

Vol. 2, N°5, September 2021

DOI: 1047460

ISSN: 2737-6419

# Athenea

*Journal of Engineering Sciences*



Edited by:

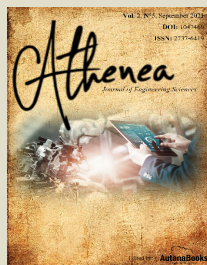
**AutanaBooks**  
*Engineering & Sciences*

## ATHENEA JOURNAL

Electronic Journal Edited By AutanaBooks.

Quarterly Periodicity

Nuestra Postada:



La industria 4.0

La cuarta revolución industrial, es conocida como la industria 4.0, y tiene como finalidad la digitalización de las cosas, la integración de productos, datos y servicios en un mundo globalizado. De esta manera la industria 4.0 persigue la óptima utilización de las herramientas informáticas y de la tecnología, para la mejora de la producción, de los productos y de los usuarios y consumidores [1].

Referencia.

[1] GEINFOR, «¿Qué es la industria 4.0?» [En línea]. Available: <https://geinfor.com/blog/industria-40/>. [Último acceso: 12 septiembre 2021].

## TECHNICAL TEAM

-Webmaster and Metadata Ing. Ángel Lezama (Quito, Ecuador).

[a2lezama@gmail.com](mailto:a2lezama@gmail.com)

-Graphic design and layout: Lcda. Eliannys Copeland (AutanaBooks, Ecuador).

[mddssnn250195@gmail.com](mailto:mddssnn250195@gmail.com)

-Administrative assistant: Lcda. Cruzcelis López (AutanaBooks, Ecuador).

[cruceliserkanessi@gmail.com](mailto:cruceliserkanessi@gmail.com)

-Translator: Lcda. Joralci López Herrera (AutanaBooks, Ecuador).

[joralci@gmail.com](mailto:joralci@gmail.com)

The articles, opinions and contributions that are published in this journal they do not necessarily represent the philosophy informative or institutional of AutanaBooks and may be reproduced with prior authorization of the Publisher. In case of reproduction, it is appreciated to cite the source and send copies of the medium used AutanaBooks, to the following address: Ecuador, Quito, sector mitad del mundo, Av. Manuel Córdova Galarza y Av. Shyris, Conjunto Jardines de San Antonio, Casa B1. Teléfono: +593 984600573, email: [editorial@autanabooks.com](mailto:editorial@autanabooks.com)

Viewing the Journal:  
[www.autanabooks.com](http://www.autanabooks.com)

## DIRECTORY OF THE ATHENEA JOURNAL, IN ENGINEERING SCIENCES

### EDITORIAL BOARD

Editora: Dr. Franyelit Suárez, (AutanaBooks, Quito, Ecuador), (Universidad de las Américas, Quito, Ecuador) [editorial@autanabooks.com](mailto:editorial@autanabooks.com)

### ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Luis Rosales( Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonino José de Sucre", Vice Rectorado Puerto Ordaz, Puerto Ordaz, Venezuela).

[luis.rosals2@gmail.com](mailto:luis.rosals2@gmail.com)

Dr. Janio Jadán (Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador). [janiojadan@uti.edu.ec](mailto:janiojadan@uti.edu.ec)

Dr. Hilda Márquez (Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador). [amarquez@umet.edu.ec](mailto:amarquez@umet.edu.ec)

Dr. Diego Bonilla (Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador). [produccion@bhconsultores.com](mailto:produccion@bhconsultores.com)

Dr. David Parra (Universidad Israel, Quito, Ecuador). [david.parra@uisrael.edu.ec](mailto:david.parra@uisrael.edu.ec)

Mgt. Alberto Haro (Empresa Enyde.ec, Quito, Ecuador).

[alberto.haro@it-solutions-ec.com](mailto:alberto.haro@it-solutions-ec.com)

Mgt. Gustavo Chango (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador).

[gustavo.chango@pucese.edu.ec](mailto:gustavo.chango@pucese.edu.ec)

Dr. Gloria Peña (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador).

[gloria.pena@pucese.edu.ec](mailto:gloria.pena@pucese.edu.ec)

Dr. Beatriz Maldonado (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador).

[beatriz.maldonado@pucese.edu.ec](mailto:beatriz.maldonado@pucese.edu.ec)

Mgt. Karina Mendoza (Universidad UTE, Quito, Ecuador).

[karina.mendoza@ute.edu.ec](mailto:karina.mendoza@ute.edu.ec)

Mgt. Juan Segura (Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador).

[juansegura@uti.edu.ec](mailto:juansegura@uti.edu.ec)

Dr. Neris Ortega (Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador).

[nortega@umet.edu.ec](mailto:nortega@umet.edu.ec)

Dr. Elsa Albornoz (Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador).

[ealbornoz@umet.edu.ec](mailto:ealbornoz@umet.edu.ec)

Mgt. Evelyn Josefina Campos Reyes (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

[evelynjosefina@gmail.com](mailto:evelynjosefina@gmail.com)

Mgt. María Fernanda Romero Grimán (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

[mferromero@gmail.com](mailto:mferromero@gmail.com)

Mgt. Francis del Valle Rosas de Serge (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

[francisrosas1@hotmail.com](mailto:francisrosas1@hotmail.com)

Lcda. Noreiddy Moreno (Corporación Misión de María, Santiago de Chile, Chile).

[norimoreno@gmail.com](mailto:norimoreno@gmail.com)

Mgt. Eva del Carmen Ochoa Smith (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

[evaechoasmith@gmail.com](mailto:evaechoasmith@gmail.com)

Mgt. Martha Lopresti (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

[lopresti18@gmail.com](mailto:lopresti18@gmail.com)

Mgt. José Patricio Quintanilla Silva (Universidad Mayor Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile).

[quintanillasilva@gmail.com](mailto:quintanillasilva@gmail.com)

Dr. María Cristina Fossi (Centro Clínico de Especialidades, CELIES)

[dra.fossi.paz@hotmail.com](mailto:dra.fossi.paz@hotmail.com)

Dr. Carlos Fabián Márquez (Cámara de EPS de la Provincia del Oro, Ecuador)

[carlosmarquezgranja@yahoo.com](mailto:carlosmarquezgranja@yahoo.com)

Dr. Yelly Hurtado (Hospital de Figueres-Provincia de Girona-España)

[yellyhurtado@hotmail.com](mailto:yellyhurtado@hotmail.com)

## CONTENTS

- 5 Adrián Olivo, Juan Toledo , Modelo electromagnético para el estudio de fenómenos transitorios asociados a descargas atmosféricas sobre líneas de transmisión.
- 29 Alexander Caicedo, Anthony Caicedo, Red neuronal artificial para el reconocimiento de emociones humanas bajo un algoritmo de retropropagación.
- 35 Luis González, Algoritmos adaptativos: una revisión bibliográfica
- 41 Marlon Rojas, Olga Prado, Alejandro Zambrano, Octavio Carvajal, Modelo matemático basado en aprendizaje de máquina para la predisposición automática del flujo de cal y hrd en hornos eléctricos.
- 55 Marlon Rojas, Olga Prado, Alejandro Zambrano, Octavio Carvajal, Modelo matemático basado en aprendizaje de máquina para la predisposición automática del flujo de cal y hrd en hornos eléctricos

## EDITORIAL

*The world is experiencing a paradigm shift in various senses of life. In principle, health situations reached unexpected changes, from the social conception, to the labor, educational and economic transformation.*

*Scientific developments, research and academia in general have also undergone significant changes, but the most important thing is that all current experiences have revealed a need to improve processes, systems, and new professionals. Hence, an update on educational trends is necessary, with a view to a new industrial training, focused on integrated processes and products, on globalized users and social needs.*

*In this number of the Athenea Journal, in Engineering Sciences, some technological developments are shown that give rise to more extensive investigations, which will serve as a link for a technological future. In this way, it is evident that engineering reaches more and more multidisciplinary fields and more ambitious scenarios that transform new societies.*

***Dr. Franyelit Suárez***

***General editor.***

## Modelo electromagnético para el estudio de fenómenos transitorios asociados a descargas atmosféricas sobre líneas de transmisión

**Adrián Olivo**

<https://orcid.org/0000-0003-0676-7619>

[aolivo@unexpo.edu.ve](mailto:aolivo@unexpo.edu.ve)

Dpto. de Matemáticas. Dirección de Investigación y Postgrado, UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz Estado Bolívar, Venezuela.

