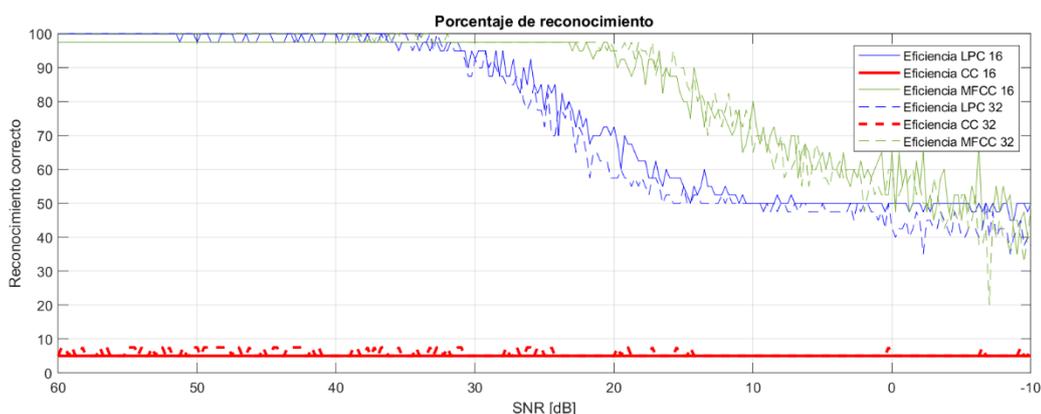


Figura XI. Porcentaje de reconocimiento de locutor 1 con ruido de bullicio.

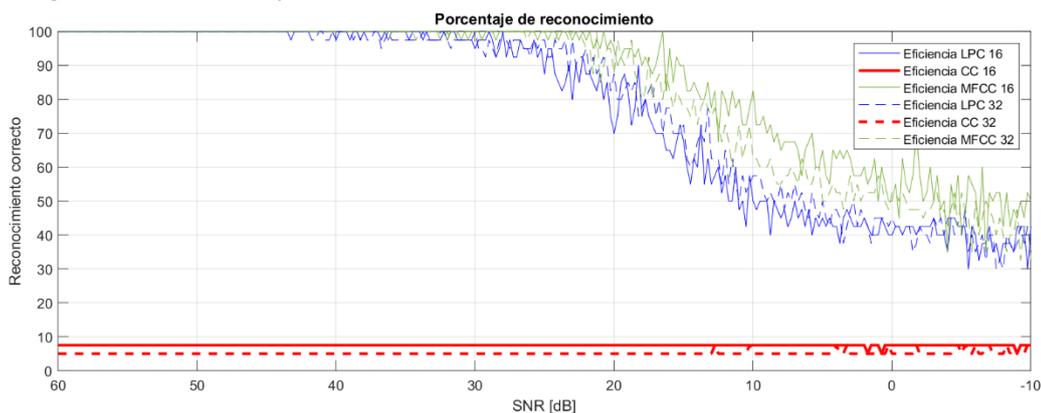


Figura XII. Porcentaje de reconocimiento de locutor 2 con ruido de bullicio.

Al variar la SNR de las señales de entrada, a partir de los 40 dB's se observó un decremento en la eficiencia de los sistemas LPC mientras que los sistemas MFCC mostraron soportar hasta 20 dB's antes de disminuir su eficiencia. En la variación de los coeficientes, las gráficas tienen un comportamiento similar, por lo que no es un factor para mejorar la robustez del algoritmo frente al ruido. En cuanto a las diferencias de ruido gaussiano y de bullicio, en este último las gráficas presentan un comportamiento más inestable, esto podría ser por una mayor presencia de falsos positivos, debido a que se el ruido de bullicio proviene del mismo tipo de fuente que se desea reconocer (locutores). Por otro lado, los sistemas con LPC mostraron un decremento mayor frente al ruido gaussiano, llegando al 50% de reconocimiento en los 25 dB.

Con respecto a la red neuronal, la topología influyó en el porcentaje de reconocimiento que se obtuvo en los sistemas antes de probarlos con señales con ruido. Para poder escoger la topología de red a utilizar, se realizaron pruebas variando el número de capas y el número de

neuronas de la red. Finalmente, se observó una mejor relación entre porcentaje de reconocimiento y tiempo de procesamiento al usar 5 capas ocultas con 16 neuronas en cada capa.

4 Conclusiones. - En este trabajo se han implementado sistemas de verificación de locutor utilizando los algoritmos LPC, CC y MFCC de extracción de características de la voz. Para llevar a cabo estos sistemas, se desarrolló e implementó una red neuronal tipo perceptrón multicapa entrenada con el algoritmo de retropropagación.

Los resultados muestran que el ocupar más coeficientes en los algoritmos, no implica que estos sean más resistentes al ruido, sin embargo, la necesidad de mayor número de coeficientes para obtener un mayor porcentaje de reconocimiento se hace presente en el algoritmo CC. Con respecto al tipo de palabras a utilizar, el usar palabras con todas las vocales, no hace al sistema más robusto. Un punto para resaltar es que la utilización de una palabra con varias repeticiones, a diferencia de varias palabras con pocas repeticiones, presenta una mejora en la verificación de locutor (reconocimiento). Las gráficas de porcentaje de reconocimiento cuando están bajo el ruido de bullicio presentan un comportamiento más caótico que cuando están bajo el ruido gaussiano, sin embargo, el desempeño de los algoritmos con ambos tipos de ruido utilizados se mantuvo.

5 Referencias

- [1] T. Kinnunen y H. Li, "An Overview of Text-Independent Speaker Recognition: from Features to Supervectors," *Speech Communication*, vol. 52, no. 1, pp. 12-40, 2010.
- [2] H. Beigi, *Fundamentals of speaker recognition*. New York, USA: Springer, 2011.
- [3] M. Ray, M. Chandra y B. Patil, "Speech Coding Techniques for VoIP Applications: A Technical Review," *World Applied Sciences Journal*, vol. 33 no. 5, pp. 736-743, 2015.
- [4] C. Ittichaichareon, S. Suksri y T. Yingthawornsuk, "Speech Recognition using MFCC," en International Conference on Computer Graphics, Simulation and Modeling (ICGSM'2012), Pattaya (Thailand), 2012, pp. 135-138.
- [5] X. Jing, J. Ma, J. Zhao y H. Yang, "Speaker recognition based on principal component analysis of LPCC and MFCC.," en International Conference on Trends in Automation, Communications and Computing Technology, 2015, December, pp. 1-5.
- [6] A. Charisma, M. Reza Hidayat y Y. Bakti Zainal, "Speaker Recognition Using Mel-Frequency Cepstrum Coefficients and Sum Squar," Engineering Faculty of Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia, 2017.
- [7] A. N. Chadha, J. H. Nirmal y P. Kachare, A comparative performance of various speech analysis-synthesis techniques, *International Journal of Signal Processing Systems*, vol. 2, no. 1, Jun., pp. 17-22, 2014.
- [8] P. Manrique Ramírez y M. A. Meléndez Velázquez, «Diseño de un sistema de codificación de predicción lineal (LPC),» Ciudad de México, 1999.
- [9] L. Rabiner y B.-H. Juang, *Fundamentals of Speech Recognition*. Englewood Cliffs: Prentice Hall International, 1993.
- [10] C. Collomb, "Tutorial on linear prediction and Levinson Durbin," *Empty Loop*, febrero 3, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.emptyloop.com/technotes/A%20tutorial%20on%20linear%20prediction%20and%20Levinson-Durbin.pdf>. [Último acceso: 12 02 2019].

- [11] J. R. Deller, J. H. L. Hansen y J. G. Proakis, *Discrete-Time Processing of Speech Signals*. New York: Macmillan, 1993.
- [12] J. L. Cheang Loong, K. S. Subari, M. Kamil Abdullah, N. N. Ahmad y R. Besar, «Comparison of MFCC and Cepstral Coefficients as a Feature Set for PCG Biometric Systems,» 2010.
- [13] S. S. Stevens, Volkman y E. B. John & Newman, "A Scale for the Measurement of the Psychological Magnitude Pitch," *Acoustical Society of America*, vol. 8, nº 3, p. 6, 1937.
- [14] V. G. Vílchez García, "Estimación y clasificación de daños en materiales utilizando modelos AR," Sep. 2010. [En línea]. Disponible en: <http://ceres.ugr.es/~alumnos/esclas/>. [Último acceso: 12 05 18].
- [15] W. Gevaert, G. Tsenov y V. Mladenov, "Neural Networks used for Speech Recognition," *Journal of Automatic Control, University of Belgrade*, vol. 20 pp. 1-7, 2010.
- [16] VoIP Supply, «Cisco hd voice,» VoIP Supply, [En línea]. Disponible en: <https://www.voipsupply.com/cisco-hd-voice>. [Último acceso: 22 03 2019].
- [17] K. K. Paliwal, J. G. Lyons y K. K. Wojcicki, "Preference for 20-40 ms window duration in speech analysis," en 2010 4th International Conference on signal Processing and Communication Systems (ICSPCS).
- [18] C. S. Aguilar Orozco y M. W. Marín Benítez, *Sistema certificador de locutor por voz*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2003.

Análisis de las principales competencias necesarias para la implementación de la Industria 4.0 en el sector agroindustrial uruguayo

Analyzing the main competences required for the implementation of Industry 4.0 in the Uruguayan agro-industry sector

Daniel Jurburg¹ ; Álvaro Cabrera²

Recibido: 07/2019

Aceptado: 09/2019

Resumen. -En paralelo con los desafíos técnicos relacionados a la Industria 4.0, un nuevo reto surge: ¿cómo preparar a los actuales y futuros trabajadores, de manera de que puedan adaptarse a los empleos que surgirán y que demandarán nuevos requisitos en términos de competencias? El objetivo principal de este proyecto es investigar qué competencias serán esenciales para el futuro del sector agroindustrial. Se enfoca el estudio en dicho sector dado que este es uno de los sectores económicos con mayor riesgo de automatización de los puestos de trabajo según la literatura. Para determinar las competencias necesarias, se realizó una extensa revisión de la literatura, de la que surgieron 31 competencias consideradas fundamentales para el futuro. Dicha matriz de competencias fue luego validada a través de la realización de una serie de entrevistas semi-estructuradas a stakeholders del sector, para determinar los niveles actuales en materia de esas 31 competencias, y su ponderación para el futuro. En particular, se generaron gráficos de radar mostrando los valores actuales y futuros, identificando el gap de competencias necesario para avanzar en materia de transformación digital y tecnológica del sector. Las competencias determinadas como las más relevantes para el futuro son: *Conocimientos de Informática, Capacidad de operar con nuevas interfaces, Aprendizaje Continuo, Pensamiento Analítico y Lógico, Expresión Oral, Trabajo en equipo, Confianza en la tecnología y Flexibilidad*

Palabras Clave: Industria 4.0, agroindustria, competencias profesionales, factor humano

Abstract. -In parallel with the technical challenges related to Industry 4.0, a challenge arises about how to prepare current and future workers so that they can adapt to future jobs, which will demand new requirements in terms of competences and skills. The main objective of this paper is to investigate which competences will be essential towards the future jobs in the agro-industry sector. The investigation was focused in this sector, since is one of the economic sectors with the greatest risk of job automation. An extensive literature review, followed by in depth interviews to relevant stakeholders in the agricultural sector in Uruguay were conducted in order to identify the main competences considered critical towards the future. In particular, radar graphs were created, showing the actual and expected level of development of 31 professional competences, divided into four main categories. The competences acknowledged by the stakeholders as most relevant for the future are: *IT knowledge, Ability to interact with modern interfaces, Active Learning, Analytical and Logical Thinking, Oral expression, Teamwork, Trust in technology and Flexibility.*

Keywords: Industry 4.0, agribusiness, professional competences, human factor

¹CINOI - Universidad de Montevideo; djurburg1@um.edu.uy ORCID 0000-0001-9226-1520

²CINOI - Universidad de Montevideo. ORCID 0000-0001-8646-7709

1. Introducción. -El mundo se ha enfrentado a momentos en los que la tecnología disruptiva modifica la forma en que operan las fábricas y las empresas, y, por lo tanto, también lo hicieron las competencias que los trabajadores necesitaban para tener éxito. Estos cambios repentinos suelen denominarse revolución industrial. Tres de ellas ya transcurrieron, y una Cuarta Revolución, también conocida como Industria 4.0, está ocurriendo en estos momentos en que la tecnología de la digitalización y la robótica están aumentando [1]. Esta nueva revolución, como indican muchos estudios internacionales, generará en un futuro cercano una gran disrupción de las competencias laborales necesarias, y ese será uno de los principales desafíos a afrontar [2–7].

Además, esta revolución está conduciendo a automatizar gran parte de la producción, con una consecuencia evidente: una gran cantidad de puestos de trabajo pueden desaparecer. Por ejemplo, un estudio realizado por Frey y Osborne [5] concluyó que el 47% del empleo total en Estados Unidos tiene un alto riesgo de automatización en un lapso de 20 años. Este estudio indica, a su vez, que una de las áreas de producción que tiene el mayor riesgo de automatizarse es la agrícola. Este sector presenta una fuerza de trabajo con un nivel educativo bajo –en rasgos generales-, que mayormente realiza tareas manuales y repetitivas. Esto hace que sea un sector con alto riesgo de automatización y de difícil reconversión laboral.

Por dicho motivo, este proyecto tiene como objetivo principal identificar las principales competencias necesarias para el sector agroindustrial en el futuro de la Industria 4.0. Este tipo de investigaciones les permitirá a las empresas obtener información científica que las habilite a comenzar a diseñar e implementar programas de capacitación para sus empleados, y mejorar así su idoneidad frente a esta revolución.

2. Industria 4.0. -Este término fue presentado en la Feria de Hannover en el año 2011. Describía la iniciativa común entre empresas, educadores y gobierno para fortalecer la competitividad de la industria manufacturera alemana. Más recientemente, varios países han adoptado también un abordaje similar para el futuro [4, 8]. Dado que este concepto es muy reciente, aún no se ha propuesto una definición única [9]. Igualmente, la mayor parte de las definiciones coinciden en algunos aspectos en común. Una característica principal es la integración del mundo físico y digital, permitiendo el intercambio de datos en tiempo real entre personas, máquinas y productos, a lo largo de toda la cadena de valor. En este sentido, aparecen tres componentes que se consideran críticos: el Internet de las Cosas, los Sistemas Ciberfísicos, y las Fábricas Inteligentes [9]. El primero de ellos permite que las máquinas, productos y objetos interactúen entre sí y cooperen para lograr sus objetivos. El segundo permite la fusión entre el mundo real y el virtual, mediante sistemas de computación embebidos en los elementos de producción, que monitorean y controlan los procesos. Y el tercer componente es la combinación de las dos tecnologías anteriores para lograr un sistema de producción más descentralizado y autónomo.

Uno de los principales desafíos que se derivan de esta nueva revolución industrial es lo referente a los puestos de trabajo. Algunos reportes sugieren que van a disminuir [10], mientras que otros afirman que es más probable que la creación de trabajos exceda a aquellos destruidos [3]. Varios estudios refieren a esta dicotomía y concluyen que ambos futuros son posibles, y solo el tiempo dirá cuál va a ocurrir [11]. En lo que la mayoría de las investigaciones están de acuerdo es que los trabajadores van a tener que desarrollar nuevas competencias para poder adaptarse correctamente a los cambios que propondrá la Industria 4.0.

3. Importancia del sector Agroindustrial. -De acuerdo al Banco Mundial [12], el sector agroindustrial es crucial para el crecimiento económico de las naciones, ya que representó un tercio del producto bruto interno mundial en el año 2014. A su vez, se refieren a este sector como una de las mejores herramientas para terminar la pobreza extrema y lograr alimentar a las 9.7 billones de personas esperadas para el 2050. También indican que actualmente un 25% de la población mundial trabaja en este sector. Estos números muestran el panorama de crucial importancia que reviste este sector para el mundo entero; por un lado, por la necesidad de un crecimiento en la producción de alimentos, y, por otro lado, debido a la cantidad de gente que emplea.

Particularmente en Uruguay, la agroindustria es un motor central de la economía, representando el 79% del valor de las exportaciones en el 2017 [13]. Cabe destacar a su vez, que de las 20 empresas que más exportaron en el 2017, 17 fueron empresas agroindustriales [14]. Aproximadamente el 15% de la mano de obra del país se encuentra en esta industria. Pero esta mano de obra tiene un bajo nivel de instrucción, en términos generales. Solamente el 4% tiene un nivel terciario o mayor [15]. Esto es una limitación para el sector, y una dificultad que deberá ser enfrentada por cualquiera que esté dispuesto a entrenar trabajadores en esta área.