**Juan Toledo**

<https://orcid.org/0000-0002-0327-3050>

[Toledo.juan@gmail.com](mailto:Toledo.juan@gmail.com)

CORPOELEC  
Edo. Bolívar, Venezuela

**Recibido (08/07/21), Aceptado (10/08/21)**

**Resumen:** Este trabajo tiene como propósito presentar un modelo conformado por una metodología basada en la Electromagnética computacional y el Análisis vectorial, desarrollado con la finalidad de aportar soluciones al problema del estudio de los transitorios electromagnéticos debidos a descargas atmosféricas o rayos sobre líneas de transmisión. La metodología consiste en la aplicación en conjunto del modelo electromagnético de las ecuaciones de Maxwell-Heaviside para describir la propagación de onda electromagnética generada por el rayo, el método de diferencia finita en el dominio del tiempo (FDTD) con condiciones de fronteras absorbentes de Liao (ABC-Liao) para obtener las magnitudes de los campos eléctricos y magnéticos irradiados; como también el acople del campo electromagnético con la línea por medio del modelo del conductor delgado (TWM) para así obtener las magnitudes de las subidas de tensión y corriente que se generan. En este sentido se implementa un código computacional en MATLAB basado en dicha metodología para simular ciertos casos relacionados con impactos directos e indirectos de rayos sobre torres y líneas de transmisión. Además, se estimó a través de comparaciones hechas con el modelo híbrido electromagnético (HEM) que la herramienta computacional creada es un recurso adecuado para el análisis de transitorios en sistemas de transmisión de energía eléctrica.

**Palabras Clave:** Descargas atmosféricas, Ecuaciones de Maxwell-Heaviside, FDTD, ABC-Liao, Thin-Wire Model, Líneas de transmisión.

## Electromagnetic model for the study of transitory phenomena associated with atmospheric discharges on transmission lines

**Abstract:** The analysis of a research work developed in the company C.V.G CARBONORCA of Venezuela is presented, which has two gas purification plants for the cooking area, designed to purify the gas that comes from the cooking ovens. Each plant is made up of solenoid valves, pneumatic valves, transmitters, process mimic panel and a supervisory system. All these elements are governed by a SIEMENS S5-115U PLC which is in a state of obsolescence, which is why the replacement of these automata by ALLEN BRADLEY ControlLogix automata was designed, in order to guarantee continuity in operations in plant. The research was done with a descriptive design of the field experimental type. A code for each gas treatment plant was obtained in RSLOGIX 5000 v17.00.00 and the update of the database of the supervisory system. The operation of the program was also verified through a simulation of the plant in a supervisory system, the deployment of which was designed for this purpose.

**Keywords:** Automation, Modernization, ControlLogix, Supervisory System, Mimic Panel



## I. INTRODUCCIÓN

Los investigadores del efecto electromagnético causado por rayos sobre líneas de transmisión coinciden que uno de los fenómenos que más afecta negativamente a los sistemas de distribución de energía son las subidas de tensión y corriente debidas a descargas atmosféricas que impactan de forma directa o indirecta sobre torres y líneas de transmisión aéreas. Este problema se ha tratado en diversos estudios que arrojan conclusiones generales como: 1. La etapa de la descarga de retorno es la que puede producir las magnitudes más altas en las subidas de tensión y corriente. 2. Se asume una distribución espacial y temporal de la corriente del rayo a lo largo del canal y 3. Se necesita plantear matemáticamente el mecanismo de acople del campo electromagnético producido por la descarga de retorno con la línea. Dentro de los estudios pioneros que destacan son los realizados por Uman, Mclain y Krider [1], Agrawal, Price & Gurbaxani [2], Nucci et. al. [3] y Thottappillil & Uman [4], que arrojan resultados relacionados con el cálculo del campo electromagnético irradiado por el rayo y comparaciones entre modelos de descarga y técnicas de acople del campo electromagnético con la línea, respectivamente. Estos representan una metodología simplificada para el estudio del fenómeno y limitada al modelo transversal eléctrico (MTE) y transversal magnético (MTM) de la onda, que son características propias de modelos de ingeniería y de línea de transmisión. Por lo tanto, se propone una metodología físico-matemática de onda completa MAXWELL-FDTD-TWM desarrollada por varios investigadores de la electromagnética computacional como Yee [5], Taflove & Hagness [6], Elsherbini & Demir [7], y otros que han aplicado esta metodología en el campo de la ingeniería como Silva [8], Noda & Yokoyama [9], Chamié Filho [10], Jiménez [11], entre otros. Con base a esto, se desarrollará un algoritmo computacional a través del cual se realizarán simulaciones relacionadas con los transitorios electromagnéticos generados por rayos sobre torres y líneas de transmisión de energía.

En consecuencia, este trabajo se divide en la forma siguiente: en la sección II: Formulación del modelo del canal de descarga del rayo, sección III: Discretización espacio-temporal de las ecuaciones de Maxwell-Heaviside, sección IV: Aplicación de ABC-Liao, sección V: Formulación TWM, VI: Flujograma para el cálculo de tensión y corriente, sección VII: Criterio de estabilidad FDTD-TWM, sección VIII: Simulaciones y Resultados, sección IX: Conclusiones y sección X: Referencias.

## II. FORMULACIÓN DEL MODELO DEL CANAL DE DESCARGA DEL RAYO

Dentro de los modelos existentes, sin considerar la geometría real tortuosa de una descarga atmosférica nube-tierra, se elige el modelo electromagnético, debido a que este ofrece una aproximación más real a las mediciones experimentales sobre el campo electromagnético asociado a una descarga atmosférica, Visacro [12], Herrera [13], McAfee [14] y otros. Este modelo está basado en una aproximación del canal de descarga a partir de una antena finita con pérdidas, considerando el canal recto y vertical por el cual circula la corriente de retorno  $I_z$ , como lo muestra la figura 1.

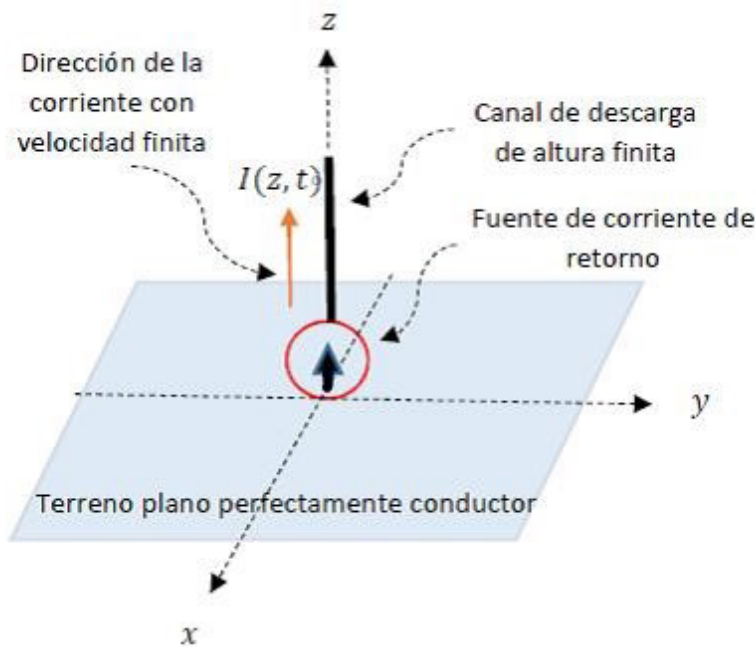


Fig. 1. Modelo físico de la descarga de retorno (Adaptado de [14])

Cuando el rayo impacta en cierto lugar donde se ubica una estructura metálica, las ondas electromagnéticas se propagan en muy breves instantes de tiempo induciendo campos de fuerza eléctrica y magnética muy intensos que impregnan a toda la región espacial que envuelve la estructura, entonces se hace necesario conocer cómo se alteró la región utilizando el modelo matemático de las ecuaciones de Maxwell-Heaviside, las cuales describen la propagación de los campos en el espacio y tiempo.

#### A. Ecuaciones de Maxwell-Heaviside

Las ecuaciones de Maxwell-Heaviside en el dominio del tiempo, en un medio isotrópico y no dispersivo y con pérdidas, establecen que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - (\sigma_m \vec{H} + \vec{M}_{fuente}) \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma_e \vec{E} + \vec{J}_{fuente} \quad (2)$$

Donde

$\vec{E}$ : Intensidad de campo eléctrico, [A]

$\vec{H}$ : Intensidad de campo magnético, [A/m]

$\vec{J}$ : Densidad de corriente eléctrica, [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{M}$ : Densidad de corriente magnética, [V/m<sup>2</sup>]

$\varepsilon = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ : Permitividad eléctrica

$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ : Permeabilidad magnética

$\sigma_e$ : Conductividad eléctrica, [S/m]

$\sigma_m$ : Conductividad magnética, [ $\Omega/\text{m}$ ]

En las ecuaciones (1) y (2) se expanden los rotacionales de los campos eléctricos y magnéticos, e igualando respectivamente cada componente vectorial se obtiene un sistema de 3 ecuaciones diferenciales parciales (EDP) escalares para el campo eléctrico y otras 3 para el campo magnético respectivamente.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma_m \vec{H} - \vec{M}_f \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_m H_x - \vec{M}_x^f \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma_m H_y - \vec{M}_y^f \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma_m H_z - \vec{M}_z^f \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma_e \vec{E} + \vec{J}_f \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_e^x E_x - \vec{J}_x^f \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_e^y E_y - \vec{J}_y^f \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_e^z E_z - \vec{J}_z^f \right) \end{cases} \quad (4)$$

### III. DISCRETIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE ECUACIONES

Los sistemas de EDP, (3) y (4) no poseen solución exacta o analítica, por lo tanto es indispensable hallar soluciones numéricas que aproximen los cálculos a resultados más realistas, esto se logra transformando el dominio continuo del sistema EDP en un dominio discreto a través de la celda de Yee.

Yee, introduce la notación para un punto o nodo espacial de una celda cúbica y una función evaluada en ese punto discreto en un instante dado.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$$

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{(i,j,k)}^n$$

Luego se aproximan las derivadas parciales en el espacio y tiempo que aparecen en las ecuaciones (3) y (4) utilizando diferencias finitas centrales de segundo orden:

$$\frac{\partial u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)}{\partial x} \cong \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x}$$



$$\frac{\partial u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)}{\partial t} \cong \frac{u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t}$$

Los campos eléctricos se calculan en posiciones enteras del espacio ( $n\Delta x$ ), mientras que los campos magnéticos en posiciones intermedias ( $n\Delta x/2$ ). Adicionalmente el campo magnético se calcula en instantes medios de tiempo  $\frac{1}{2}\Delta t, \frac{3}{2}\Delta t, \dots, (n+\frac{1}{2})\Delta t$ , mientras que el campo eléctrico lo hace en instantes enteros  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t$ .

El algoritmo de Yee a través del método FDTD divide una región del espacio en una grilla espacial, llamada celda de Yee, en la cual los campos eléctrico y magnético se ubican en posiciones discretas, como lo ilustra la figura 2.

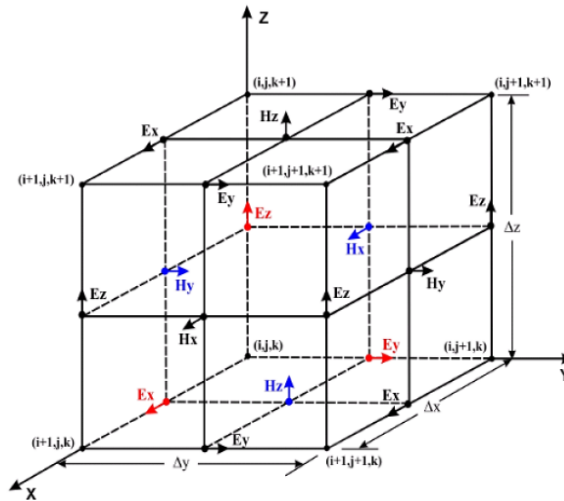


Fig. 2. Celda de Yee en coordenadas rectangulares

Partiendo del conjunto de ecuaciones (3), se hace  $\vec{M}_f = 0$  y  $\sigma_m = 0$ , debido a que la onda electromagnética generada por el rayo se propaga en el espacio libre. Aplicando diferencias finitas centrales en los puntos de la cara de la celda de Yee correspondiente, se obtiene la discretización en diferencias de las componentes del campo magnético y se despeja los términos:  $H_x^{n+\frac{1}{2}}, H_y^{n+\frac{1}{2}}, H_z^{n+\frac{1}{2}}$  que permiten calcular el avance del campo magnético en el espacio y el tiempo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ &= H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \\ &= H_x^{n-\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \\ &+ C_h \left[ \frac{E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta z} \right. \\ &\quad \left. - \frac{E_z^n \left( i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ &= H_y^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ &= H_y^{n-\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ &+ C_h \left[ \frac{E_z^n \left( i + 1, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta x} - \frac{E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k + 1 \right) - E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta z} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \\ &= H_z^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \\ &= H_z^{n-\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \\ &+ C_h \left[ \frac{E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta y} \right. \\ &\quad \left. - \frac{E_y^n \left( i + 1, j + \frac{1}{2}, k \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta x} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Con: } C_h = \frac{\Delta t}{\mu}$$

Considerando el conjunto de ecuaciones (4), aplicando diferencias finitas centrales en los puntos de la cara de la celda de Yee correspondiente, se obtiene la discretización en diferencia finita de las componentes del campo eléctrico y se despejan los términos:  $E_x^{n+1}, E_y^{n+1}, E_z^{n+1}$  respectivamente.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_e E_x - \vec{J}_x \right)$$

$$\text{Con: } \sigma_e E_x = \sigma_e \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \left( \frac{E_x^{n+1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) + E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) &= C_{ee} E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) + C_e \vec{J}_x^f \\
&+ C_e \left[ \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta y} \right. \\
&\quad \left. - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right)}{\Delta z} \right]
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_e E_y - \vec{J}_y^f \right)$$

$$\text{Con: } \sigma_e E_y = \sigma_e \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \left( \frac{E_y^{n+1} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) + E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1} \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) &= C_{ee} E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) + C_e \vec{J}_y^f \\
&+ C_e \left[ \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2} \right)}{\Delta z} \right. \\
&\quad \left. - \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+\frac{1}{2}} \left( i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta x} \right]
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_e E_z - \vec{J}_z^f \right)$$

$$\text{Con: } \sigma_e \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \left( \frac{E_z^{n+1} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) + E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) &= C_{ee} E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) + C_e \vec{J}_z^f \\
&+ C_e \left[ \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left( i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta x} \right. \\
&\left. - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} \right] \quad (10)
\end{aligned}$$

$$\text{Con: } C_{ee} = \frac{2\varepsilon - \sigma_e \Delta t}{2\varepsilon + \sigma_e \Delta t} \quad C_e = \frac{2\Delta t}{2\varepsilon + \sigma_e \Delta t}$$

#### IV. APLICACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA ABSORBENTES DE LIAO

El método FDTD proporciona soluciones en un dominio de simulación ilimitado, para limitar la región de simulación se hace necesario introducir condiciones de fronteras absorbentes (ABC) que acotan la región, además de evitar reflexiones espurias de las ondas que contaminen el cálculo de los campos.