Habiendo apreciado la importancia de este sector y la cantidad de empleos que representa a nivel mundial, su futuro en la Industria 4.0 debe ser analizado cuidadosamente, en especial considerando que los estudios existentes en la literatura proponen al sector como uno de los que tienen los mayores riesgos de automatización. Por ejemplo, Manyika et al. [2] señala que es el tercer sector económico con riesgo más alto de automatización, con un 58%, mientras que un estudio en Uruguay le da a este sector el mayor riesgo, con 78% [16]. Estos resultados soportan la necesidad de seguir investigando en este sector, en particular trabajando para identificar cuáles son las competencias que serán necesarias en este sector en el futuro, de manera de minimizar el impacto negativo que la transformación 4.0 pueda generar en las personas empleadas en él.

4. Metodología. -Para poder identificar las competencias que serán cruciales en el sector agroindustrial para la aplicación de la Industria 4.0, se realizó una extensa revisión bibliográfica, seguida de una serie de entrevistas semi-estructuradas a una muestra seleccionada dentro de un grupo de stakeholders del sector agropecuario uruguayo. La metodología se desarrolló como se indica a continuación.

4.1 Revisión literaria. -En primer lugar, se realizó una detallada revisión de la literatura para definir las principales competencias consideradas esenciales para el futuro de la Industria 4.0. La revisión se realizó inicialmente en Scopus, al ser una de las mayores y más prestigiosas bases de datos de revisión por pares, y luego se amplió con otras bases de datos.

La primera búsqueda efectuada fueron las palabras “*Industry 4.0*” y “*Fourth Industrial Revolution*”. De esta búsqueda se obtuvieron 6.083 resultados, lo que muestra la cantidad de trabajos vinculados a esta temática. De todos estos resultados, más del 85% son posteriores al año 2010, lo que refleja la actualidad de la misma. Posteriormente, dada la gran cantidad de resultados obtenidos, se realizó un refinamiento de la búsqueda agregando las palabras “*skills*”, “*qualification*”, “*employment*”, “*human resources*” y “*abilities*”.

La búsqueda presentada en la Tabla I, resulta:

Industry 4.0 <i>OR</i> Fourth Industrial Revolution	<i>AND</i>	Skills <i>OR</i> Abilities <i>OR</i> Human Resources <i>OR</i> Qualification <i>OR</i> Employment
---	------------	--

Tabla I: Esquema de la revisión bibliográfica realizada en Scopus

Este refinamiento brindó 639 documentos relevantes, de los cuáles 38 eran en idiomas diferentes al inglés o español, por lo que fueron inmediatamente excluidos. Se procedió posteriormente con una lectura de todos los títulos, y en aquellos que resultaban acordes a la temática se procedía a una lectura completa del resumen. De este análisis se eligieron 39 artículos que revestían una vinculación estrecha con el concepto de Industria 4.0, si bien no necesariamente hacían referencia explícita al tema de competencias necesarias.

A continuación, se decidió ampliar el espectro de búsqueda para encontrar otros trabajos de relevancia fuera de Scopus. La herramienta principal fue Google, y las palabras claves fueron las mismas que en la búsqueda previa. De esto surgieron trabajos muy interesantes, incluyendo artículos y reportes de las siguientes fuentes:

- UK Commission for Employment and Skills
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
- American Society of Mechanical Engineers
- BRICS Skill Development Working Group
- European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy (ITRE)
- Deloitte
- World Economic Forum
- McKinsey
- Boston Consulting Group

En total, 69 trabajos fueron seleccionados y analizados. De estos, solo 20 trabajos abordaban de forma más detallada y explícita aspectos referentes a las competencias necesarias para la Industria 4.0.

Luego de una caracterización general de los 20 trabajos seleccionados para el análisis, se procedió a realizar una lectura profunda de cada uno de ellos, extrayendo de los mismos las principales competencias mencionadas en cada artículo como fundamentales para el futuro y se las categorizó de acuerdo al marco conceptual propuesto por Hecklau et al. [17], que propone cuatro grandes categorías que son: *Competencias Técnicas*, *Competencias Metodológicas*, *Competencias Sociales* y *Competencias Personales*. Para ello, se generaron tablas con todas las competencias mencionadas por cada una de las cuatro categorías ya indicadas, y luego se tabuló la frecuencia de repetición de las mismas en la literatura analizada.

4.2 Entrevistas. -Para lograr contextualizar la realidad de la Industria 4.0 y las competencias necesarias para ella dentro del sector agroindustrial uruguayo, se decidió validar la matriz de competencias generada a través de la realización de una serie de entrevistas semi-

estructuradas a empresas y organismos referentes del sector¹⁸. Se les solicitaba a los entrevistados, entre otras cosas, que evaluaran, para cada una de las competencias anteriores, de 1 a 5 (siendo 1 muy poco capacitado, y 5 muy capacitado) el nivel actual que identificaban en los operarios del sector, y en nivel que consideraban que iba a ser necesario que tuvieran en 10 años.

El formato utilizado para las entrevistas se basó en los trabajos previos de Lleó et al. [18] y Hamzeh et al. [6], teniendo como principal objetivo identificar el gap de conocimiento al que los trabajadores de la agroindustria deberán enfrentarse ante el arribo de las nuevas tecnologías y modelos de negocio. Los resultados de dichas entrevistas se plasmaron en gráficos de radar, los cuales indican el nivel de competencias que los empleadores perciben en los trabajadores de la agroindustria hoy en día, y el nivel que consideran será necesario que tengan dentro de 10 años. A su vez, de las entrevistas se pretendió determinar, según la visión de los entrevistados, cómo la universidad puede colaborar con las empresas en los cambios tecnológicos que se están llevando a cabo. Y también se pretendió evaluar según la visión de las empresas del sector, la disrupción de los puestos de trabajo que esta tecnología traerá aparejada.

Previo a la realización de las entrevistas, se planteó un análisis de los stakeholders del sector agropecuario del país, de forma de identificar cuáles de ellos iban a ser más relevantes en las entrevistas. A su vez, se pretendió que todos los agentes interesados dentro del sector formaran parte de los entrevistados. Las categorías que se identificaron dentro de los stakeholders fueron: Productores (en donde están incluidas empresas de los rubros Forestal, Ganadería y Agricultura), Tecnología (implicando las empresas desarrolladoras de software para el agro, y las empresas proveedoras de tecnología para el mismo sector), Institutos Educativos y Gobierno (instituciones de gobierno enfocadas en el sector agropecuario). Esta división se aprecia en la *Figura I*.

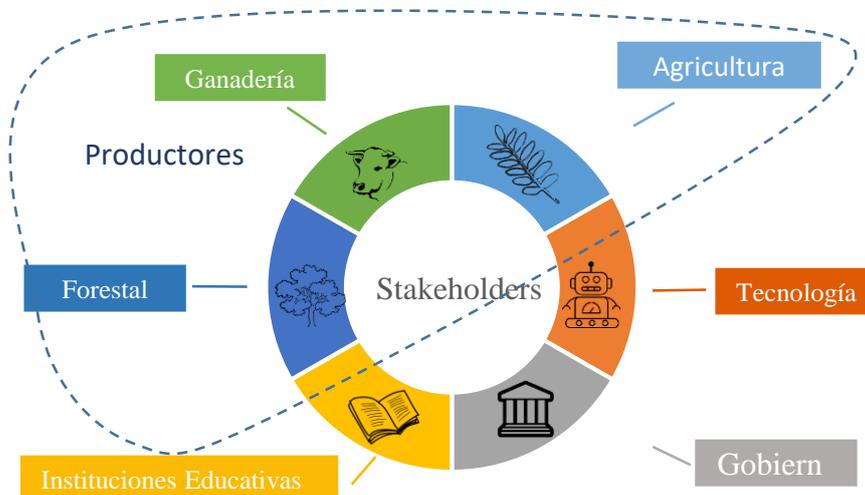


Figura 13: Stakeholders del sector agropecuario uruguayo

En total se realizaron 15 entrevistas que tuvieron una duración media de 45 minutos cada una. Dentro de la categoría denominada “Productores”, se realizaron 7 entrevistas. De ellas, 5 se realizaron a empresas que se encuentran dentro de las 8 mayores empresas exportadoras del país en el año 2017 (pertenecientes todas al sector agropecuario). Esas 5 empresas representaron aproximadamente un quinto del total de exportaciones del país en dicho año.

¹⁸ El cuestionario completo utilizado se puede solicitar a los autores

Tanto dentro de la categoría “Tecnología” como “Instituciones Educativas” se realizaron 3 entrevistas en cada una, y dentro de “Gobierno” fueron realizadas otras 2 entrevistas. Las personas entrevistadas fueron en su gran mayoría gerentes generales, gerentes de producción, gerentes de recursos humanos y gerentes de mejora continua. De esta forma se procuró entrevistar a las personas con más conocimiento y experiencia en la empresa acerca de las nuevas tecnologías y los consecuentes requerimientos de competencias en sus trabajadores.

5. Resultados

5.1 Generación de la tabla de competencias. -Para determinar las competencias necesarias para el futuro, se trabajó en base a la revisión bibliográfica explicada anteriormente. Los artículos analizados se presentan en la *Tabla II*, estando numerados del mismo modo en que aparecerán luego en las tablas de competencias.

1. World Economic Forum [19]	6. Smit et al. [21]	11. Moldovan [25]	16. Scott [27]
2. World Economic Forum [10]	7. Erol et al. [22]	12. Störmer et al. (26)	17. Kergroach [28]
3. Benešová & Tupa [1]	8. Breuer [23]	13. Hecklau, et al. [17]	18. Lorenz et al. [29]
4. Gehrke et al. [20]	9. European Centre for the Development of Vocational Training [24]	14. Lleó et al. [18]	19. Cotet et al [30]
5. Lorenz et al. [7]	10. Aulbur et al. [11]	15. Ackermann y Cortelezzi [15]	20. Davies et al. [31]

Tabla II: Artículos analizados para determinar las competencias frente a la Industria 4.0.

A los efectos de realizar una breve caracterización de los trabajos analizados, al agrupar estos 20 estudios, se advierten las siguientes características:

- El 85% de ellos tienen menos de 4 años de publicación, lo que muestra que el interés sobre esta temática es muy reciente. Esto es un signo que el interés está creciendo gradualmente, y en los siguientes años la literatura sobre esta temática posiblemente seguirá con un ritmo de crecimiento aún mayor.
- Acerca del origen de los trabajos, la gran mayoría son de Europa, destacándose la participación de Alemania en estas investigaciones, motivo que no es casual dado que el origen de este concepto pertenece al gobierno de dicho país.
- Sobre la metodología, cabe destacar que 8 trabajos se basaron en la realización de encuestas. Los países en los que se realizaron dichas encuestas fueron Australia, Brasil, China, Francia, Alemania, Estados Unidos, India, Italia, Japón, México, por destacar algunos. En conjunto, estas entrevistas abarcan más de 1.300 empresas, que emplean alrededor de 30 millones de personas. Las mayores encuestas se dieron en años recientes y buscan recabar datos para tratar de comprender en mayor profundidad qué efectos tendrá la aplicación de estas tecnologías en las empresas [7, 10, 19]. Por lo tanto, se tiene información abundante sobre esta temática, mostrando las experiencias y estimaciones de las principales empresas del mundo. Otra metodología aplicada en estos trabajos fue la realización de un estudio teórico, analizando datos recabados de distintas fuentes para estimar principalmente qué capacidades van a ser fundamentales en un futuro, y como se verán afectados los trabajadores. Por último, 3 trabajos se

basaron esencialmente en la realización de una revisión literaria para aunar los datos de diversas fuentes.

Como fuera explicado anteriormente, para determinar las competencias necesarias para el futuro, se trabajó en base a estos 20 trabajos. Para ello, se extrajeron las principales competencias que menciona cada artículo como fundamental para el futuro y se las agrupó en las 4 categorías mencionadas anteriormente.

Las tablas resultantes (III, IV, V y VI) y las competencias más destacadas se presentan a continuación.

Competencias técnicas: en primer lugar, se encuentra *conocimientos de informática*. Luego se encuentra la *programación*, y en tercer lugar hay varias competencias con una similar cantidad de menciones. Ellas son *media-skills*, *procesamiento y análisis de datos*, *comprensión de los procesos y la organización* y *concientización sobre seguridad informática*. A su vez, es interesante destacar que la gran mayoría de las competencias técnicas referidas internacionalmente están estrechamente vinculadas al uso de herramientas de informática y a las nuevas tecnologías que destacarán en el futuro.

Competencias técnicas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Tot	
Programación	✓	✓	✓	✓	✓				✓				✓	✓			✓	✓			10	
Control y operación de equipos		✓			✓		✓			✓				✓								5
Media Skills		✓	✓				✓	✓				✓	✓								✓	7
Conocimientos de informática		✓	✓	✓			✓		✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓				12
Procesamiento y análisis de datos		✓	✓	✓	✓		✓							✓		✓					✓	8
Comprensión de los procesos y la organización				✓			✓					✓	✓	✓								5
Capacidad de operar con nuevas interfaces			✓	✓	✓					✓				✓								5
Concientización sobre seguridad informática			✓	✓	✓		✓			✓			✓	✓								7

Tabla III: Tabla de competencias técnicas

Competencias metodológicas: la más mencionada es la necesidad de un *aprendizaje continuo*. Le siguen el *pensamiento analítico y lógico* y *resolución de problemas*. Y también se destacan repetidas veces la *innovación* y la *creatividad*. El foco en la necesidad de un aprendizaje continuo muestra que en el futuro los trabajadores deberán estar formándose continuamente para seguir dentro del mercado laboral. La tecnología hará que los cambios se den cada vez con más rapidez y será necesario estar constantemente actualizándose acerca de los mismos para poder aportar en el empleo.

Competencias metodológicas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Tot
Pensamiento analítico y lógico	✓	✓	✓		✓	✓	✓				✓		✓		✓	✓				✓	11
Innovación	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓			✓			✓		✓			10
Aprendizaje Continuo	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓		✓	14
Creatividad	✓	✓	✓				✓				✓		✓			✓	✓		✓	✓	10
Resolución de problemas	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓				11
Emprendedurismo							✓														1
Habilidades de investigación													✓								1
Transdisciplinariedad							✓													✓	2

Tabla IV: Tabla de competencias metodológicas

Competencias sociales: hay dos que sobresalen por encima del resto. Estas son *trabajo en equipo* y *capacidad de buena comunicación*. En el futuro los empleos metódicos estarán realizados casi exclusivamente por tecnología, por lo que el aporte de las personas será en actividades menos automatizables, que dependan mucho de la relación entre pares. Por dicho motivo es que el trabajo en equipo se destaca, y para que esta relación sea buena y brinde beneficios debe estar cimentada por unas buenas habilidades de comunicación.

Competencias sociales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Tot
Inteligencia emocional	✓	✓									✓	✓								✓	5
Capacidad de buena comunicación		✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓				13
Entrenar y enseñar a otros		✓										✓	✓								3
Trabajo en equipo		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	14
Habilidades Interculturales							✓						✓			✓				✓	4

Tabla V: Tabla de competencias sociales

Competencias personales: en primer lugar, nos encontramos con la *habilidad de adaptarse a cambios*. Luego aparecen destacadas también la *responsabilidad* y el *liderazgo*. Estas competencias se añan con las anteriores. Por un lado, la capacidad de adaptarse a cambios está íntimamente relacionada con el aprendizaje continuo. Para lograr adaptarse y seguir dentro del mercado laboral, lo fundamental es estar continuamente estudiando y manteniéndose al tanto de las nuevas innovaciones. A su vez, los desafíos por la incorporación de tecnología harán que los trabajos cambien y que se creen empleos que actualmente no existen. En ese momento el dilema será principalmente si quedar fuera del mercado laboral o reconvertirse para acceder a posiciones que aún no se hayan automatizado. Y, por otro lado, el *liderazgo* es una competencia estrictamente de las personas, que no es automatizable. Por dicho motivo es que se considera tan importante.

Competencias personales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Tot	
Iniciativa	✓		✓			✓						✓										4
Liderazgo	✓							✓				✓	✓	✓		✓						6
Fuerza física																						0
Habilidad manual			✓																			1
Buena administración del tiempo		✓		✓		✓					✓	✓										5
Responsabilidad			✓									✓		✓	✓	✓	✓		✓			7
Habilidad de adaptarse a cambios			✓	✓			✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓			11
Confianza en la tecnología				✓			✓					✓		✓	✓							5
Interés en el desarrollo personal							✓					✓										2
Toma de decisiones													✓	✓								2

Tabla VI: Tabla de competencias personales

5.2 Principales resultados de las entrevistas realizadas

5.2.1 Matriz de competencias. -A partir de las entrevistas, se recopilaban todas las respuestas y se generaron distintos gráficos de radar con el fin de lograr identificar el gap de conocimiento que, en opinión de los entrevistados, presentan los trabajadores frente a la llegada de las nuevas tecnologías. Es claro que, si bien la metodología está fundamentada en la opinión de los entrevistados, y, por tanto, puede presentar ciertos sesgos naturales, de todas maneras, resulta útil para obtener las tendencias y comparar resultados acerca de qué competencias podrían ser más importantes frente al futuro, y dónde estarían presentes los principales gaps de conocimiento.

A su vez, en la entrevista se les solicitaba que, dentro de cada una de las cuatro categorías de competencias definidas previamente, identificaran en qué competencias centrarían los esfuerzos de capacitación dentro de la empresa en primer, segundo y tercer lugar si debieran de capacitar a sus trabajadores para el futuro. De esta forma se procuró detectar las competencias que los encuestados consideran, a priori, más relevantes para comenzar a capacitar a sus trabajadores de cara al futuro.

De forma de poder ponderar las competencias que los encuestados consideran más relevantes, se le planteó darle los valores que se indican en la *Tabla VII*, basados en trabajos anteriores

Prioridad de capacitación	Valor de ponderación
Capacitar en primer lugar	5
Capacitar en segundo lugar	3
Capacitar en tercer lugar	1

Tabla VII: Ponderación realizada para analizar las respuestas de las entrevistas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en base a las entrevistas.

Competencias Técnicas. La Figura II presenta los resultados de las competencias técnicas actuales del operario en el sector agroindustrial, y el nivel que deberían tener dentro de 10 años, de acuerdo a la visión de los encuestados.

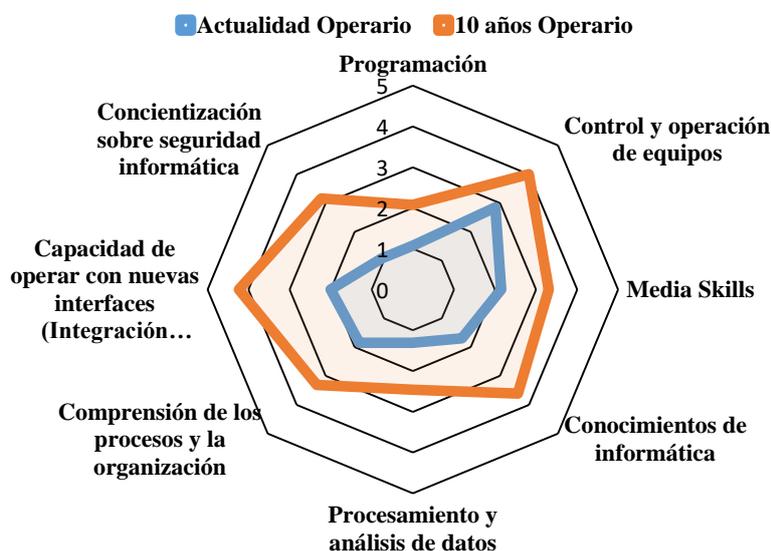


Figura III4: Matriz de las competencias técnicas de los operarios

Para poder visualizar mejor la diferencia entre la actualidad y dentro de 10 años, se presenta en la *Tabla VIII* el valor de dicha diferencia. Las 3 mayores diferencias se destacan con color verde. Y a su vez, se presenta también el puntaje de ponderación obtenido por cada competencia para determinar aquellas que los empresarios consideran deberían ser las primeras en enfocarse. Se destacan con azul las 3 priorizadas.

		Diferencia Actualidad y 10 años	Ponderación
Competencias técnicas	Programación	1,0	4
	Control y operación de equipos	1,2	32
	Media Skills	1,2	0
	Conocimientos de informática	1,9	17
	Procesamiento y análisis de datos	1,2	13
	Comprensión de los procesos y la organización	1,5	20
	Capacidad de operar con nuevas interfaces (Integración persona/máquina)	2,2	20
	Concientización sobre seguridad informática	2,1	2

Tabla VIII: diferencias entre el valor actual de las competencias técnicas y el valor necesario a 10 años, y la ponderación indicando las competencias a priorizar.

En esta categoría, los resultados muestran que el mayor gap de conocimiento se ubica en la *capacidad de operar con nuevas interfaces*. Y esta es, a su vez, una de las 3 en las que

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

los empresarios consideran se debería capacitar primero a los trabajadores. Esto implica que en esta área a los empresarios les parece importante que haya una gran capacitación en vistas al futuro. A su vez, esta competencia es la que encuentra un valor más alto en un futuro en la escala de 1 a 5, siendo de 4,2 el puntaje medio que consideran los encuestados que deberán tener sus operarios en un futuro. Es necesario destacar, a su vez, el gap en la *concientización sobre seguridad informática*, ubicándose casi en primer lugar. Pero se aprecia que los empresarios tienen un muy bajo interés en capacitar en este sentido. Y el tercer mayor gap se encuentra en los *conocimientos de informática*. Los encuestados comprenden que en un futuro se debe crecer mucho en el nivel de informática que manejan sus trabajadores. Esta percepción muestra una buena comprensión de que en un futuro todos los trabajadores de una forma u otra deberán ser capaces de manejarse con las herramientas informáticas. La competencia que es considerada por la mayoría como la primera en la que enfocar los esfuerzos de recapacitación es en el *control y operación de equipos*. Pero lo importante a destacar aquí es que los trabajadores ya tienen un buen nivel, por lo que el gap de conocimiento que se deberá sortear es menor. Resulta interesante comentar también los resultados obtenidos para la competencia *programación*. Como puede verse, los empresarios no le dan mucha importancia a esta competencia, a diferencia de lo que podría suponerse. Esto es porque consideran que los trabajadores medios del sector agropecuario no tienen la necesidad de aprender esta competencia. Indicaron en las entrevistas que en el futuro será necesario que las empresas cuenten con un buen nivel de programación, pero para ello tendrán trabajadores especializados en esta área, formando parte del departamento de IT. Por dicho motivo consideran que no será relevante que los operarios dominen esta competencia.

De este análisis se puede concluir que los principales esfuerzos de recapacitación de los operarios, refiriéndonos a las competencias técnicas, deberían estar enfocados en la *capacidad de operar con nuevas interfaces* y en *conocimientos de informática*. Y se deberá tratar de concientizar más a los empresarios acerca de la necesidad de reforzar la *seguridad informática*, puesto que estas nuevas tecnologías permitirán controlar toda la operativa de la empresa desde internet, por lo que la empresa puede quedar fácilmente expuesta a ataques cibernéticos.

Competencias Metodológicas. En la Figura III se presentan las competencias metodológicas del operario, obtenidas en base a los resultados de la encuesta. Y en la Tabla IX se analizan las diferencias entre el nivel actual y el necesario a 10 años, conjuntamente con la ponderación obtenida por cada competencia.

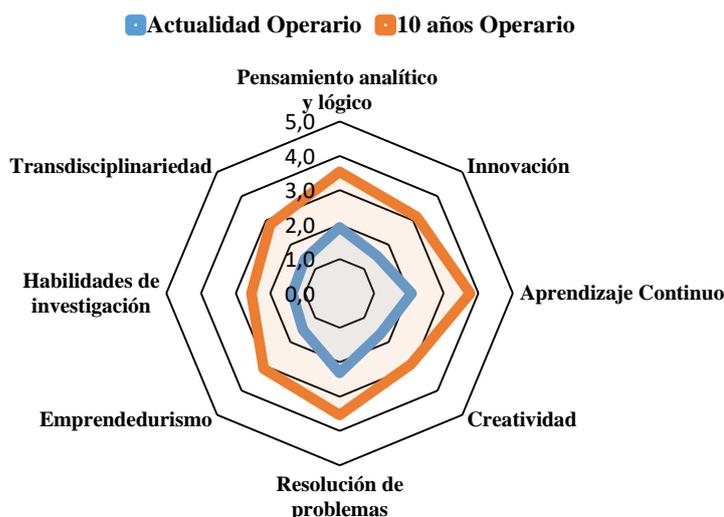


Figura III: Matriz de las competencias metodológicas del operario

		Diferencia Actualidad y 10 años	Ponderación
Competencias metodológicas	Pensamiento analítico y lógico	1,6	24
	Innovación	1,6	9
	Aprendizaje Continuo	1,7	43
	Creatividad	1,3	2
	Resolución de problemas	1,2	16
	Emprendedurismo	1,6	1
	Habilidades de investigación	1,2	5
	Transdisciplinariedad	1,4	7

Tabla 7: diferencias entre el valor actual de las competencias metodológicas y el valor necesario a 10 años, y la ponderación indicando las competencias a priorizar.

De esta categoría, lo que más destaca es la necesidad del *aprendizaje continuo*. Es el que presenta valor más alto en un futuro, siendo de 3,8 sobre 5. A su vez, es la competencia en la que la diferencia con el nivel actual que poseen los operarios es mayor. Y también es la que presenta la mayor ponderación, muy por encima de la competencia que le sigue dentro del ranking. Esto último indica que los empresarios, en su gran mayoría, consideran que esta competencia será fundamental para el futuro de sus operarios, y están dispuestos a centrar los esfuerzos de capacitación del personal, dentro de esta categoría, en dicha competencia. Estos resultados son coherentes con los de la bibliografía internacional, donde se destaca que, en un futuro, debido a la rapidez con la que las transformaciones se están dando, lo principal que deberán tener los trabajadores será la capacidad de aprender a aprender. En un segundo lugar, los encuestados consideran que se focalizarían en capacitar en *pensamiento analítico y lógico*. Aprecian que es necesario crecer mucho en esta competencia, siendo la que presenta el segundo mayor gap de conocimiento, estando en este sentido igualada con la *innovación*. En tercer lugar, consideran que también es importante capacitar en la *resolución de problemas*. En esta competencia, algo positivo a destacar es que la diferencia con el nivel actual no es excesivamente grande, por lo que la capacitación necesaria no es muy alta.

De estos datos surge que sin duda será prioridad la capacitación en un *aprendizaje continuo*, en primer lugar. Así lo consideran la mayoría de los encuestados, y ven a su vez que el gap es muy grande. Luego será necesario fomentar el *pensamiento analítico y lógico* en los empleados. Y también hay que focalizar recursos en desarrollar la *resolución de problemas* en los operarios. Esta última competencia puede vincularse fácilmente con un desarrollo de la *innovación*, dado que se puede fomentar a los trabajadores que resuelvan los problemas de una forma creativa que pueda agregarle valor a sus actividades y a la empresa.

Competencias Sociales. -Dentro de esta categoría, como se aprecia en la Figura IV y en la Tabla X, el nivel actual de todas las competencias es relativamente similar. Las dos que presentan un mayor valor en miras al futuro son trabajo en equipo y capacidad de buena comunicación. Dentro de la matriz, son las dos que llegan a valores más altos dentro de los 10 años. Y, a su vez, son las que presentan un mayor gap frente a la capacidad actual. La literatura internacional también destaca estas competencias como fundamentales en un futuro, por lo que las industrias deberán realizar esfuerzos en potenciarlas dentro de sus empresas [33, 34].

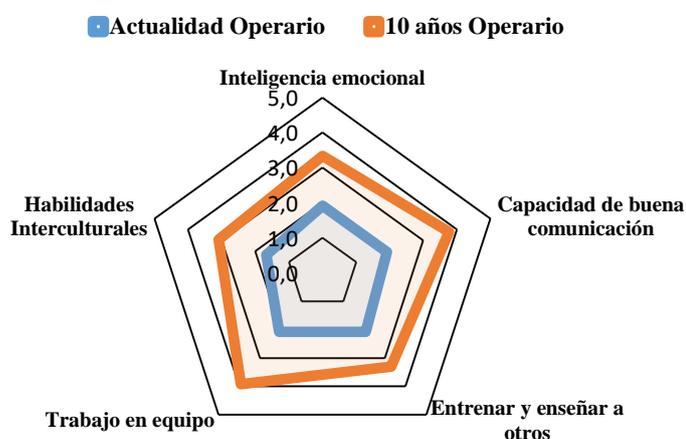


Figura 15: Matriz de las competencias sociales del operario

		Diferencia Actualidad y 10 años	Ponderación
Competencias sociales	Inteligencia emocional	1,4	25
	Capacidad de buena comunicación	1,8	36
	Entrenar y enseñar a otros	1,2	5
	Trabajo en equipo	1,8	31
	Habilidades Interculturales	1,4	1

Tabla X8: diferencias entre el valor actual de las competencias sociales y el valor necesario a 10 años, y la ponderación indicando las competencias que los empresarios consideran se enfocarían primero en capacitar.

Frente a la Industria 4.0, en un futuro muchas tareas se automatizarán, y los trabajadores brindarán un verdadero valor agregado en aquellas operativas que sean difícilmente automatizables. Y dentro de las tareas difícilmente automatizables, las competencias que destacan por sobre el resto son las que refieren a aspectos sociales, dado que involucran al trato entre personas, por lo que es muy difícil para una máquina conseguir o imitar dicha competencia. Igualmente se están diseñando robots que buscan emular sentimientos y características propias de las personas, pero dichos avances aún se ubican dentro de un marco experimental.

Competencias Personales. -Dentro de las competencias personales, lo primero que destaca frente a los otros gráficos, es que hay 2 competencias en las que el nivel actual de los operarios supera al nivel necesario para el futuro, como se observa en la Figura V y en la Tabla XI. Ellas son fuerza física y habilidad manual.

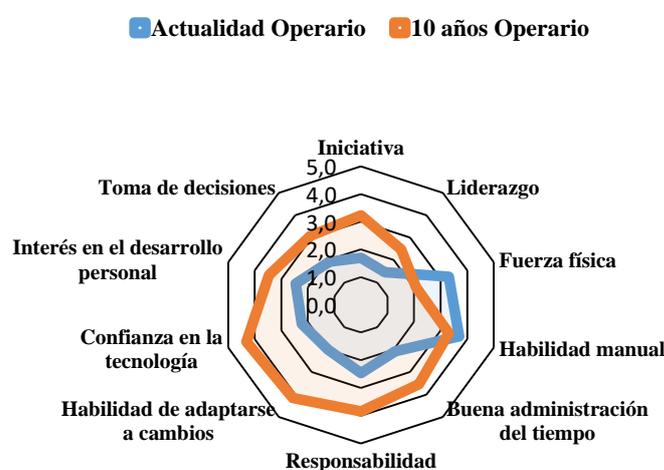


Figura V: Matriz de las competencias personales del operario

		Diferencia Actualidad y 10 años	Ponderación
Competencias Personales	Iniciativa	1,5	9
	Liderazgo	1,0	14
	Fuerza física	-1,2	0
	Habilidad manual	-0,4	0
	Buena administración del tiempo	1,5	16
	Responsabilidad	1,4	14
	Habilidad de adaptarse a cambios	2,2	23
	Confianza en la tecnología	2,1	3
	Interés en el desarrollo personal	1,0	3
	Toma de decisiones	1,2	8

Tabla XI: diferencias entre el valor actual de las competencias personales y el valor necesario a 10 años, y la ponderación indicando las competencias que los empresarios consideran se enfocarían primero en capacitar.

Los resultados obtenidos están alineados con la literatura, donde ninguno de los estudios considera que la *fuerza física* será una competencia imprescindible frente al futuro, y uno solo hace mención de la necesidad de poseer una buena *habilidad manual* con el avance de la Industria 4.0. Esto a su vez, es coherente con uno de los objetivos de la aplicación de la Industria 4.0, que es la eliminación de los puestos de trabajo rutinarios y desgastantes físicamente, entre los que se pueden encontrar los trabajos que requieren alta *fuerza física*.

En referencia a los mayores gaps de competencias, destaca en primer lugar la capacidad para adaptarse a cambios. Esta es, a su vez, la que presenta la mayor ponderación. Esta competencia resulta relevante en un futuro, debido a la rapidez con la que se considera que los cambios tecnológicos ocurrirán. Por dicho motivo deberán procurar desarrollar sus competencias a una velocidad creciente para poder enfrentarse al cambio [34, 35]. Los trabajadores deberán estar prontos para enfrentarse a cambios en sus profesiones, en el ambiente laboral e incluso en su vida social, y frente a dichas transformaciones, la adaptación al cambio será una herramienta de gran utilidad. La competencia que le sigue en cuanto al gap existente es la *confianza en la tecnología*, la cual está íntimamente relacionada con la previamente mencionada. Los encuestados advierten que la confianza que los operarios del sector agroindustrial tienen actualmente en las tecnologías es muy bajo, y frente al futuro deberá aumentar al punto que necesitarán contar con una buena capacitación en esta competencia. La necesidad de esta competencia se explica por sí misma, puesto que, si en un futuro gran parte de las tareas estarán automatizadas y los operarios deberán relacionarse diariamente con estas tecnologías, es fundamental que tengan confianza en ella y la utilicen continuamente como parte de su trabajo. A su vez, tanto esta competencia como la anterior, se pueden vincular con la de *capacidad de operar con nuevas interfaces*, planteada previamente dentro de competencias técnicas. Recordando lo analizado sobre ella, es de las que presenta un mayor gap y un nivel de priorización de los más altos en dicha categoría. Las tres competencias están íntimamente relacionadas, y son de gran importancia en el futuro de la Industria 4.0, la cual estará fundamentalmente caracterizada por la sinergia hombre-tecnología, tanto dentro de la planta industrial como en la vida diaria de las personas.