El fin de aplicar una ABC consiste en envolver el contorno del dominio del problema con un medio sin reflexiones, de tal manera que se busca:

$$\vec{U}_{\text{incidente}} = \vec{U}_{\text{transmitido}} \quad \vec{U}_{\text{reflejado}} = 0$$

Para ello, se aplica la ABC-Liao, ya que se ha demostrado que es la que mejor resultados aporta a un menor costo computacional. Dado un punto en la frontera (NDX, t) del dominio. Es importante conocer el valor del campo desconocido en la frontera  $u(\text{NDX}+1, t+1)$  del dominio de simulación, a través de valores anteriores del mismo, como lo ilustra la figura 3, con la ecuación:

$$\begin{aligned}
&u(\text{NDX} + 1, t + 1) \\
&= A_0 u(\text{NDX}, t) + A_1 u(\text{NDX} - 1, t - 1) \\
&+ A_2 u(\text{NDX} - 2, t - 2) + \dots \\
&+ A_n u(\text{NDX} - n, t - n) u(\text{NDX} + 1, t + 1) \\
&= A_0 u(\text{NDX}, t) + A_1 u(\text{NDX} - 1, t - 1) \\
&+ A_2 u(\text{NDX} - 2, t - 2) + \dots + A_n u(\text{NDX} - n, t - n)
\end{aligned}$$

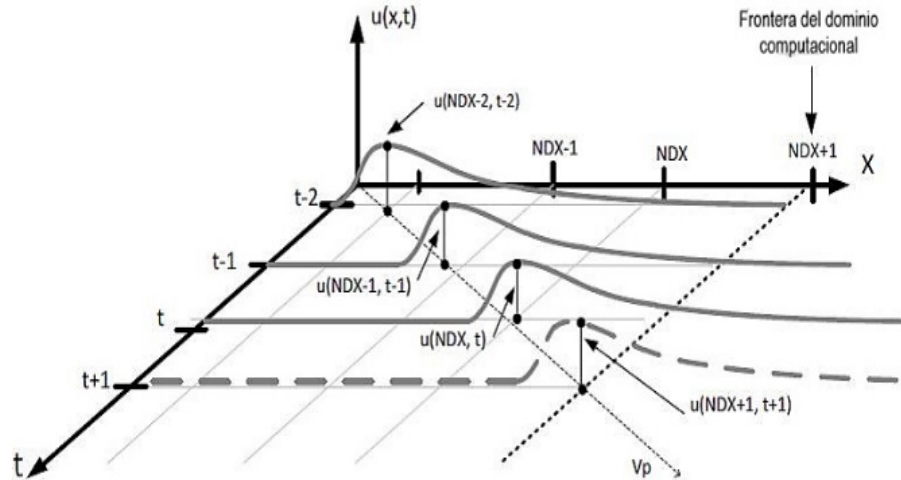


Fig. 3. Onda unidimensional  $u(x,t)$  propagándose a una velocidad constante  $V_p$ . (Adaptada de Jiménez [11])

Utilizando la expresión anterior y aplicando la fórmula del coeficiente binomial de Newton para determinar los coeficientes  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$  se obtiene:

$$u(NDX + 1, t + 1) = 2u(NDX, t) - 1u(NDX - 1, t - 1)$$

(ABC-Liao de segundo orden)

#### V.FORMULACIÓN DEL MODELO DEL CONDUCTOR DELGADO (TWM)

El modelo de conductor delgado consiste en el cálculo tanto de los campos electromagnéticos como de corrientes y tensiones por medio de un método numérico como el FDTD. En este sentido, un conductor delgado es definido como un hilo cuyo radio es menor que el tamaño de la celda de simulación modelada. En este método, los campos eléctricos a lo largo de la línea son llevados a cero y los parámetros de permitividad ( $\epsilon$ ) y permeabilidad ( $\mu$ ) alrededor del conductor, se van actualizando de manera diferente que el resto del espacio de simulación, como se ilustra en la figura 4.

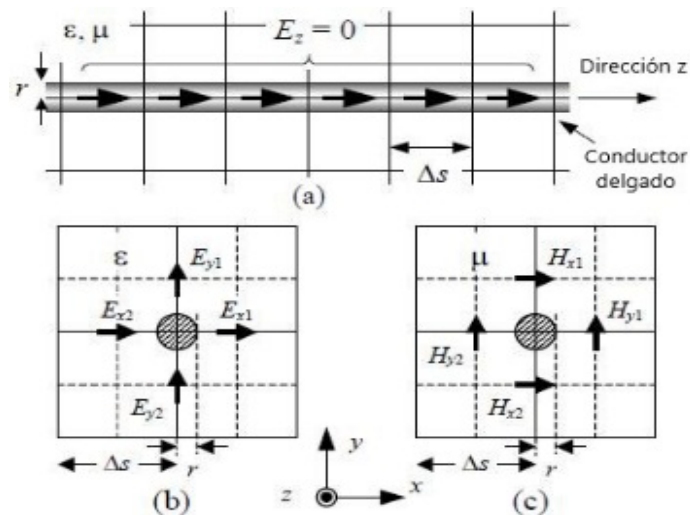


Fig. 4. Configuración de conductores a través de TWM

Se introduce para ello, un radio intrínseco  $r_0$ , para el cual la distribución del campo eléctrico y magnético alrededor del conductor de radio  $r_0$  es igual a la de un conductor real de radio  $r$  a través de la capacitancia de estos, obteniéndose cierta constante  $m$  que es el factor utilizado para actualizar los valores de los campos eléctricos y magnéticos mediante los nuevos parámetros eléctricos del conductor, como lo muestra la figura 5.

$$C_{r_0} = \frac{2\pi m \varepsilon}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r_0}\right)} \quad C_r = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r}\right)} \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r}\right)} = \frac{2\pi m \varepsilon}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r_0}\right)} \quad m = \frac{1,471}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r}\right)}$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon \frac{\ln\left(\frac{1}{0.23}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r_0}\right)} \quad \mu_m = \mu \frac{\ln\left(\frac{\Delta s}{r_0}\right)}{\ln\left(\frac{1}{0.23}\right)} \quad \sigma_m = \sigma \frac{\ln\left(\frac{1}{0.23}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r_0}\right)}$$

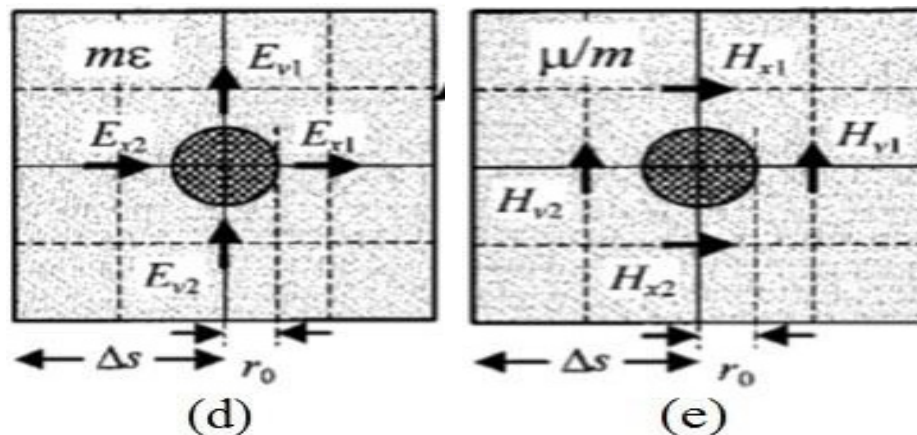


Fig. 5. Reconfiguración del campo electromagnético en torno al conductor delgado

#### A. Ecuaciones del Modelo del Conductor Delgado

Al emplear el teorema de Stokes en electromagnetismo se obtienen la Ley de Faraday y Amper en su forma integral:

$$\oint_c \vec{F} \cdot d\vec{r} = \iint_s \vec{\nabla} \times \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (\text{Teorema de Stokes})$$

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \iint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (\text{Ley de Faraday})$$

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \iint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} + \iint_s \vec{\sigma} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (\text{Ley de Ampère})$$

Al aplicar la ley de Faraday sobre el contorno que encierra el área adyacente al conductor delgado, cuyo centro coincide con la circunvalación de una espira amperiana de las componentes del campo magnético, como lo señala la figura 6.

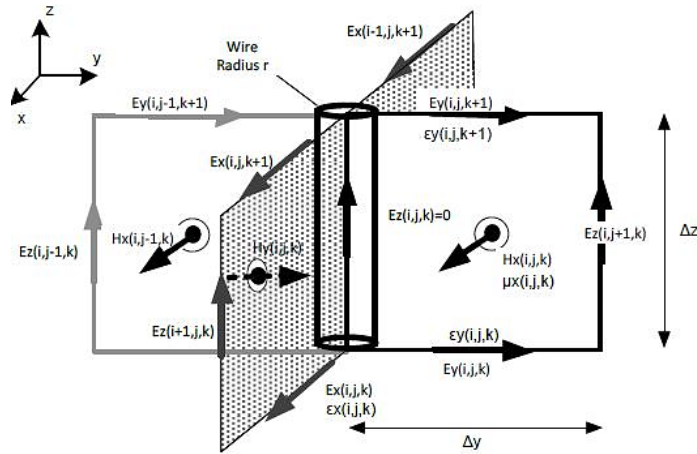


Fig. 6. Configuración del conductor delgado para la ley de Faraday (Adaptada de Jiménez [11])

Se obtienen las componentes del campo magnético en función de los nuevos parámetros eléctricos actualizados:

$$Hx_{(i,j,k)}^{n+\frac{1}{2}} = Hx_{(i,j,k)}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [Ey_{(i,j,k)}^n - Ey_{(i,j,k+1)}^n] + \frac{2\Delta t}{\mu \Delta y \ln\left(\frac{\Delta y}{r_0}\right)} Ez_{(i,j+1,k)}^n$$

$$Hy_{(i,j,k)}^{n+\frac{1}{2}} = Hy_{(i,j,k)}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [Ex_{(i,j,k)}^n - Ex_{(i,j,k+1)}^n] + \frac{2\Delta t}{\mu \Delta x \ln\left(\frac{\Delta x}{r_0}\right)} Ez_{(i+1,j,k)}^n$$

### B. Cálculo de Tensión y Corriente en el Sistema

El cálculo de tensión y corriente en una determinada región de simulación requiere de la integración de los campos eléctricos y magnéticos en los puntos de interés. En un espacio discretizado, las integraciones son sustituidas por sumatorias conforme a las siguientes ecuaciones, según el sentido de integración.

$$V = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \rightarrow V = -\Delta s \cdot \sum_a^b \vec{E}$$

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \rightarrow I = \Delta s \cdot [Hy_1 + Hx_1 - Hy_2 + Hx_2]$$

El cálculo de tensión y corriente se realiza a través de una línea de transmisión virtual acoplada mediante la técnica FDTD-TWM

## VI.FLUJOGRAMA DEL ALGORITMO FDTD-TWM

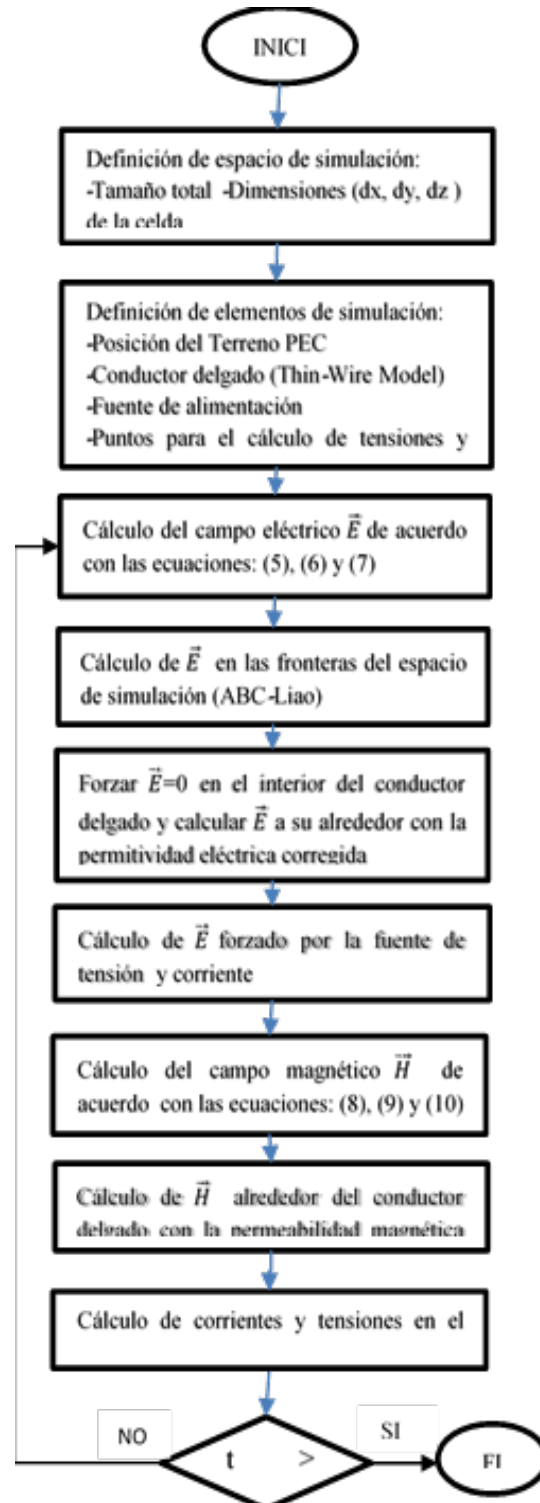


Fig. 7. Flujoograma del algoritmo

$$t = \left(n + \frac{1}{2}\right) \Delta t$$



## VII. CRITERIO DE ESTABILIDAD

Para tener resultados significativos (precisos y estables), la dimensión de la celda deberá ser una fracción de la longitud de onda  $\lambda$ . Se recomienda en general un mallado con un paso menor  $\frac{\lambda}{10}$ . Para asegurar la estabilidad del algoritmo,  $\Delta t$  se obtiene aplicando el criterio de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), que establece la condición:  $\frac{c \cdot \Delta t}{L} < 1$ . Siendo:

C: La velocidad de la onda en el medio.

L: Longitud de la celda.

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo.