6.2.1 Futuro del empleo. -A continuación, se les solicitó a los entrevistados indicar su percepción acerca de cómo iba a variar en los próximos 10 años, la cantidad de trabajadores del sector en 3 niveles distintos: operarios, mandos medios y jefes. Cada encuestado respondió a esta pregunta colocando el foco en su sector de producción. Por lo que, considerando que las entrevistas se realizaron a empresas abarcando diversas áreas del sector, los resultados finales incorporan diversos puntos de vista dentro del sector agropecuario, y por ende hay que tener precaución al intentar generalizar los resultados encontrados. Se les solicitó evaluar, en porcentaje, qué variación de empleo esperaban en esos 3 niveles desde esta fecha a 10 años. Los resultados se presentan en la *Tabla XII*.

Puesto de trabajo	• Variación en los próximos 10 años (%)
Operarios	-36%
Mandos medios	-18%
Jefes	-13%

[1] *Tabla XII: Variación de los puestos de trabajo del sector agroindustrial en los próximos 10 años, basados en los resultados de las entrevistas*

Es importante aclarar que, en esta pregunta, las respuestas fueron sumamente variadas, indicando que no hay un consenso generalizado en los empresarios acerca de qué ocurrirá con

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

los puestos de trabajo. Igualmente, es importante destacar que, en promedio, las empresas consideran que en todos los niveles van a tener un descenso de los trabajadores. El descenso más marcado estará en los operarios, con una estimación de más de un tercio de los mismos perdiendo su empleo en los próximos 10 años. Estos números son a tener en consideración, dada la cantidad de trabajadores que esta industria representa.

Analizando las respuestas de forma más individual, en referencia a los operarios, todos los entrevistados indicaron que consideran que en el futuro va a descender la cantidad de trabajadores de esta categoría en el sector. El valor más extremo indicado fue de un descenso de 75%, y el menor valor fue de un descenso del 10%. Mencionaron que, actualmente, los altos costos de la automatización no permiten que estos valores sean superiores.

En opinión de uno de los entrevistados, las empresas líderes en países desarrollados tienen una visión más amplia y creativa de cómo van a impactar las nuevas tecnologías y cómo aprovechar al máximo sus beneficios, por lo que esas industrias pueden expandir su modelo de negocios, y consecuentemente, necesitar de más empleados. Destacó, entre otros ejemplos, los cultivos hidropónicos automáticos y la carne de laboratorio como opciones para que una empresa diversifique su producción y amplíe así su necesidad de trabajadores. Indicó que, si las empresas agroindustriales del país se enfocaran en cómo poner la tecnología en aras de nuevas invenciones y nuevas líneas de negocio, entre las que se pueden contar las mencionadas anteriormente, o una sofisticación de los productos, entonces los resultados podrán incluso llevar a un aumento de la mano de obra.

Por último, varios entrevistados destacaron que los puestos que más se verán afectados en sus empresas no serán tanto relacionados con el agro en sí, sino relacionados más a los servicios y administración de la empresa. Indicaron de ejemplo las pérdidas en áreas administrativas tales como los pagos de sueldo y liquidaciones de impuestos. Expresaron que procuran que el personal que ya no sea necesario en un área pueda ser reconvertido dentro de otra área de la misma empresa donde pueda brindar un mayor valor, pero plantearon que esto no siempre puede ser realizado. A su vez, destacaron la importancia de las nuevas competencias: “lo que más se va a necesitar dentro de la empresa son las competencias blandas” y otro entrevistado acotó “el contacto cara a cara con el productor va a seguir estando, la confianza es vital”. Finalmente, en relación a los puestos que más refieren a la industria del agro en sí, indicaron que las transformaciones de mano de obra están dadas por las nuevas tecnologías tales como cosechadoras automáticas, salas de ordeño robotizadas, ganadería de precisión, maquinaria en la industria forestal, entre varios ejemplos que comentaron. Y que esta transformación afectará principalmente a la mano de obra menos calificada, y por consiguiente requerirán personal con mejores competencias en el uso de herramientas tecnológicas.

6.2.2 Colaboración Universidad/Empresa. Por último, se procuró conocer la opinión de los entrevistados acerca de la necesidad de establecer una mayor colaboración entre la universidad y la empresa. Las miradas obtenidas fueron principalmente dos. Por un lado, el 88% de los encuestados considera que las universidades deberían colaborar con las empresas para formar estudiantes más preparados para las nuevas realidades del mundo laboral, y a su vez colaborar en la recalificación de los trabajadores existentes. Por otro lado, el 12% de los entrevistados planteó que la tarea de recalificación de los trabajadores correspondía principalmente a las empresas y otros agentes educativos y gubernamentales (y no tanto a la universidad en sí), y que la misión principal de la universidad debería ser la de generar y formar mentes y profesionales preparados para enfrentar lo más diversos y nuevos desafíos.

Algunos entrevistados mencionaron que realizar una colaboración entre ambas partes era algo que resultaría muy importante para el tiempo actual. Recomendaron realizar en conjunto proyectos de desarrollo y adopción de tecnología, utilizando los conocimientos de la universidad para crear herramientas que fueran realmente útiles para la realidad actual de las empresas. Por ejemplo, indicaron que sería muy útil desarrollar la robótica industrial a nivel universitario, y que las facultades de ingeniería deberían estar realizando más cursos relacionados con esta área. Algunos remarcaron que la universidad está en deuda en fomentar un emprendedurismo tecnológico de automatización que sería de gran utilidad para las empresas. En el mismo sentido, destacaron la necesidad de tener más graduados que posean herramientas de programación, por lo que recomiendan que las universidades actualicen las materias que brindan dentro de sus cursos y procuren brindarles un foco más tecnológico.

Otros encuestados recomiendan que las universidades se esfuercen en mayor medida en brindarles a sus estudiantes herramientas útiles para el mundo del trabajo, y que se centren en fomentar las competencias profesionales tales como aprendizaje continuo. Aconsejan, también, que la universidad aporte en concientizar a la clase política acerca de la urgencia de prepararse frente a los cambios que se avecinan.

En este sentido, todos los entrevistados concuerdan en la necesidad de generar espacios de colaboración entre las empresas, el gobierno y las universidades, para así poder aunar esfuerzos en pro del desarrollo nacional futuro. Indicaron que esto es algo que ya ocurre en los países más desarrollados, pero que en Uruguay hay aún una gran falencia al respecto. En este sentido, las empresas detectan una falencia, donde la universidad trabaja mucho en la creación de conocimiento teórico, pero no logran adoptar esos conocimientos a la realidad de las industrias. Si se implementan estos espacios de sinergia permitirá que las universidades detecten con mayor rapidez qué competencias requieren las industrias, de forma de poder ajustar su plan de estudios para satisfacer dicha demanda en un tiempo adecuado.

En particular, varios entrevistados indican que, si bien ya existen algunas iniciativas aisladas en este sentido, no advierten que exista un plan de dirección firme para unificar todas las iniciativas y que puedan trabajar de forma conjunta. “Falta lograr la integración de los diversos actores y organismos que colaboran en este sentido”.

6.2.3 Comentarios finales de los entrevistados. -Uno de los elementos finales que destacaron los empresarios en las entrevistas son los problemas educativos a los que se enfrenta el país. En este sentido, varios señalaron que la educación debería transformarse, centrándose más en metodologías que fomenten el “aprender haciendo” (*learning by doing*) y también el “aprender a aprender”. Indican que durante su vida laboral en las empresas han advertido que los empleados adquieren mejor las competencias que necesitan si las aprenden mediante la experiencia. “*Lo vivencial es clave, y más si considerás la necesidad de trabajar en equipo*” decía uno de los entrevistados. Sugieren que estas técnicas deberían ser más fomentadas dentro de la educación, tal vez siendo necesaria una adaptación de los planes de estudio y un enfoque más basado en la enseñanza de competencias y no tanto en la enseñanza de contenidos. En relación a esto, algunos entrevistados observaron que recapacitar y re enseñar a los empleados actuales de más edad puede presentar retos todavía mayores. Parte de sus empleados dentro de la empresa no tienen las capacidades de leer ni escribir, por lo que proponen que el aprendizaje se base más en actividades didácticas tales como metodologías prácticas de aprendizaje basado en juegos formativos y trabajo entre pares. Recomendán estudiar qué métodos de enseñanza son más acordes para trabajadores de más edad con niveles educativos bajos. Dentro de esta misma línea, señalan que, aunque se implementen medidas para capacitar a sus operarios, una

dificultad que se presenta es evaluar el retorno de dichas acciones. Indican que es muy difícil estimar la relación costo/beneficio de las actividades de capacitación de las personas. Por lo que también proponen que sería interesante poseer más herramientas en este sentido.

Por último, señalan que todos los trabajadores de la empresa, desde los gerentes hasta los operarios deben comprender realmente que estos desafíos tecnológicos ya están presentes, y que deberán trabajar en conjunto para evitar las pérdidas de puesto de trabajo y los riesgos asociados.

5. Discusión y Conclusiones. -Este proyecto tiene como objetivo analizar las competencias necesarias en el futuro de la Industria 4.0 en el sector agroindustrial, y el nivel que las empresas consideran que será necesario alcanzar para un futuro. Luego de una extensa revisión bibliográfica, se construyó una matriz con 31 competencias agrupadas en cuatro categorías, la cuales fueron luego validadas y priorizadas en base a entrevistas realizadas a 15 *stakeholders* del sector agroindustrial uruguayo.

A partir de los resultados de las entrevistas, se generaron gráficos de radar identificando el gap de competencias necesario para avanzar en materia de transformación digital y tecnológica en el sector. Las competencias determinadas como las más relevantes para el futuro son: *Conocimientos de Informática, Capacidad de operar con nuevas interfaces, Aprendizaje Continuo, Pensamiento Analítico y Lógico, Expresión Oral, Trabajo en equipo, Confianza en la tecnología y Flexibilidad.*

Los resultados obtenidos de las entrevistas fueron consistentes con la bibliografía internacional, mostrando que las competencias consideradas más importantes para la transformación de la Industria 4.0 en la agroindustria concuerdan con la mayoría de las mismas competencias necesarias para las otras industrias encontradas en la bibliografía.

En este sentido, el proyecto espera contribuir a llenar el gap de conocimiento acerca de las competencias necesarias para el sector agroindustrial, y de esta manera, aportar información para ayudar en la recapitación de los trabajadores para así reducir el impacto de la Industria 4.0 en los puestos de trabajo. Futuras líneas de investigación deberían ser enfocadas en el análisis de las competencias principales en otras industrias y de esta manera generar más evidencias para poder indicar si existe un conjunto de competencias generales que todo trabajador del futuro debe tener.

En relación a los cambios que se avecinan en el sector agroindustrial, la Industria 4.0 está aquí y es necesario prepararse. Frente a estos cambios se presentan dos caminos. Por un lado, retrasar el avance hasta que no sea posible seguir resistiendo, o anticiparse y prever los cambios posibles de forma de adelantarse y obtener el mayor provecho.

Relacionado con este segundo enfoque, se pueden presentar algunas recomendaciones adicionales para una buena adaptación de la Industria 4.0. En particular, los *stakeholders* entrevistados indicaron que el problema de capacitación es difícil de resolver y por ende se deben tomar distintas medidas.

En primer lugar, varios estudios mencionan que la preparación para estas nuevas tecnologías debe ser realizada de forma conjunta por las empresas, el gobierno y los educadores. No deben ser tres entidades trabajando de forma independiente, sino que debe haber una gran colaboración entre las partes para que los resultados sean los mejores ([1, 20, 26, 33, 36, 37]). Uno de los principales objetivos de esta colaboración debe ser el desarrollo de un aprendizaje continuo en las personas, para que sean capaces de adaptarse con más facilidad frente a los cambios. Esto debe ser realizado mediante programas conjuntos de desarrollo de

competencias, tanto dentro de las empresas como a través de las instituciones educativas formales [19].

De forma complementaria, frente al futuro, será necesario considerar también el desarrollo de un proceso continuo de adquisición de nuevas competencias y conocimientos. Se recomienda la aplicación de programas cortos de desarrollo de competencias específicas, principalmente en áreas de tecnología y ciencias, así como en creatividad, pensamiento crítico y resolución de problemas [35, 36]. Gran parte de este éxito estará dado en la capacidad del gobierno, empresas y educadores en anticipar qué competencias serán imprescindibles para el futuro, y centrar los esfuerzos de recapitación en ellas. Que las empresas sean capaces de desarrollar una organización con una cultura que impulse a los trabajadores a aprender es visto como una herramienta importante para tener éxito [34].

Por otro lado, para mantener la competitividad, las empresas deben acelerar sus esfuerzos en el camino de la Industria 4.0. Es necesario que los líderes empresariales consideren la mejor manera de reubicar la mano de obra que automaticen, ya sea dentro de sus organizaciones o fuera de ellas, tanto para su propio desempeño como para ser una empresa socialmente responsable [35]. Por lo tanto, los programas de reentrenamiento y de mejora de las competencias de los trabajadores dentro de las empresas serán fundamentales. En particular, estudios internacionales recomiendan recapitar a los propios empleados, los cuales ya conocen el funcionamiento de la empresa y pueden aportar mayor valor [29]. De esta forma se está brindando un desarrollo profesional y humano a muchos trabajadores, con lo que se está mejorando tanto la propia empresa, como la sociedad en su conjunto. En este sentido, las empresas, más que considerar la automatización como una forma de ahorrar en costos laborales, deben verla como una oportunidad de creación de valor, buscando que se potencie la sinergia hombre-máquina, alcanzando así un verdadero progreso.

Por su parte, el gobierno tendrá la misión de facilitar el relacionamiento entre los diversos *stakeholders*, para generar espacios de sinergia y oportunidades de innovación. A su vez, deberá procurar generar una coordinación de las iniciativas que promuevan la creación de trabajo, para que todos los agentes interesados puedan trabajar juntos de forma que los programas individuales se apoyen mutuamente y no se superpongan. En paralelo, el gobierno deberá estimular el crecimiento de la economía y la incorporación de nuevas herramientas tecnológicas por parte de las empresas, de forma de posibilitar una mayor generación de empleo. Deberá fomentar, además, que las empresas tengan programas de entrenamiento propios, y debe colaborar en la generación de relaciones estratégicas entre las empresas y las instituciones educativas, de forma que los cambios en educación sean lo más ágiles y efectivos posibles para adecuarse a un mundo del trabajo donde los cambios ocurrirán cada vez con mayor velocidad. También debe conseguir generar un mercado de trabajo más fluido, procurando que los trabajadores puedan conseguir puestos de trabajo con más rapidez.

Por último, las instituciones educativas deben estar dispuestos a adaptar sus planes de estudio de forma ágil, para que no se forme una brecha entre las competencias que se desarrollan en el ámbito educativo y las requeridas a nivel profesional. En este mismo aspecto, el informe del *World Economic Forum* [10] indica que el 65% de los alumnos ingresando actualmente al nivel de educación primaria, terminarán trabajando en empleos completamente nuevos que actualmente no existen, y que aproximadamente el 50% del conocimiento que un estudiante adquiere en el primer año de facultad estará desactualizado para el momento que el alumno se gradúe. En este sentido, algunos estudios proponen que las universidades deberán centrarse en brindar programas universitarios más enfocados en capacidades de procesamiento de datos y herramientas informáticas. Las competencias blandas también deberán tener su foco

durante el desarrollo universitario, de forma de promover la innovación, la colaboración entre pares, el trabajo en equipo y el relacionamiento social de los futuros profesionales [29, 31]. Un modelo educacional que se propone como beneficioso para el futuro es el modelo dual alemán, donde la enseñanza teórica y práctica se combina para obtener mejores resultados. A su vez, parte de este aprendizaje se da fuera de los lugares distintos a los tradicionales, con lo que se fomenta el concepto del aprendizaje continuo dentro de las empresas y en la vida diaria [29].

En resumen, si los países de todo el mundo fallan en la percepción de los riesgos que presenta la llegada de la Industria 4.0, especialmente en el sector agropecuario, y no fortalecen la capacitación de sus trabajadores con un modelo que les permita enfocar eficazmente los esfuerzos, este sector se verá fuertemente afectado por la pérdida de empleos, con muchos trabajadores quedando fuera del mercado laboral en los próximos años. Es indudable que grandes beneficios derivarán de la Industria 4.0, pero los riesgos implicados no deben ser subestimados. Por eso, y considerando la importancia de esta industria a nivel global, y los altos riesgos de automatización de sus puestos de trabajo, más estudios relacionados con la necesidad de capacitación de los trabajadores, y la manera de realizarla, se vuelven esenciales para el futuro bienestar de la sociedad en su conjunto.

6. Referencias

- [1]. Benešová, A. y Tupa, J. (2017) «Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0», *Procedia Manufacturing*, 11(June), pp. 2195-2202
- [2]. Manyika, J., Lund, S., et al. (2017) «Jobs Lost , Jobs Gained : Workforce Transitions In A Time Of Automation», *McKinsey Global Institute*.
- [3]. Deloitte LLP (2015) «From brawn to brains. The impact of technology on jobs in the UK», p. 16.
- [4]. Slusarczyk, B. (2018) «Industry 4.0 - Are We Ready ?», *Polish Journal of Management Studies*, 17.
- [5]. Frey, C. B., y Osborne, M. A. (2017) «The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?», *Technological forecasting and social change*, 114, pp. 254-280.
- [6]. Hamzeh, R., Zhong, R. y Xu, X. W. (2018) «A Survey Study on Industry 4.0 for New Zealand Manufacturing», *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V., 26, pp. 49-57.
- [7]. Lorenz, M. et al. (2016) «Time to Accelerate in the Race Toward Industry 4.0», *The Boston Consulting Group*. Recuperado a partir de https://www.bcgperspectives.com/Images/BCG-Time-to-Accelerate-in-the-Race-Toward-Industry-4.0-May-2016_tcm80-211060.pdf
- [8]. Rojko, A. (2017) «Industry 4 . 0 Concept : Background and Overview», *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, 11(5), pp. 77-91.
- [9]. Hermann, M., Pentek, T. y Otto, B. (2016) «Design principles for industrie 4.0 escenarios», *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE, 2016-March, pp. 3928-3937.
- [10]. World Economic Forum (2016) «The Future of Jobs Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution», *Global Challenge Insight Report, World Economic Forum*.
- [11]. Aulbur, W., CJ, A. y Bigghe, R. (2016) «Skill Development for Industry 4.0», *Roland Berger, BRICS Skill Development Working Group, India Section*, pp. 1-50.
- [12]. World Bank (2018) «Agriculture and Food» Disponible en: <http://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/overview> (Acceso: 20/02/2019).
- [13]. Uruguay XXI. Informe agropecuario. 2018;0-46.
- [14]. Uruguay XXI. Estadísticas de comercio exterior. 2018.
- [15]. Ackermann, M. N. y Cortelezzi, Á. (2017) «Mercado de trabajo agropecuario : situación y

- prospectiva hacia el Uruguay Agointeligente de 2030», *Anuario OPYPA 2017*.
- [16]. Munyo, I. (2016) «Y por casa cómo andamos?», *Revista de negocios del IEEM*, 19(3), pp. 22-27.
- [17]. Hecklau, F. *et al.* (2016) «Holistic Approach for Human Resource Management in Industry 4.0», *Procedia CIRP*. The Author(s), 54, pp. 1-6.
- [18]. Lleó, A. *et al.* (2017) «Competencias Profesionales 4.0».
- [19]. World Economic Forum (2018) «*The Future of Jobs Report*».
- [20]. Gehrke, L. *et al.* (2015) «A Discussion of Qualifications and Skills in the Factory of the Future: A German and American Perspective», *VDI/ASME Industry*, 4, pp. 1-28.
- [21]. Smit, J. *et al.* (2016) «Industry 4.0», Parlamento Europeo.
- [22]. Erol, S. *et al.* (2016) «Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production», *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 54, pp. 13-18.
- [23]. Breuer, Z. (2012) «Agriculture, forestry and fishing: sector skills assessment 2012», London: UKCES.
- [24]. European Centre for the Development of Vocational Training (2017) «People , Machines , Robots And Skills», (July), pp. 1-4.
- [25]. Moldovan, L. (2018) «State-of-the-Art Analysis on the Knowledge and Skills Gaps on the Topic of Industry 4 . 0 and the Requirements for Work-Based Learning in Romania», 15[1], pp. 32-35.
- [26]. Störmer, E. *et al.* (2014) «The Future of Work : Jobs and skills in 2030».
- [27]. Scott, C. L. (2015) «El futuro del aprendizaje 2 ¿Qué tipo de aprendizaje se necesita en el siglo XXI?».
- [28]. Kergroach, S. (2017) «Industry 4.0: New Challenges and Opportunities for the Labour Market», 11(4), pp. 6-8
- [29]. Lorenz, M. *et al.* (2015) «Man and Machine in Industry 4.0 How Will Technology Transform the Industrial Workforce Through 2025?», *The Boston Consulting Group*.
- [30]. Cotet, G. B., Balgiu, B. A. y Zaleschi, V. C. (2017) «Assessment procedure for the soft skills requested by Industry 4.0», *MATEC Web of Conferences*, 121, p. 07005.
- [31]. Davies, A., Fidler, D. y Gorbis, M. (2011) «Future Work Skills 2020», *Institute for the Future for University of Phoenix Research Institute*, 2011, vol. 540.
- [32]. Gómez, J. L. P. (2002). «Estrategias de ponderación de la respuesta en encuestas de satisfacción de usuarios de servicios» *Metodología de encuestas*, 4(2), 175-193.
- [33]. Motyl, B. *et al.* (2017) «How will Change the Future Engineers' Skills in the Industry 4.0 Framework? A Questionnaire Survey», *Procedia Manufacturing*, 11 pp. 1501-1509.
- [34]. Deloitte (2018) «The Fourth Industrial Revolution is here—are you ready?», Report. UK: *Deloitte Insight*, p. 20
- [35]. Manyika, J., Chui, M., *et al.* (2017) «A Future That Works : Automation , Employment , And Productivity», *McKinsey Global Institute Research, Tech. Rep*
- [36]. Rübmann, M. *et al.* (2015) «Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries», *Boston Consulting Group*, 9, pp. 54-89.
- [37]. Baena, F. *et al.* (2017) «Learning Factory: The Path to Industry 4.0», *Procedia Manufacturing*, 9, pp. 73-80.

Modelo de minimización de costos asociados al consumo de agua en una industria de refrescos.

Minimization model of cost associated with water consumption in soft drink industry

Andrea Russi da Cunha¹, Urivald Pawlowsky²

Recibido: 7/2019

Aceptado 09/2019

Resumen. - En Brasil algunas industrias hidro-intensivas vienen actuando de forma preventiva con respecto a la potencial aprobación de leyes que autoricen el cobro por uso de agua de pozos artesanales. Con el objetivo de conocer posibilidades para minimizar el impacto en los costos, derivados del consumo de agua en las operaciones de la planta, se evaluaron alternativas para la resolución de un modelo de optimización del uso de recursos hídricos en una planta de refrescos. Específicamente se presenta en este trabajo, el resultado de la aplicación del algoritmo *Generalized Bender's Decomposition*. El problema se planteó como una superestructura de distribución con el objetivo de minimizar el costo por consumo de agua en las operaciones de la planta. El modelo NLP resultante es del tipo no-convexo. La resolución utilizando descomposición permitió alcanzar sin embargo una respuesta óptima global que derivó en una estructura de distribución de agua con costos menores que la obtenida por la resolución tradicional, que sólo produjo un óptimo local con mayor costo. El problema se resolvió en Gams ® con Minos y BDM-LP, obteniendo en menos de 1 segundo los valores que conforman una estructura de distribución con el potencial de reducir los costos por consumo de agua en hasta 17,5% durante la temporada alta.

Palabras clave: Minimización de costos operacionales, redes de distribución, NLP

Summary. - In Brazil, some industries with high consumption of water are developing optimization strategies to prevent or minimize the impact of potential new cost on spring water. The model obtained for the minimization of the water consumption and its operation cost in a soft drink manufacturing facility is NLP and no convex one. This paper shows the results of the application of General Bender's Decomposition algorithm, to a superstructure optimization problem. The use of the GBD algorithm allow nevertheless a global optimal solution which outcome was a water distribution structure with less cost than the one obtained with a traditional NLP solver -local optimum at higher cost. The solver was GAMS ® / with BDM-LP and Minos ®. A global optimum with the values for a structure, that allows a 17% cost reduction, was obtained in less than one second.

Keywords: Cost Minimization, operational cost reduction, distribution network, NLP, Generalized Bender Decomposition

¹Facultad de Ingeniería Universidad de Montevideo, a.russi@um.edu.uy; ORCID 0000-0002-5767-7659

²Pos-graduación en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Universidad Federal de Paraná, Brasil.
u.pawlowsky@engquim.ufpr.edu.br

1. Introducción. -Las industrias hidro-intensivas, en especial las fabricantes de bebidas ubicadas en Brasil, Argentina, Paraguay o Uruguay, y cuya base de materia prima sea agua, pueden responder a la presión legislativa para la regulación del consumo con estrategias de optimización de la distribución del recurso en planta, [1-4]. En específico, las multas impuestas en la región sur de Brasil sirvieron de estímulo para aplicar diferentes estrategias operativas conducentes a minimizar los costos derivados por el consumo de agua al tiempo que se incrementaba la producción, [5-6].

Los diferentes instrumentos y herramientas de análisis y optimización disponibles en la industria, para la mejora continua de su eficiencia en el consumo de los recursos hídricos, y sus costos asociados, pueden agruparse en dos grandes esquemas generales de abordaje: 1) análisis de redes de consumo de agua y redes de tratamiento de efluentes por separado y 2) análisis integrados de superestructuras de flujos de agua en planta, uso y tratamiento. Varios autores han señalado la preponderancia que han tenido los primeros sobre los segundos, principalmente por la dificultad matemática en la resolución de estos últimos.

Las herramientas utilizadas para la resolución de modelos de optimización de las operaciones tradicionalmente adoptan algoritmos estandarizados y de eficacia de respuesta comprobada. Esta vía práctica podría estar dejando por fuera otros algoritmos de solución con potencial de mejorar aún más la respuesta optimizada, sobre todo en modelos complejos. El potencial de mejora consiste en la posibilidad de garantizar una respuesta óptima global para el sistema modelado, no únicamente óptimo local. Varios autores han propuesto algoritmos para obtener óptimos globales.

El presente trabajo explora la factibilidad de aplicar alguno de ellos a un caso de minimización de costos operativos en la industria de refrigerantes y luego comparar la respuesta obtenida con el uso de los algoritmos estandarizados y evaluar si, más allá de la realidad matemática, existirían razones prácticas para su adopción.

El primer aspecto a considerar fue el diseño de la super-estructura a modelar. Para ello se revisaron modelos aplicados en la minimización costos asociados al consumo de algún recurso costoso (energía, calor y efluentes) [7-13]. Se seleccionó un tipo de acercamiento [13] y se adaptó para ajustar la representatividad de la situación objeto de estudio –industria de refrigerantes con necesidad de optimizar uso de recursos hídricos-. Estas adaptaciones se fundamentaron en los resultados de otras experiencias en la aplicación de dichos modelos; específicamente se revisaron aplicaciones en la industria de refinación petrolera y petroquímica. [12]. Los detalles de la superestructura se presentan en el apartado N°1 -Diseño de una superestructura de distribución de agua en planta. - seguidos de la metodología del algoritmo seleccionado para la optimización [8], [14-16]. En la sección de resultados, se les compara para obtener algunas conclusiones y recomendaciones que permitan avanzar en la determinación de instrumentos eficaces para la optimización de procesos industriales, específicamente la minimización de costos asociados al consumo de recursos hídricos.

2. Diseño de una superestructura de distribución de agua en planta. -Alva-Argaez et al. [13] proponen un modelo para optimizar la distribución de efluentes en una refinería, en el cual se indican:

1. Un conjunto de fuentes de agua fresca disponible para satisfacer la demanda, en operaciones que la consumen, definido en términos de flujos límite, concentración de contaminantes y costos
2. Un conjunto de operaciones, definidas en términos de la máxima concentración de entrada de ciertos contaminantes claves y la carga de masa del contaminante incrementado dentro de la operación. Un subconjunto “tratamientos”, definido en términos de eficiencia en la remoción de contaminantes antes de la entrada a las operaciones o al vertido final.
3. Un conjunto de contaminantes claves, significativos para el proceso, que pueden estar presente en las fuentes de agua fresca o ser incorporados en las operaciones que utilizan agua.

La automatización del método recae en la optimización de una superestructura. Todas las posibilidades para la reutilización, regeneración, reciclaje y tratamiento son incluidas en la formulación matemática. En la figura I se presenta el esquema que muestra el modelo general de superestructura para la minimización del consumo de recursos.

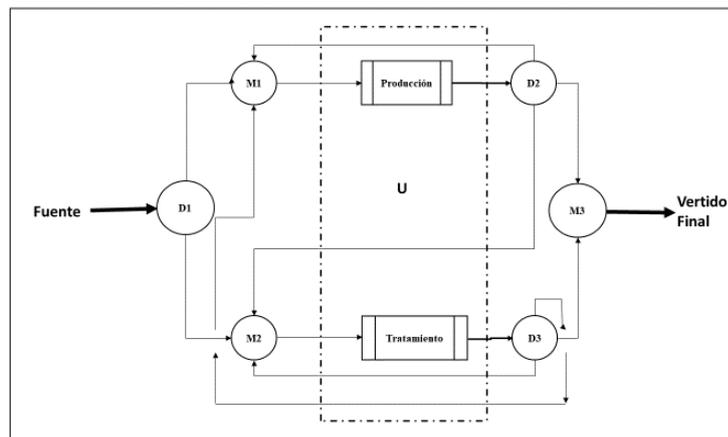


Figura I: Superestructura general de una topología de red de distribución de recursos hídricos en planta.

1. Cada línea de agua que entra en la red se distribuye, en el punto de distribución D1, a todas las unidades i del conjunto U , que procesan o tratan el agua.
2. Todas las líneas de efluentes generados en las operaciones se mezclan en un punto final M3 donde se deben alcanzar todas las regulaciones ambientales antes del vertido final.
3. Antes de cada operación se consideran los mezcladores M1 y M2, donde los flujos del distribuidor de agua fresca y los flujos de reutilización proveniente de las operaciones, confluyen en un flujo entrante a la operación considerada.
4. Después de cada operación se considera un distribuidor, D2 o D3 dependiendo si su origen es procesamiento o tratamiento. De ellos, el flujo se dirige a reutilización en cualquier unidad o al mezclador M3 para vertido.

La función objetivo incluye términos para los costos operacionales de la red -costos de obtención del agua fresca- y costos de capital debido a la instalación de tuberías y habilitación de unidades de tratamiento.

El modelo matemático incluye balances de masa para cada contaminante en cada mezclador, distribuidor y operación. Para controlar las características estructurales del proyecto, los autores proponen variables binarias asociadas a cada conexión posible. La solución del problema resulta en un consumo mínimo de agua fresca y una topología para la red del proceso. Se identifican las tasas de flujos y concentración de contaminantes en cada línea. Para determinar el costo de capital debido a las tuberías se requieren restricciones relacionando la tasa de flujo con el área transversal de la tubería requerida.

5.1 Componentes de la superestructura aplicada. -Las superestructuras, o modelos de estructuras abiertas, consideran todas las combinaciones tecnológicamente posibles de flujo-equipamiento. [8], Cada flujo que entra a la superestructura tiene un costo asociado cuya suma en el total del flujo será minimizada. La respuesta óptima será la estructura de flujo-equipamiento cuyo conjunto y valores provee el menor costo total. Si se consideran unidades no instaladas hay que incluir costos de capital y el modelo es del tipo *Mixed Integer Nonlinear Problem* -MINLP. Con la adaptación propuesta para la aplicación en el caso de estudio de la fábrica de refrescos, sólo se considera capacidad instalada y costos operativos, por ello el modelo a trabajar es del tipo *Nonlinear Problem NLP*.

1. *Al respecto de los puntos de mezcla de flujos M.* El mezclador consiste en una unidad de salida para la unidad correspondiente -sea operación o tratamiento- y un conjunto de corrientes de entrada proveniente de cada uno de los distribuidores. En cada mezclador se establecen balances de masa totales y por contaminante.
2. *Al respecto de los puntos de distribución de flujos D.* El distribuidor D consiste en una corriente de entrada proveniente de la fuente o de alguna unidad y un conjunto de corrientes de salida para todos los posibles mezcladores M. Se presenta el balance de masa total y por contaminante. Es necesario forzar la condición para que cada corriente de salida tenga la misma concentración en contaminantes, es decir que la distribución produzca flujos homogéneos y la concentración en la entrada sea la misma que en la salida. Para eso se consideran las concentraciones de salida como constante.
3. *Al respecto de las unidades de operación o tratamiento U.* La unidad U consiste en una corriente de entrada proveniente directamente de un mezclador M y una de salida para un distribuidor D. Para cada una de las posibles unidades se presentan los balances de masa totales y por contaminante.