El criterio de estabilidad CFL generalizado para tres dimensiones es:

$$\Delta t \leq C_f * \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}}$$

El factor  $C_f$ , llamado factor Courant, se utiliza para mantener razonable la cuantización del error.

## VIII. SIMULACIONES Y RESULTADOS

### Caso 1: Conductor horizontal (Línea aérea)

De Noda y Yokoyama [10], en la figura se observa un conductor de radio 1.5 cm y longitud 4 m sobre una placa de cobre de 10 cm de grosor, a una altura de 50 cm. El conductor horizontal es alimentado por un generador de pulsos con una resistencia interna de  $50 \Omega$ , que es conectado con el conductor horizontal mediante un conductor vertical de radio 10 mm, como lo muestra la figura 8.

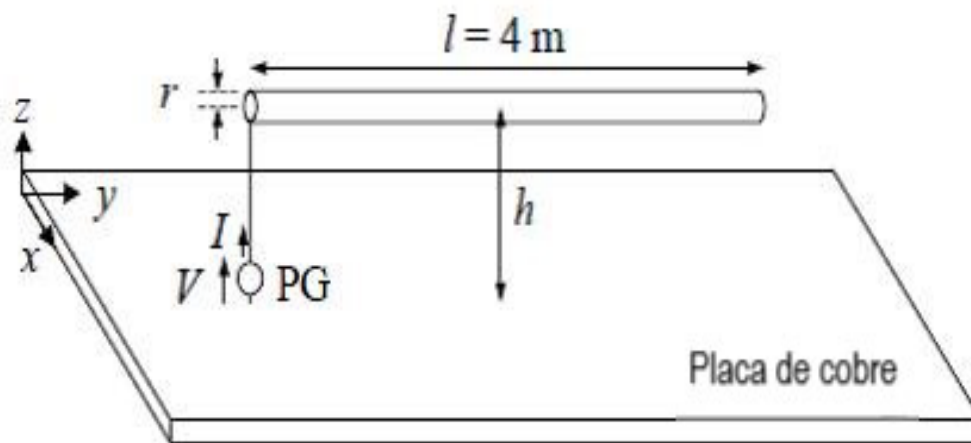


Fig. 8. Arreglo de conductor horizontal (Adaptado de Noda y Yokoyama [9])

### Parámetros de simulación

**Espacio de simulación**  $2m \times 6m \times 2m$

**Tiempo de simulación**

Tensión en el conductor:  $t \cong 65 \text{ s}$

Corriente en la fuente:  $t \cong 67 \text{ s}$

**Tamaño de celda**

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta s = 0.05m$$

Función de tensión:

$$v_s(t) = \begin{cases} \frac{v_p}{\tau_f} t + b; & \text{si } 0 \leq t \leq \tau_f \\ V_p; & \text{si } t > \tau_f \end{cases}$$

**Onda de tensión aplicada al sistema**

Amplitud:  $V_p = 60 \text{ V}$

$$b = V_p - V_p \left[ \frac{\tau_f + \tau_i}{\tau_f} \right]$$

Tiempo de frente:  $\tau_f = 10 \times 10^{-9} \text{ s}$

Tiempo de inicio:  $\tau_i = 1 \times 10^{-9} \text{ s}$

Resistencia de Fuente:  $R_s = 50 \Omega$

**ABC aplicada**

Frontera de Liao de segundo orden

A continuación, en las figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas sobre el experimento

### IX. CONCLUSIONES

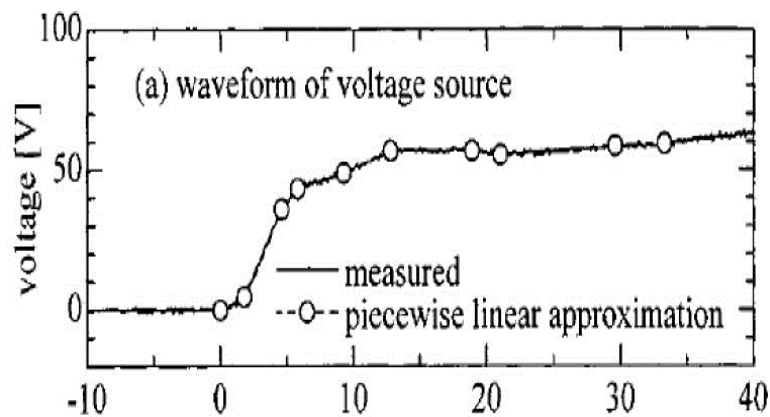


Fig. 9. Pulso de tensión de entrada medido por Noda y Yokoyama [9]



Fig. 10. Tensión aproximada al pulso experimental obtenida por el autor

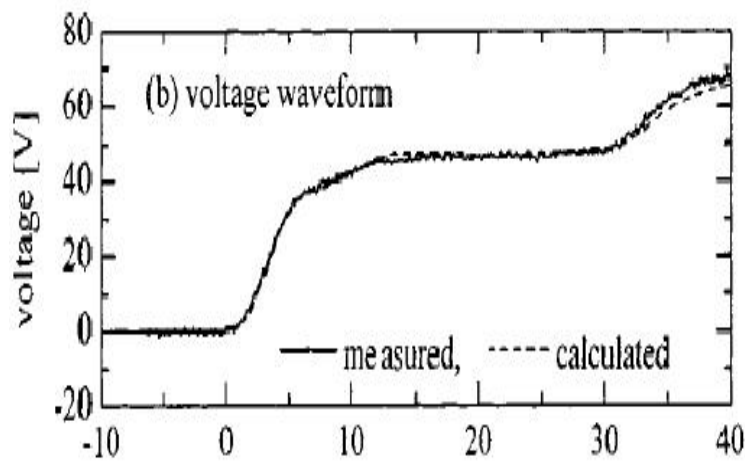


Figura 11. Tensión al final de la línea medida por Noda y Yokoyama [9]



Fig. 12. Tensión al inicio y final de la línea obtenida por el autor

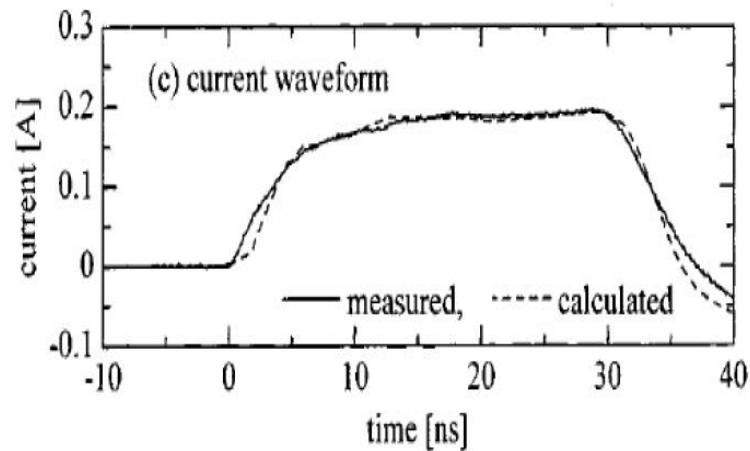


Fig. 13. Corriente en la línea medida por Noda y Yokoyama [9]

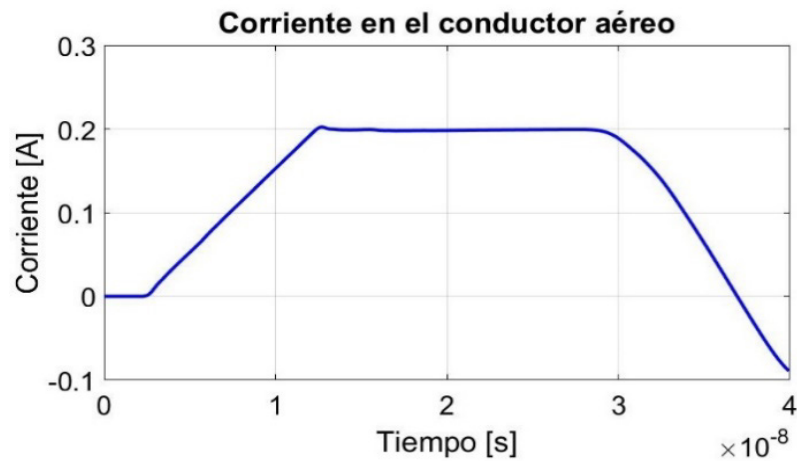


Fig. 14. Corriente en la línea obtenida por el autor

#### A. Estabilidad e Inestabilidad Numérica en FDTD-TWM

Aplicando la condición CFL al resultado anterior, para un factor courant:  $C_f=1,00025$  la solución comienza a divergir para un  $\Delta t \geq 35$  ns, de tal manera que cumple con tal criterio lo que evidencia el buen desempeño del algoritmo implementado en FDTD, como lo señala la figura 15.