5.2 Adaptaciones para el caso de estudio de una industria de refrescos. -Alva-Argaez et al [13] aplicaron el modelo al proyecto de distribución de agua en una refinería, específicamente en operaciones en las que no había necesidad de considerar incorporación de agua como materia prima al producto, sólo pérdidas por evaporación. En tal sentido, para adecuarlo a la realidad de la industria de refrescos, se adecuó el balance de masa en las operaciones de procesamiento considerándose la salida de agua en el producto.

Siguiendo la vía propuesta por Levente et al [12], para el caso de proyectos de aplicación inmediata, que buscan optimizar las eficiencias con pequeños cambios, los costos de inversión en capital pueden no ser considerados y tomar únicamente costos marginales que permitan valorar los flujos que están siendo utilizados en el proceso, y las tuberías o conexiones existentes, aunque no estén operativas.

6. Metodología:

6.1 Algoritmos de resolución. -La garantía de una respuesta del tipo “óptimo global” depende en gran medida de la cercanía de la solución inicial del proceso iterativo a la solución óptima. Por ejemplo, con el uso de Minos 5 ®, si el punto inicial estuviere lejos del óptimo entonces la solución final puede converger a un óptimo local con mayor costo.

En el tipo de problema presentado en estas superestructuras, la dificultad en la determinación de la solución surge de la naturaleza de los balances de masa por contaminante en los mezcladores M1 y M2: estos balances originan restricciones que son bilineales, con signo diferente en los flujos y concentración de contaminantes, consecuentemente son restricciones no-convexas y pueden resultar en más de un óptimo local.

Para mejorar la respuesta se optó por un método de descomposición tipo GBD²¹ [16] que continúa siendo aplicado con buenos resultados en optimizaciones de procesos similares [14] [15]. Para esto se clasifica apropiadamente el conjunto de variables y el de las restricciones para descomponer el problema original NLP no convexo en una serie de problemas convexos cuya solución lleve a la solución óptima global. El algoritmo GBD propone seleccionar del conjunto de variables, un subconjunto de complejas y otro de no complejas, en referencia a la relación que tengan con las causas para la no convexidad o la bilinealidad del problema. Luego propone dividir el problema en uno que contenga las restricciones únicamente de variables complejas y otro las de variables complejas y no complejas. De esta división de variables y restricciones se forman el problema primal y el master.

El problema Primal consiste en la función objetivo y el segundo subconjunto de restricciones (aquél con variables complejas y no complejas). Aquí se toman como dato fijo los valores de las variables complejas generadas en el problema Master, o por una solución inicial para comenzar la iteración. La solución del problema Primal se considera el límite superior de la función objetivo original. El problema Master consiste en el primer subconjunto de restricciones (aquél con variables únicamente complejas) y un conjunto de inecuaciones que envuelven la función lagrangeana derivada de la solución del problema primal. Aquí se calculan los valores de las variables complejas y se provee al sistema de un límite inferior de la función objetivo original.

7. Caso de Estudio: Planta de elaboración de refrescos en el sur de Brasil.

7.1 Análisis del sistema real. -El sistema se considera como un proceso industrial hidrintensivo, que requiere cierta cantidad de agua -obtenida y procesada a cierto costo-, para elaborar productos. Las fuentes de obtención de agua son la red de distribución industrial estadual y los pozos artesanales dentro de las instalaciones de la fábrica. Los procesos son aquellos que demandan agua como materia prima para la elaboración de productos o generación de vapor, y aquellos que la acondicionan para su consumo interno o para alcanzar requerimientos ambientales de disposición final. Los valores numéricos considerados corresponden a las medias de los períodos de invierno y verano de 3 años consecutivos. No se consideraron las necesidades de agua de los procesos en los cuales ella no sea directamente incorporada en los productos o tratada. Esto excluye procesos de lavado, sanitarios, restauración y comercial. Se consideraron dos factores contaminantes en los flujos de agua:

²¹ Generalized Bender's Decomposition

alcalinidad y cloro. Estos son los contaminantes controlados en las unidades operacionales: Elaboración de Refrescos y Generación de Vapor, sus concentraciones pueden entonces ser utilizada como valor restrictivo de los flujos entrantes a las operaciones. Los flujos se trabajaron en promedios de dos temporadas de demanda:

2. Baja (de junio a septiembre), cuando la planta opera al 45.16% de su capacidad instalada;
3. Alta (de octubre a mayo), cuando la utilización alcanza el 75.3% de la capacidad instalada.

En la tabla I se presentan los datos de campo con los promedios en L/día. de producción por sabor y empaque en baja y alta temporada.

Producto	Baja Temporada 45.16% capacidad				Alta Temporada 75.30 % capacidad			
	Botella 290 mL	Botella 1,5 L	Lata 350 mL	Total	Botella 290 mL	Botella 1,5 L	Lata 350 mL	Total
Sabor 1	52.157	92.073	145.151	289.382	64.196	145.650	220.933	430.779
Sabor 2	7.306	12.168	24.616	44.090	8.691	20.162	31.388	60.240
Sabor 3	4.016	3.707	19.181	26.905	3.926	6.740	22.332	32.998
Sabor 4	2.250	2.671	2.640	7.561	2.365	6.558	16.165	25.088
Sabor 5	1339	0	0	1.339	2.476	0	0	2.476
Sabor 6	0	5.331	0	5.331	0	0	0	0
Sabor 7	2.827	4.267	6.095	13.188	2.822	8.891	19.886	31.599
Sabor 8	0	0	26.516	26.516	0	0	29.196	29.196
Total	69.895	120.218	224.199	414.312	84.476	188.000	339.900	612.376

Tabla I. Producción de refrescos L/día. Fuente: Levantamiento de campo y data histórica

7.2 Modelo Económico. -Se adaptó el modelo propuesto por Alva-Argaez et al [13]. El problema consiste en identificar la estructura óptima de distribución de agua dentro de la planta, de forma que se cumpla el nivel de producción requerido dentro de las especificaciones de calidad del producto y al menor costo posible. El modelo se aplicará sobre la capacidad instalada de la fábrica, considerando el potencial de redistribución y reconexión a un costo de capital despreciable visto que se actúa sobre líneas existentes y/o proyectadas anteriormente. Todos los costos considerados varían proporcionalmente al flujo transportado y el modelo no requiere variables enteras asociadas a la existencia o no de ciertos flujos. El modelo presenta no-linealidad en los balances por componentes en los mezcladores M1 antes de las operaciones -ver Figura I-. Los costos de obtención de agua, presentados en la tabla II, corresponden a:

1. Para el agua de la red industrial estadual, el publicado en notificación oficial [17].
2. Para el agua de pozo artesanal, el costo de cobranza propuesto por el ante proyecto de Ley para la cobranza de aguas profundas de la bacía hidrográfica Iguazú. [18].

Fuente	Costo
Red Industrial	1,430
Pozo	0,201 ²²

Tabla II Costos de los flujos de agua por tipo de fuente USD/m³

En la tabla III se presenta la distribución del consumo actual de agua en las temporadas baja y alta para alcanzar la producción mostrada anteriormente en la tabla II. A seguir en la figura II se muestra la estructura interna de distribución de los flujos a las operaciones de producción y tratamiento.

Fuente	Consumo baja temporada	Consumo alta temporada
Red Industrial SANEPAR S	147,60	226,9
Pozo P	292,62	469,60
Total	440,22	696,5

Tabla III Consumo de Agua m³/día por fuente y temporada

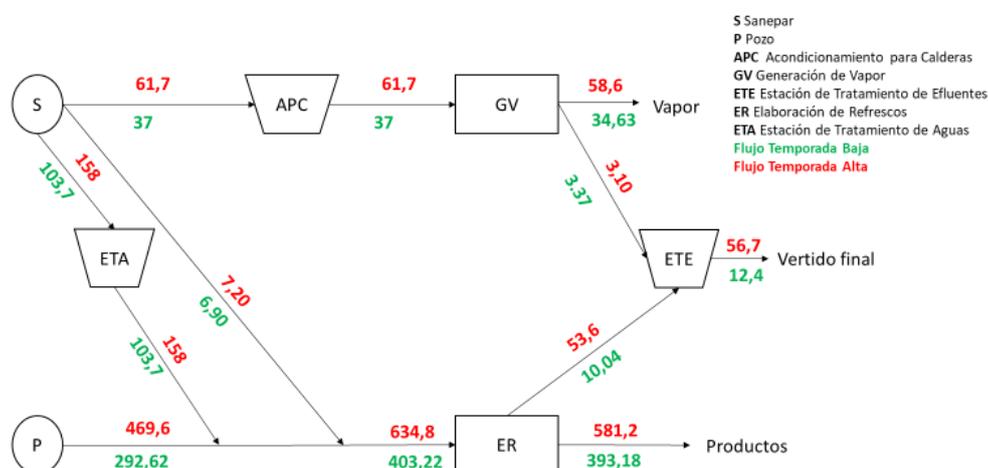


Figura II: Distribución del agua dentro de la planta m³/día por temporada

En estas condiciones de consumo de agua de las distintas fuentes, se define el criterio económico, variable a optimizar, como el costo total por consumo de agua en la planta, bajo la siguiente relación:

$Costo\ Total = (\text{Consumo de Agua red industrial (m}^3\text{/mes)} \times \text{Costo unitario del Flujo (USD/m}^3\text{)}) + (\text{Consumo de Agua Pozo(m}^3\text{/mes)} \times \text{Costo unitario del Flujo (USD/m}^3\text{)}) + \text{multa por consumo sobre el límite establecido en la licencia de operación.}$

Estos valores se presentan en la tabla IV para las estructuras de distribución de la figura II.

²² Más USD 1.000 por mes en el que se supere el valor establecido en la licencia de operación. Esta situación es fija en la operación de alta y baja temporada, por lo que en la actualidad mensualmente tienen un costo fijo de USD 1.000,

Fuente	Costo Temporada Baja	Costo Temporada Alta
SANEPAR	5.487,77	8.436,14
Pozo	1.529,23	2.454,13
Total	7.017,00 + 1.000	10.890,27 + 1.000

Tabla IV Costo total actual por consumo de agua por temporada (USD/mes) + multa (USD/mes)

4.3. Formulación del modelo. -Sean dados:

- El conjunto **U** de operaciones a ser consideradas en el sistema de agua, separado en dos subconjuntos: El conjunto de todas las operaciones que necesitan agua **IO**, cada una descrita en términos de la concentración máxima de entrada de cada factor contaminante considerado **W** y el conjunto de todas las operaciones que tratan el agua **IT**, que es descrito por su desempeño en la remoción **R** de los factores contaminantes considerados **W**. Cada operación **IO** tiene asociado un conjunto de restricciones de flujo **F** mínimo que entra para garantizar la producción necesaria **FP**.
- El conjunto **P** de **W** factores contaminantes a ser considerado, que están presentes en las fuentes y pueden o no ser removidos en las operaciones de tratamiento **IT**.
- El conjunto **A** de **J** fuentes de agua disponible para alcanzar las exigencias de producción, su composición relativa a los factores contaminantes considerados **W**. A cada fuente se le asocia un límite superior de consumo de flujo **F** en la red de distribución, lo cual corresponde al máximo establecido en la habilitación otorgada a la industria. Se asocia también un costo unitario **C** a cada fuente.

Se asume que:

- Todos los datos para la descripción de las concentraciones máximas de los factores contaminantes **W** permitidas en las unidades de operación **IO** están disponibles y son correctos.
- El número de operaciones que utilizan **IO** o que tratan, agua **IT**, es fijo.
- El porcentaje de remoción **R** de los factores contaminantes **W** es independiente de su concentración en la entrada para una unidad en particular.
- Los flujos volumétricos **F** no se alteran significativamente con la remoción de los factores **W** en las unidades de tratamiento **IT**.
- Los valores de las concentraciones de los factores contaminantes **W** en los flujos **F** tienen mayor significado al ser considerados como parámetro matemático para restringir el flujo de entrada en las unidades que procesan agua, que debe cumplir con requerimientos de calidad de producto. Por otro lado, se asume que los factores contaminantes **W** se mezclan homogéneamente.

De los puntos a) a c) y los supuestos i) a v), se obtiene la superestructura específica presentada en la figura III.

$$C_{w,it} F_{it} - R_{w,it} C_{w,it} F_{it} - C_{w,it'} F_{it'} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } it \text{ y } it' \in U \quad (14)$$

Balances de masa por componente en los distribuidores D2 y D3

$$\sum_{io} C_{w,io'} F_{io',io} + \sum_{it} C_{w,io'} F_{io',it} + C_{w,ip'} F_{io',d} - C_{w,io'} F_{io'} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io' \in U \quad (15)$$

$$\sum_{io} C_{w,it'} F_{it',io} + \sum_{it} C_{w,it'} F_{it',it} + C_{w,it'} F_{it',d} - C_{w,it'} F_{it'} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } it' \in U \quad (16)$$

Balance de masa por componente en el mezclador final antes de la descarga del desecho

$$\sum_{io'} C_{w,io'} F_{io',d} + \sum_{it'} C_{w,it'} F_{it',d} - C_{w,d} F_d = 0 \quad (17)$$

Restricciones ambientales de consumo de los recursos hídricos

$$F_j \leq \text{Lim}f_j \quad \forall j \in A \quad (18)$$

Restricciones operacionales de concentración de contaminantes en las unidades que necesitan agua

$$C_{w,io} \leq \text{Lim}c_{w,io} \quad \forall w \in P \text{ y } io \in U \quad (19)$$

Restricciones ambientales de concentración de contaminantes en el desecho

$$C_{w,d} \leq \text{Lim}c_{w,d} \quad \forall w \in P \quad (20)$$

Índices

j = Fuentes de agua disponibles = $\{j / j \in (\text{Red industrial, pozo})\}$,

io = Operaciones que procesan agua y la utilizan como materia prima = $\{io / io \in (\text{Generación de vapor, elaboración de refresco})\}$,

it = Operaciones que tratan agua removiendo contaminantes = $\{it / it \in (\text{ETA, APC, ETE})\}$,

io' = Salida de operaciones de procesamiento = $\{io' / io' \in (\text{Generación de vapor, elaboración de refresco})\}$,

it' = Salida de las operaciones de tratamiento = $\{it' / it' \in (\text{ETA, APC, ETE})\}$,

d = Desecho final

w = Factores contaminantes = $\{w / w \in (\text{Alcalinidad, cloro})\}$.

VARIABLES DE DECISIÓN

F = Flujos de agua

F_j = Flujo de las fuentes

$F_{j,io}$ = Flujo del distribuidor D1 de la fuente j al mezclador M1 antes de la operación io

$F_{j,it}$ = Flujo del distribuidor D1 de la fuente j al mezclador M2 antes de la operación it

F_{io} = Flujo que sale del mezclador M1 y entra en la operación io

F_{it} = Flujo que sale del mezclador M2 y entra en la operación it

$F_{io'}$ = Flujo que sale de la operación io y va al distribuidor D2

$F_{it'}$ = Flujo que sale de la operación it y va al distribuidor D3. Se asume que la cantidad de agua en la remoción de los contaminantes es prácticamente nula y $F_{it} - F_{it'} \approx 0$

$F_{io',io}$ = Flujo que sale del distribuidor D2 de la operación io y va para el mezclador M1 antes de la misma operación io , como recirculación.

$F_{io',it}$ = Flujo que sale del distribuidor D2 de la operación io y va para el mezclador M2 antes de la operación it

$F_{io',d}$ = Flujo que sale del distribuidor D2 de la operación io y va para el mezclador M3 antes del vertido final.

$F_{it',io}$ = $F_{io',it}$ = Flujo que sale del distribuidor D3 de la operación it y va para el mezclador M1 antes de operación io

$F_{it',it}$ = Flujo que sale del distribuidor D3 de la operación it y va para el mezclador M2 antes de la misma operación it , como recirculación.

$F_{it, d}$ = Flujo que sale del distribuidor D3 de la operación it y va para el mezclador M3 antes del vertido final.

F_d = Flujo del vertido Final

$C_{w, io}$ = Concentración del contaminante w en el flujo que sale del mezclador M1 y entra en la operación io

$C_{w, it}$ = Concentración del contaminante w en el flujo que sale del mezclador M2 y entra en la operación it

$C_{w, io'}$ = Concentración de contaminante w que sale de operación io y entra en distribuidor D2

$C_{w, it'}$ = Concentración de contaminante w que sale de operación it y entra en distribuidor D3

$C_{w, d}$ = Concentración del contaminante w que sale del distribuidor D3 y va a vertido final

Constantes

Costoj = Costo de consumo de la fuente de agua fresca

$C_{w, j}$ = Concentración del contaminante w en la fuente j

Limfj = Límite superior del flujo de agua de la fuente j

Limc_{w,io} = Límite superior de la concentración del contaminante w en entrada de operación io

Limc_{w,d} = Límite superior de la concentración del factor contaminante w en el vertido final

$R_{w,it}^{23}$ = Fracción de remoción del contaminante w en la unidad de tratamiento it

FP_{io} = Flujo de agua que sale como producto en las operaciones io

Los valores de los costos se presentaron en la tabla IV y a seguir se presentan en la tabla V los valores límites de las concentraciones de contaminantes medidas en campo, en la tabla VI los límites máximos de consumo permitido por la Agencia Nacional de Regulación de Recursos Hídricos [18], en la tabla VII los valores límite de los contaminantes en los requerimientos de control de calidad de la producción, en la tabla VIII los límites establecidos para el vertido de contaminantes en la regulación ambiental [19], en la tabla IX las fracciones de contaminante removido en it medida en campo como diferencia entre entrada y salida y en la tabla X los requerimientos de salida de agua constituyente de los productos para alcanzar el parámetro de calidad exigido en la operación.

	Red industrial Sanepar S	Pozo P
Alcalinidad (mg/m3)	24.000	52.000
Cloro libre (mg/m3)	6.000	0

Tabla V: Concentración de factores contaminantes en el agua de la fuente.

Fuente Datos de campo, media estacional y data histórica de la planta

Red Industrial	775
Pozo	281

Tabla VI: Flujo máximo de agua de las fuentes (m3/día).

Fuente: Licencia Operativa de la Empresa.

²³ El factor de remoción R, no aparece reflejado en el diagrama de la figura III porque no implica flujo de agua, únicamente contaminantes en base seca.

	Generación de vapor	Producción de refrigerante
Alcalinidad (mg/m ³)	20.000	85.000
Cloro libre (mg/m ³)	7.000	0

Tabla VII: Concentraciones máximas de factores contaminantes en las operaciones. Fuente: Manual de Operaciones

Factor contaminante	Concentración máxima
Alcalinidad (mg/m ³)	24.000
Cloro libre (mg/m ³)	6.000

Tabla VIII: Concentraciones máximas de factores contaminantes en la descarga. Fuente: Manual de Buenas Prácticas Operaciones con base a límites de descarga a cuerpos de agua en legislación vigente²⁴

	Estación de tratamiento de agua ETA	Acondicionamiento o para calderas APC	Estación de tratamiento de efluentes ETE
Alcalinidad	0,20	0,90	0,50
Cloro	1	0,32	0,99

Tabla IX: Fracción de remoción de factores contaminantes en las operaciones de tratamiento. Fuente: Estimación de campo, diferencia entrada-salida de las operaciones de tratamiento, media estacional

	Generación de vapor	Producción de refrigerante
Temporada baja	34,63	393,18
Temporada alta	58,60	581,20

Tabla X: Flujos de agua como producto de las operaciones (m³/día). Fuente: Calculado con base a datos de y parámetros de la producción y el Manual de Operación y control de Calidad de la Planta

El problema modelado entonces en las ecuaciones 1-20 es un problema NLP no convexo, aunque la función objetivo sea lineal y convexa. La no-linealidad aparece en las restricciones 10-17 en los términos bilineales de concentración variable del flujo que sale de los mezcladores multiplicado por los flujos. La no-convexidad se origina en la suma de términos bilineales con signo opuesto.

4.4. Resolución del Modelo. A seguir se presenta la resolución del modelo, siguiendo la propuesta de Floudas, Ciric et al. [14] [15] con base al algoritmo GBD [16] y el solucionador disponible en GAMS® con la idea de procurar un óptimo global. Esta solución se comparará

²⁴ La contaminación en los efluentes no es controlada por la mínima concentración de los mismos en las aguas que son potables.

con la obtenida directamente al introducir el modelo original NLP en la herramienta MINOS también en GAMS [20].

4.4.1. Selección de las variables complejas del problema original (1-20). Las restricciones 10-17 del problema original son bilineales en las concentraciones de contaminantes y flujos de agua. Si se fijan los valores de la variable Flujos, entonces los balances se vuelven lineales en la variable concentración, del mismo modo si se fijan las concentraciones entonces los balances se vuelven lineales en la variable Flujo. Puede entonces seleccionarse un conjunto de variables tal que el sistema quede determinado. Se selecciona la variable Flujo siguiendo prácticas en trabajos anteriores en los que se aplica el algoritmo GBD [21] [22], [23]. De esta forma, una vez eliminadas las redundancias, el problema Primal resultante tiene un óptimo y factible [8], [24]. Para eliminar las redundancias se utilizaron los siguientes ajustes:

1. Se definieron variables de holgura:

HO_j = para el consumo de las fuentes

$H_{w,io}$ = para la concentración de contaminantes antes de las operaciones

$HD_{w,io}$ = para la concentración de contaminantes en el vertido final

- Se descartó la ecuación (10) ya que la concentración de los contaminantes w en los flujos de las fuentes F_j es constante y quedaría igual a la ecuación (2) que a su vez se incorporó en la función objetivo. De la misma forma se prescinde de las ecuaciones (15) y (16) de los balances de masa en los distribuidores D2 y D3 luego de cada operación io e it , ya que los flujos quedan determinados en el mezclador inicial M1 de la ecuación (11) y restringido por las ecuaciones (19) y (20). En consecuencia, de las modificaciones anteriores, la función objetivo queda desligada de las restricciones. Para re-asociarla debe ser modificada substituyendo la variable del flujo total de la fuente F_j por la relación de la ecuación (2) correspondiente al balance de masa en el distribuidor inicial D1. Función objetivo original

$$\text{Min } Z = \sum_j (\text{Costo}_j) (F_j) \quad (1)$$

sujeta a:

$$\sum_{io} F_{j,io} + \sum_{it} F_{j,it} - F_j = 0 \quad \forall j \in A \quad (2)$$

Nueva función objetivo

$$\text{min } Z = \sum_j (\text{Costo}_j) (\sum_{io} F_{j,io} + \sum_{it} F_{j,it})$$

3. Las inecuaciones (18) (19) y (20) se transformaron en ecuaciones agregándose las variables de holgura. Se puede considerar que no interfieren en el hecho de que la solución sea ser única porque no agregan grados de libertad (12 ecuaciones con 24 variables, 12 comunes a las otras restricciones en forma de ecuaciones y 12 nuevas variables de holgura H).

$$F_j \leq \text{Lim}f_j \quad \forall j \in A \rightarrow \sum_{io} F_{j,io} + \sum_{it} F_{j,it} + H_j - \text{Lim}f_j = 0 \quad (18)$$

$$C_{w,io} \leq \text{Lim}c_{w,io} \rightarrow C_{w,io} + H_{w,io} - \text{Lim}c_{w,io} = 0 \quad (19)$$

$$C_{w,d} \leq \text{Lim}c_{w,d} \rightarrow C_{w,d} + H_{w,d} - \text{Lim}c_{w,d} = 0 \quad (20)$$

Entonces se tiene a seguir la selección de variables complejas definitivas:

$F_{j,io}$ = Flujo del distribuidor D1 de la fuente j al mezclador M1 antes de la operación io

$F_{j,it}$ = Flujo del distribuidor D1 de la fuente j al mezclador M2 antes de la operación it

F_{io} = Flujo que sale del mezclador M1 y entra en la operación io

F_{it} = Flujo que sale del mezclador M2 y entra en la operación it

$F_{io',io}$ = Flujo que sale del distribuidor D2 de la operación io y va para el mezclador M1 antes de la misma operación io , como recirculación.

$F_{io', it}$ = Flujo que sale del distribuidor D2 de la operación io y va para el mezclador M2 antes de la operación it

$F_{io', d}$ = Flujo que sale del distribuidor D2 de la operación io y va para el mezclador M3 antes del vertido final.

$F_{it', io}$ = $F_{io', it}$ = Flujo que sale del distribuidor D3 de la operación it y va para el mezclador M1 antes de operación io

$F_{it', it}$ = Flujo que sale del distribuidor D3 de la operación it y va para el mezclador M2 antes de la misma operación it, como recirculación.

$F_{it', d}$ = Flujo que sale del distribuidor D3 de la operación it y va para el mezclador M3 antes del vertido final.

F_d = Flujo del vertido Final

4.4.2. Variables No Complejas del Problema Original. El conjunto de variables no complejas seleccionadas es:

$C_{w, io}$ = Concentración de contaminante w que sale de mezclador M1 y entra en operación io

$C_{w, it}$ = Concentración del contaminante w que sale de mezclador M2 y entra en operación it

$C_{w, io'}$ = Concentración del contaminante w que sale de operación io y entra en distribuidor D2

$C_{w, it'}$ = Concentración del contaminante w que sale de operación it y entra en el distribuidor D3

$C_{w, d}$ = Concentración del contaminante w que sale del distribuidor D3 y va a vertido final

4.4.3. Conjunto de restricciones

Restricciones que contienen sólo variables complejas

$$\sum_j F_{j,io} + \sum_{io'} F_{io',io} + \sum_{it'} F_{it',io} - F_{io} = 0 \quad \forall io \in U \quad (3)$$

$$\sum_j F_{j,it} + \sum_{io'} F_{io',it} + \sum_{it'} F_{it',it} - F_{it} = 0 \quad \forall it \in U \quad (4)$$

$$F_{io} - F_{io'} - F_{P_{io}} = 0 \quad \forall io, io' \in U \quad (5)$$

$$F_{it} - F_{it'} = 0 \quad \forall it, it' \in U \quad (6)$$

$$\sum_{io} F_{io',io} + \sum_{it} F_{io',it} + F_{io',d} - F_{io'} = 0 \quad \forall io' \in U \quad (7)$$

$$\sum_{io} F_{it',io} + \sum_{it} F_{it',it} + F_{it',d} - F_{it'} = 0 \quad \forall it' \in U \quad (8)$$

$$\sum_{io'} F_{io',d} + \sum_{it'} F_{it',d} - F_d = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{io} F_{j,io} + \sum_{it} F_{j,it} + H_j - \text{Lim}f_j = 0 \quad \forall j \in A \quad (18)$$

Restricciones con variables complejas y no complejas

$$\sum_j C_{w,j} F_{j,io} + \sum_{io'} C_{w,io'} F_{io',io} + \sum_{it'} C_{w,it'} F_{it',io} - C_{w,io} F_{io} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io \in U \quad (11)$$

$$\sum_j C_{w,j} F_{j,it} + \sum_{io'} C_{w,io'} F_{io',it} + \sum_{it'} C_{w,it'} F_{it',it} - C_{w,it} F_{it} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } it \in U \quad (12)$$

$$C_{w,io} F_{io} - C_{w,io'} F_{io'} - C_{w,io} F_{P_{io}} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io \text{ y } io' \in U \quad (13)$$

$$C_{w,it} F_{it} - C_{w,it'} F_{it'} - C_{w,it'} F_{it'} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } it \text{ y } it' \in U \quad (14)$$

$$\sum_{io'} C_{w,io'} F_{io',d} + \sum_{it'} C_{w,it'} F_{it',d} - C_{w,d} F_d = 0 \quad (17)$$

$$C_{w,io} + H_{w,io} - \text{Lim}c_{w,io} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io \in U \quad (19)$$

$$C_{w,d} + H_{w,d} - \text{Lim}c_{w,d} = 0 \quad \forall w \in P \quad (20)$$

4.4.4. Problema Primal P1. Siguiendo el algoritmo propuesto por Floudas et al. [15], [16], el problema primal se construye con la función objetivo y el conjunto de restricciones conteniendo variables complejas y no complejas. Como se escogió la variable flujo como la

compleja, entonces al fijarse sus valores iniciales en este problema serán calculados los valores de las variables no complejas -concentraciones- y los multiplicadores de Lagrange para cada restricción. A continuación, se presenta el problema primal, resaltando en negrita los valores conocido por levantamiento en campo (solución inicial) o por resultado del problema Master de las iteraciones siguientes.

Función objetivo

$$\min Z = \sum_j (\mathbf{Costo}_j) (\sum_{io} \mathbf{F}_{j,io} + \sum_{it} \mathbf{F}_{j,it}) \quad (21)$$

sujeta a

$$\sum_j C_{w,j} \mathbf{F}_{j,io} + \sum_{io'} C_{w,io'} \mathbf{F}_{io',io} + \sum_{it'} C_{w,it'} \mathbf{F}_{it',io} - C_{w,io} \mathbf{F}_{io} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io \in U \quad (22)$$

$$\sum_j C_{w,j} \mathbf{F}_{j,it} + \sum_{io'} C_{w,io'} \mathbf{F}_{io',it} + \sum_{it'} C_{w,it'} \mathbf{F}_{it',it} - C_{w,it} \mathbf{F}_{it} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } it \in U \quad (23)$$

$$C_{w,io} \mathbf{F}_{io} - C_{w,io'} \mathbf{F}_{io'} - C_{w,io} \mathbf{F}_{pio} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io \text{ y } io' \in U \quad (24)$$

$$C_{w,it} \mathbf{F}_{it} - R_{w,it} C_{w,it} \mathbf{F}_{it} - C_{w,it'} \mathbf{F}_{it'} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } it \text{ y } it' \in U \quad (25)$$

$$\sum_{io'} C_{w,io'} \mathbf{F}_{io',d} + \sum_{it'} C_{w,it'} \mathbf{F}_{it',d} - C_{w,d} \mathbf{F}_d = 0 \quad (26)$$

$$C_{w,io} + H_{w,io} - \mathbf{Lim}c_{w,io} = 0 \quad \forall w \in P \text{ y } io \in U \quad (27)$$

$$C_{w,d} + H_{w,d} - \mathbf{Lim}c_{w,d} = 0 \quad \forall w \in P \quad (28)$$

El problema primal tiene las siguientes características:

4. Un bloque de 56 ecuaciones descritas en el intervalo (22) -(28)
5. 56 variables
6. La función objetivo se describe en la ecuación (21), su valor es fijo y sin grados de libertad.
7. La solución para las variables complejas es única y óptima.

4.4.5. Problema Master P2. El problema Master P2 se construye con el conjunto de restricciones conteniendo sólo variables complejas y un conjunto de inecuaciones envolviendo la función lagrangeana derivada de la solución del problema Primal. En este sub-problema las variables complejas son calculadas y la solución fija un límite inferior para la función objetivo original. En negrita los valores constantes conocidos,

Función objetivo;

$$\min Z = \mu \quad (30)$$

Sujeta a:

$$\begin{aligned} \mu \geq & (\sum_j (\mathbf{Costo}_j) (\sum_{io} \mathbf{F}_{j,io} + \sum_{it} \mathbf{F}_{j,it}) + (\lambda_{1w,io} (\sum_j C_{w,j} \mathbf{F}_{j,io} + \sum_{io'} C_{w,io'} \mathbf{F}_{io',io} + \sum_{it'} C_{w,it'} \mathbf{F}_{it',io} \\ & - C_{w,io} \mathbf{F}_{io})) + (\lambda_{2w,it} (\sum_j C_{w,j} \mathbf{F}_{j,it} + \sum_{io'} C_{w,io'} \mathbf{F}_{io',it} + \sum_{it'} C_{w,it'} \mathbf{F}_{it',it} - C_{w,it} \mathbf{F}_{it})) + (\lambda_{3w,io} \\ & (C_{w,io} \mathbf{F}_{io} - C_{w,io'} \mathbf{F}_{io'} - C_{w,io} \mathbf{F}_{pio})) + (\lambda_{4w,it} (C_{w,it} \mathbf{F}_{it} - R_{w,it} C_{w,it} \mathbf{F}_{it} - C_{w,it'} \mathbf{F}_{it'})) + (\lambda_{5w} \\ & (\sum_{io'} C_{w,io'} \mathbf{F}_{io',d} + \sum_{it'} C_{w,it'} \mathbf{F}_{it',d} - C_{w,d} \mathbf{F}_d)) + (\lambda_{6w,io} (C_{w,io} + H_{w,io} - \mathbf{Lim}c_{w,io})) + (\lambda_{7w} \\ & (C_{w,d} + H_{w,d} - \mathbf{Lim}c_{w,d}))) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\sum_j \mathbf{F}_{j,io} + \sum_{io'} \mathbf{F}_{io',io} + \sum_{it'} \mathbf{F}_{it',io} - \mathbf{F}_{io} = 0 \quad \forall io \in U \quad (32)$$

$$\sum_j \mathbf{F}_{j,it} + \sum_{io'} \mathbf{F}_{io',it} + \sum_{it'} \mathbf{F}_{it',it} - \mathbf{F}_{it} = 0 \quad \forall it \in U \quad (33)$$

$$\mathbf{F}_{io} - \mathbf{F}_{io'} - \mathbf{F}_{pio} = 0 \quad \forall io, io' \in U \quad (34)$$

$$\mathbf{F}_{it} - \mathbf{F}_{it'} = 0 \quad \forall it, it' \in U \quad (35)$$

$$\sum_{io'} \mathbf{F}_{io',io} + \sum_{it} \mathbf{F}_{io',it} + \mathbf{F}_{io',d} - \mathbf{F}_{io'} = 0 \quad \forall io' \in U \quad (36)$$

$$\sum_{io} \mathbf{F}_{it',io} + \sum_{it} \mathbf{F}_{it',it} + \mathbf{F}_{it',d} - \mathbf{F}_{it'} = 0 \quad \forall it' \in U \quad (37)$$

$$\sum_{io'} \mathbf{F}_{io',d} + \sum_{it'} \mathbf{F}_{it',d} - \mathbf{F}_d = 0 \quad (38)$$

$$\sum_{io} \mathbf{F}_{j,io} + \sum_{it} \mathbf{F}_{j,it} + H_j - \mathbf{Lim}f_j = 0 \quad \forall j \in A \quad (39)$$

8. Resultados. Se introducen los modelos obtenidos con el algoritmo GBD en el solucionador BDM-LP de GAMS para comenzar las iteraciones. La solución inicial K= 0 corresponde a los valores de los flujos actuales de la planta en temporada alta y baja. Estos datos se presentaron en la tabla III, Figura II y la Tabla IV que muestra los valores de la función objetivo para la solución inicial. El procesamiento se hizo en Windows 10, un procesador Intel Core i7-5500 2.40 GHz CPU y memoria RAM de 8 GB.