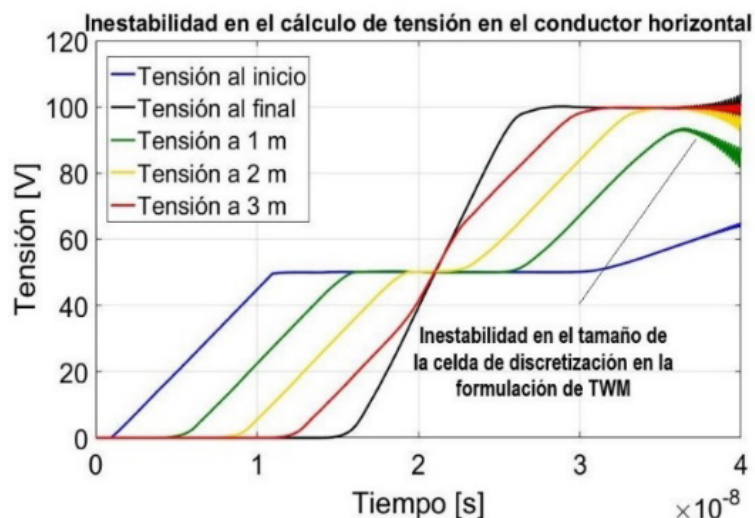


Fig. 15. Inestabilidad en el cálculo a través de FDTD-TWM

### Caso II: Torre y Líneas de Transmisión

Modelo de torre de transmisión sugerido por Silva [8] extraído de Thang et. al. [4]. En el sistema se considera tres torres de 36 m separadas 25 m. Las tres fases son de radio  $r=4\text{mm}$ , posicionadas a una distancia de 3 m de las torres a una altura de 34.5 m, 31.5 m y 28.5 m, como lo señala la figura 16.

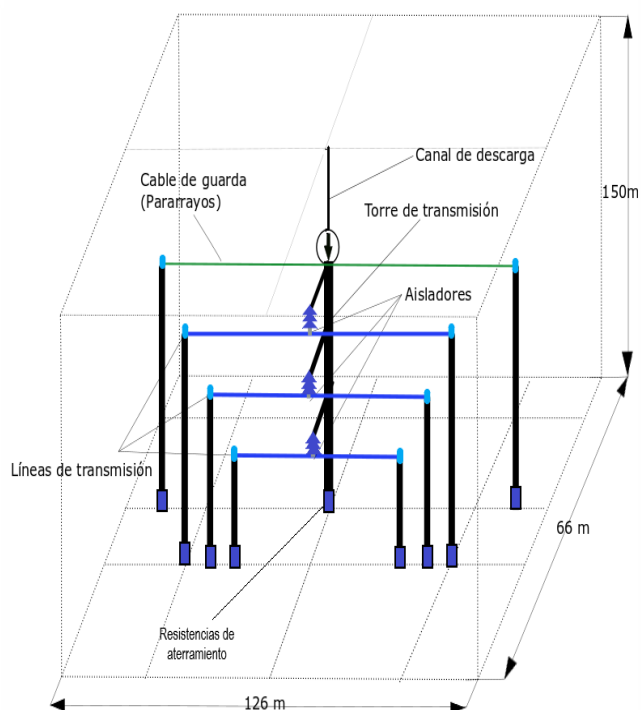


Fig. 16. Sistema de torres adyacentes

## Parámetros de la simulación

### Espacio de simulación

### Tamaño de celda

66m x 126m x 150m

### Tiempo de simulación

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta s = 1 \text{ m}$$

Corriente en el sistema: 22 min

Tensión en aislador: 54,55 min

Tensión en línea de fase: 22 min

Tensión en torre: 56,7 min

Función corriente de retorno: Doble rampa

### Corriente de descarga inyectada al sistema

$$i_z(t) = \begin{cases} \frac{I_p}{\tau_f t}; & \text{si } 0 \leq t \leq \tau_f \\ I_p \left[ 1 - \frac{(t - \tau_f)}{2\tau_m} \right]; & \text{si } t > \tau_f \end{cases}$$

Amplitud:  $I_p = 1000 \text{ A}$

Tiempo de frente:  $\tau_f = 1 \mu\text{s}$

Tiempo medio:  $\tau_m = 50 \mu\text{s}$

Resistencia de Fuente:  $R_s = 1 \times 10^{12} \Omega$

### Resistencias de aterramiento

De torre =  $20 \Omega$

De conductor de fase =  $530 \Omega$

De pararrayos =  $543,37 \Omega$

### ABC aplicada

Frontera de Liao de segundo orden

En las figuras 17 a la 21 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas sobre el caso. Se presentan unas comparaciones entre FDTD y el Modelo Híbrido Electromagnético (HEM) de Visacro y Soares [10], considerado más realista, debido a que utiliza técnicas analíticas considerando la tortuosidad del canal del rayo.