En la tabla XI y en la Figura IV se presentan los resultados y la estructura de distribución obtenida para los datos de temporada baja, y en la Tabla XII y Figura V los correspondientes a la temporada alta.

Interacción K	Sub-problema Primal	Sub-problema Master
K = 1	308,41	306,22
K = 2	306,22	306,22
Óptimo global	306,22000	

Tabla XI: Resultado mínimo de la función objetivo en temporada baja (USD/día)

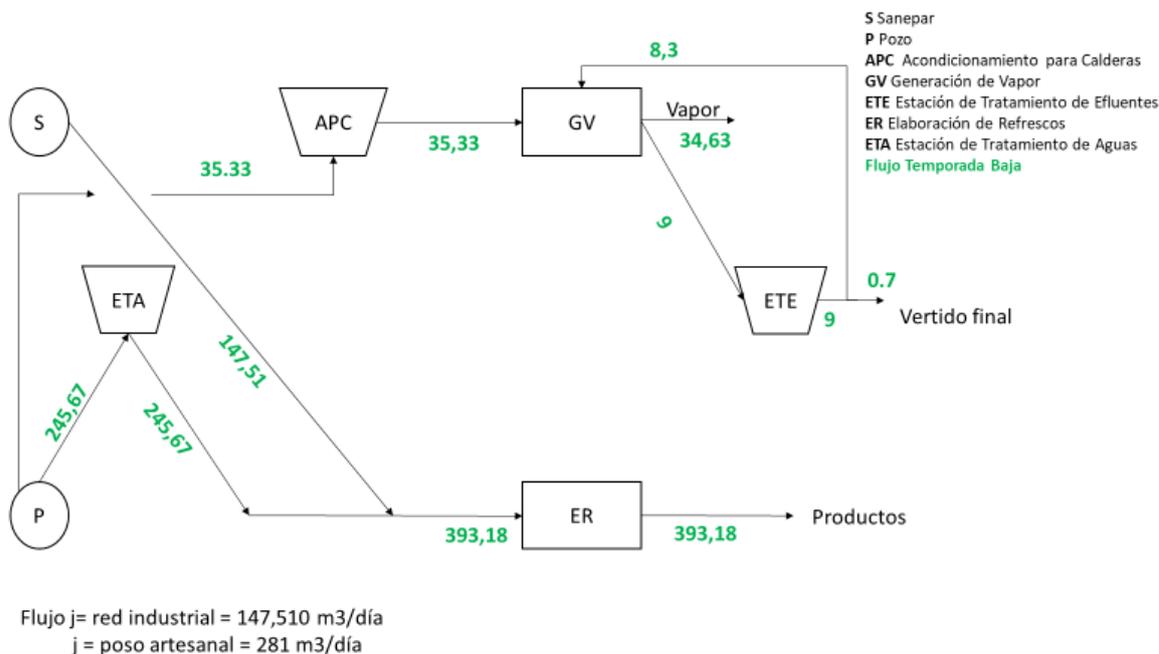


Figura IV: Distribución de agua dentro de la planta (m3/día). Temporada Baja. Fuente: Resultado Iteración K=2

Interacción K	Sub-problema Primal	Sub-problema Master
K = 1	478,53	338,37
K = 2	338,37	338,37
Óptimo global	338,37000	

Tabla XII: Resultado mínimo de la función objetivo en temporada alta (USD/día)

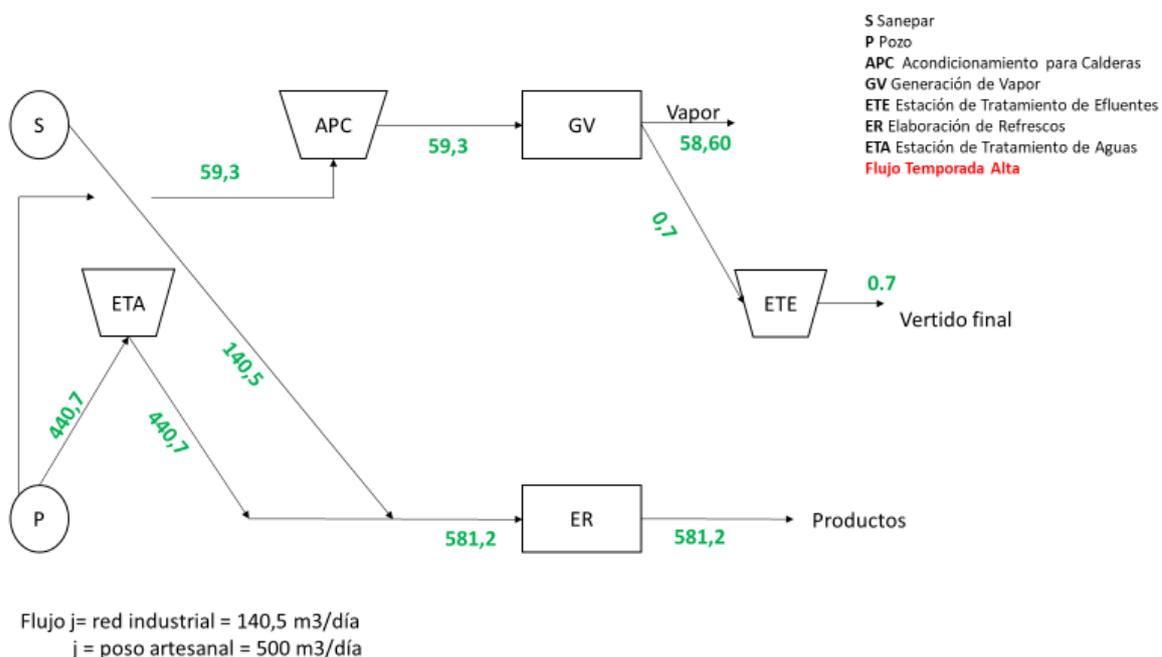


Figura V: Distribución de agua dentro de la planta (m3/día). Temporada Alta. Fuente: Resultado Iteración K=2

En la tabla XIII se presenta la comparación de resultados al introducir del problema original NLP directamente en el solucionador MINOS ®

Algoritmo	Temporada	Tipo de solución
Tradicional en MINOS para NLP -0.99 y 1.42 seg.	baja: 308,4108	Óptimo local
	alta: 374,021	No factible
Floudas et al. Descomposición GBD en BDM-LP 0.077 y 0.082 seg	baja: 306,21543	Óptimo global
	alta: 338,3665	Óptimo global

Tabla XIII: Comparación de resultados de costos totales (USD/día) con dos algoritmos de resolución.

Aplicando el algoritmo propuesto por Floudas et, al, se obtuvo una respuesta más confiable -óptimo global-, que la que se pudo alcanzar con el algoritmo tradicional NLP del solucionador MINOS ® -óptimo local en el mejor de los casos-; y una velocidad de convergencia notablemente mejor. Este resultado coincide con lo reportado por los autores citados al inicio del trabajo, La rapidez de la convergencia permite la realización de varias corridas y un análisis de sensibilidad cuyos resultados se analizarán en estudio posteriores.

El hecho de que la respuesta alcanzada sea un óptimo global garantiza que, para ese conjunto de datos, la distribución de los recursos hídricos derivada de la solución de las variables de decisión, es la correspondiente al menor costo operativo de la temporada.

Más allá de las características estructurales del modelo, es importante analizar ciertos aspectos relacionados al propio resultado práctico de la distribución obtenida y minimización de costos.

La diferencia estructural entre los diagramas de las dos temporadas está en la reutilización del efluente tratado en la unidad de Generación de Vapor. Estas unidades fueron estudiadas como cajas negras, en tal sentido sería ilustrador incorporar un análisis más detallado de lo que está ocurriendo en cada una para proponer concisamente qué forma tomaría esta distribución y si es factible o no. Para evidenciar el alcance del potencial de reducción de costos se muestra en la tabla XIV su variación con base a la situación actual.

Costo de distribución actual (USD/mes)	Temporada baja	8.017
	Temporada alta	11.890,27
Costo de distribución óptimo (USD/mes)	Temporada baja	7961,72
	Temporada alta	9797,62
Reducción de costos (%)	Temporada baja	0.7%
	Temporada alta	17.5%

*Tabla XIV: Reducción de costos por optimización en la distribución de agua*²⁵

9. Conclusiones

El algoritmo propuesto por Floudas et al., [14], [15] basado en GBD [16] provee una respuesta más confiable -óptimo global- que aquella obtenida del algoritmo tradicional para problemas NLP -óptimo local en el mejor de los casos- y una velocidad de convergencia sensiblemente menor.

Hay sin embargo algunos aspectos del comportamiento modelo, que deberían tomarse en consideración para mejoras y sistematizaciones. Es importante por ejemplo considerar el impacto que pueda tener la diferencia de magnitud entre los coeficientes de la función objetivo (costos) y los coeficientes de algunas restricciones (concentraciones de contaminantes). Los primeros son hasta 100.000 veces mayores que los últimos y como multiplican los valores de los flujos cuyos requerimientos varían entre temporadas, el modelo pierde sensibilidad para el valor del costo de las aguas y se presenta muy sensible a las variaciones estacionales. Por ello se ve que, salvo la recirculación de agua para las calderas, la estructura optimizada en relación al costo es prácticamente la misma para ambas estaciones, lo que facilita su implementación ya que los valores de los flujos no superaron los márgenes operativos de las tuberías y bombas instaladas. Otro elemento para la mejora es el modelaje interno de las unidades. ya que éstas fueron modeladas como cajas negras sin diferenciar las sub-unidades en las que podría aún optimizarse la distribución de agua.

Es evidente el impacto mayor del potencial de reducción de costos durante la temporada alta, cuando más agua se utiliza. Si el incremento en el uso del agua en la temporada alta en relación a la temporada baja coincidiese exactamente con los requerimientos por el aumento de producción -valores constantes para cada temporada- entonces la reducción de costos en ambas temporadas debería haberse mantenido igual, ya que esta reducción de los costos

²⁵ El costo incluye la multa mensual mínima de 1000 USD por violación del límite máximo de captación de agua de pozo. En el caso de la distribución actual de los flujos de agua, esta multa vale para ambas temporadas y en el caso de la distribución óptima, la misma sólo considera la temporada alta.

respondería exclusivamente a la optimización de los flujos de agua restantes de los utilizados para la producción directamente. Sin embargo, el aumento de la reducción de costos en lata temporada podría estar indicando ineficiencia en el consumo actual de las aguas en la alta temporada y se abre una oportunidad para optimizar su distribución

10. Referencias

- [1] Congreso Nacional de la República Paraguaya (2007). Ley N° 3239 de los recursos hídricos de Paraguay. Disponible en <http://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2724/de-los-recursos-hidricos-del-paraguay>
- [2] Senado y cámara de diputados de la provincia de Buenos Aires (1999). Ley 12.257 Código de aguas. Disponible en: [http://www.oas.org/usde/environmentlaw/waterlaw/documents/Argentina-Codigo_de_Aguas_\[Beunos_Aires\]_\(1999\).pdf](http://www.oas.org/usde/environmentlaw/waterlaw/documents/Argentina-Codigo_de_Aguas_[Beunos_Aires]_(1999).pdf)
- [3] Governo do estado de Paraná. (1999). Lei 12726, Política estadual de recursos hídricos e outras providências. Disponible en: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=241036>
- [4] Senado y cámara de representantes de la República Oriental del Uruguay. (2009). Ley 18610. Política Nacional de Aguas. Disponible en: http://www.ose.com.uy/descargas/documentos/leyes/ley_18_610.pdf.
- [5] N. Franqueiro y J. Alburquerque. Prospecção de ações recomendadas para a gestão estratégica de águas subterrâneas. Anais XX Congresso Brasileiro de Águas subterrâneas, 2018. Doi: <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.29310>
- [6] A. da C. Reboucas, “Água subterrânea, fator de competitividade,” en Anales XIII Congresso Brasileiro de águas subterrâneas. RELOC – Rede Latinoamericana de Organizações de Bacia, 2000.
- [7] F. Wilkendorf, Antonio Espuña, y Luis Puigjaner, “Minimization of the Annual Cost for Complete Utility Systems,” Chemical Engineering Research and Design, vol. 76, pp. 239-245, 1998. Doi: <https://doi.org/10.1205/026387698524866>
- [8] J. Caballero y I. Grossmann, “Una revisión en el estado del arte en optimización,” Revista Iberoamericana de automática e Informática Industrial, vol. 4, n° 1, pp. 5-23, 2007.
- [9] I. Grossmann, J. Caballero, y H. Yeomans, “Mathematical programming approaches to the synthesis of chemical process systems,” Korean J. Chem. Eng., vol. 16, pp. 407-426, 1999. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02698263>
- [10] C. Demirhan, W. Tso, G. Ogumerem, y E. Pistikopoulos, “Energy systems engineering,” BMC Chemical Engineering, vol. 11, n° 1, pp. 2-19, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1186/s42480-019-0009-5>
- [11] T. Edgar y E. Pistikopoulos, “Smart manufacturing and energy systems,” Computers and Chemical Engineering, vol. 114, pp. 130-144, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.027>
- [12] L. Levente, N. Osterwalder, U. Fischer y K. Hungerbühler, “Systematic Retrofit Method for Chemical Batch Processes Using Indicators, Heuristics, and Process Models,” Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 47, n° 1, pp. 66-80, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1021/ie070044h>.
- [13] A. Alva-Argaez, y A. Joule, “Optimal design of distributed effluent treatment system in steam assisted gravity drainage oil sand operation,” Journal of Cleaner Production, vol. 149, pp. 1233-1248, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.131>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2019. N°17(1). pp 1-200

<https://doi.org/10.36561/ING.17>

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

- [14] A. Floudas, y R. Ciric, R., “Strategies for overcoming uncertainties in the heat exchangers network synthesis”, *Computers Chemical Engineering*, vol. 13, nº 10, pp. 1133-1152, 1989.
- [15] A. Floudas, M. Tan y J. Broach, “A novel clustering approach and prediction of optimal number of clusters: global optimum search with enhanced positioning,” *Journal of Global Optimization*, vol. 39, nº 2, pp. 323–346, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9140-6>
- [16] A. M. Geoffrion, “Generalized Benders Decomposition,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 10, nº 4, pp. 237-260, 1972.
- [17] SANEPAR, Tabela de evolução tarifária, 2018. Disponible en: <http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/clientes2012/tabeladeevolucaotarifaria2018.pdf>
- [18] SUDERHSA, Plano diretor de drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba: Instituto das Águas do Paraná, 2002. Disponible en: http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/pddrenagem/volume3/SUD0103_WR102_Fl.pdf
- [19] SANEPAR, Manual de Projeto de Saneamento. Modulo 1, 2018. Disponible en: https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mps-versao-2018/modulo_01_-_prescricoes_para_elaboracao_e_apresentacao_de_etp.pdf
- [20] B. Murtagh, y M. Saunders, *Minos 5.51 user’s guide*. Standford: Standford University, 2003.
- [21] M. Alhaider, L. Fan, y Z. Miao, “Benders Decomposition for stochastic programming-based PV/Battery/HVAC planning,” 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741775>
- [22] R. Jamalzadeh, F. Zhang, y M. Hong, “An economic dispatch algorithm incorporating voltage management for active distribution systems using generalized benders decomposition,” 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741977>
- [23] A. Diniz y T. Santos, “Feasibility and optimality cuts for the multi-stage benders decomposition approach: Application to the network constrained hydrothermal scheduling,” 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275442>
- [24] W. Yeh, “Optimization methods for groundwater modeling and management,” *Hydrogeology Journal*, vol. 23, pp. 1051–1065, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1260-3>