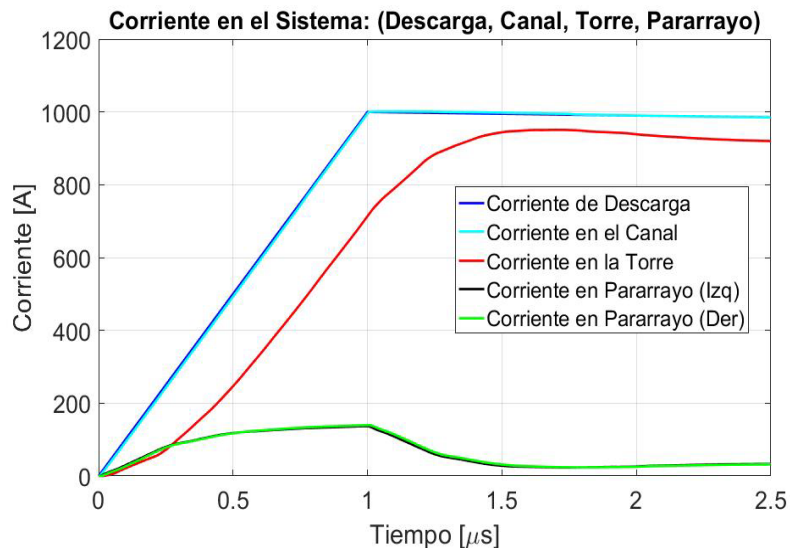


Fig. 17. Corriente en el sistema: Descarga, Canal, Torre y Pararrayos

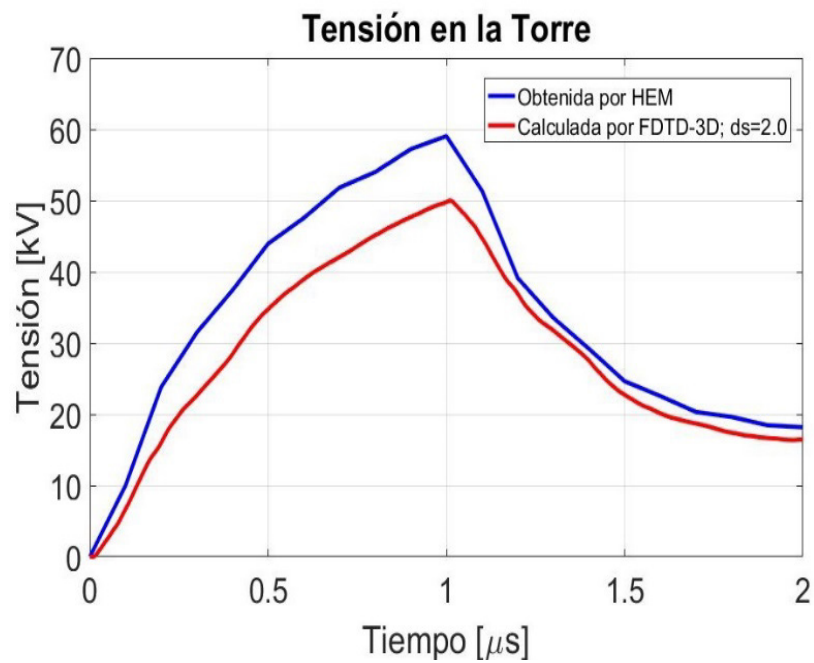


Fig. 18. Tensión en la torre central a  $\Delta s=2m$

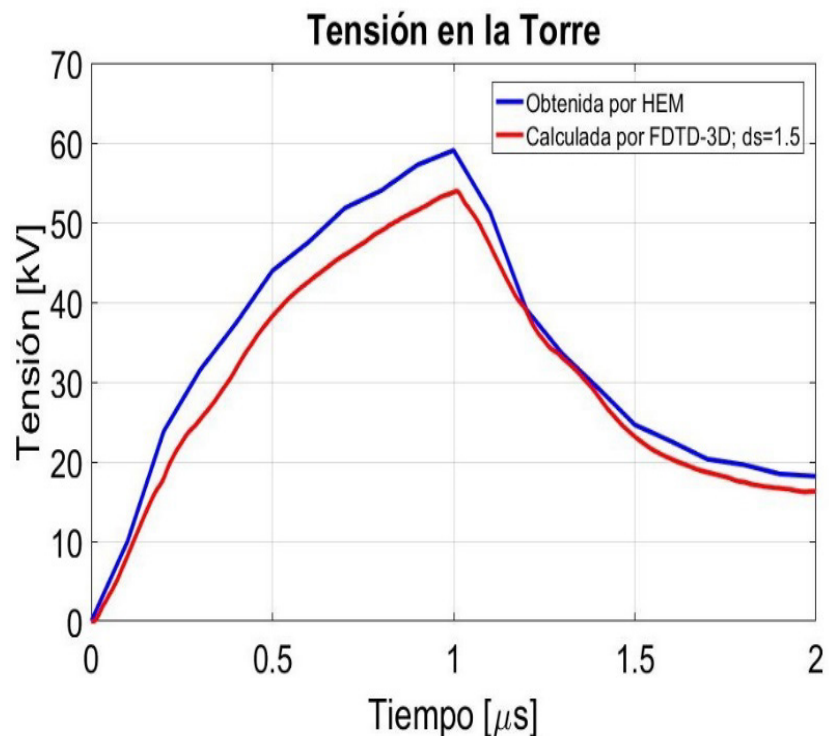


Fig. 19. Tensión en la torre central a  $\Delta s=1.5\text{m}$

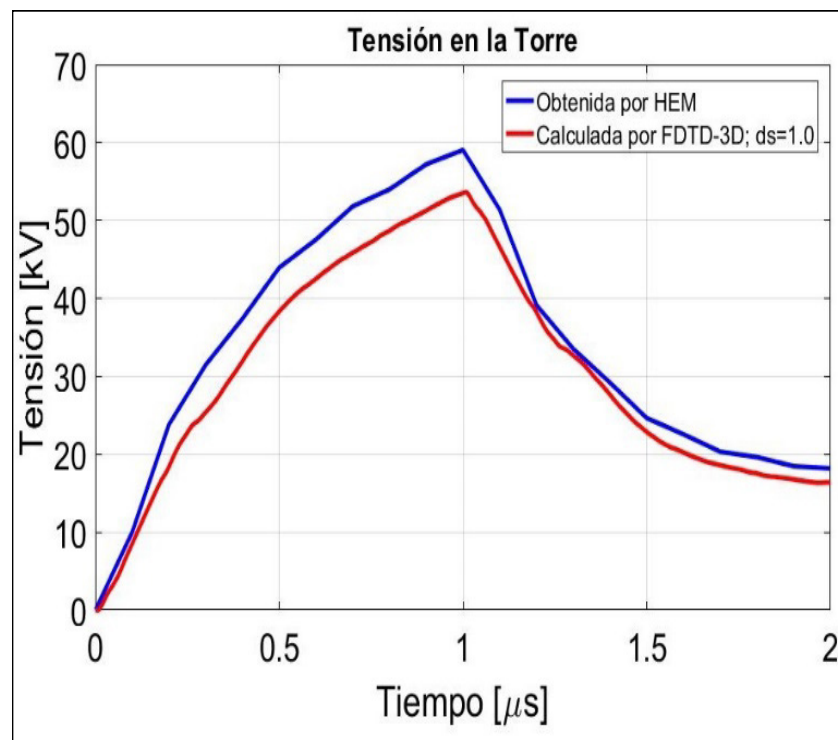


Fig. 20. Tensión en la torre central a  $\Delta s=1\text{m}$



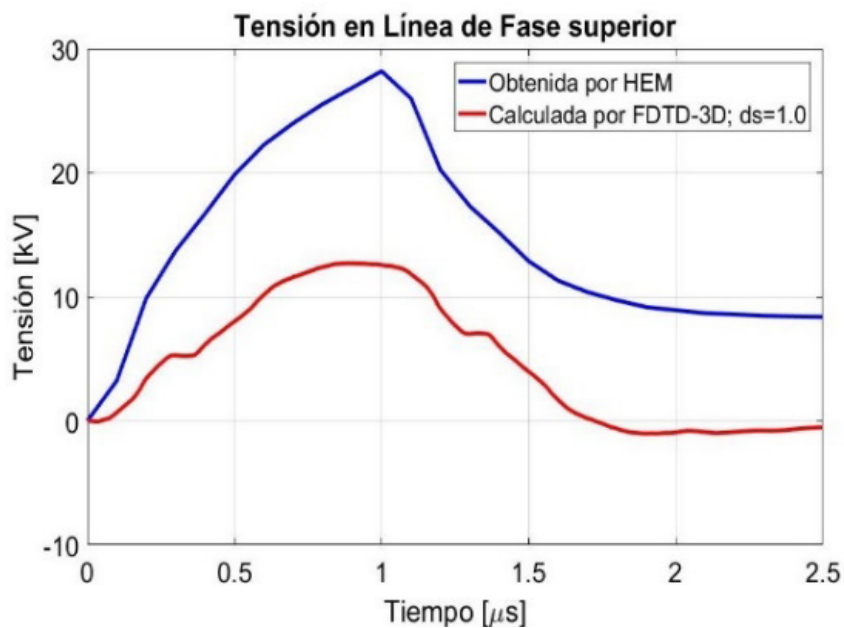


Fig. 21. Tensión en línea de fase a  $\Delta s=1m$

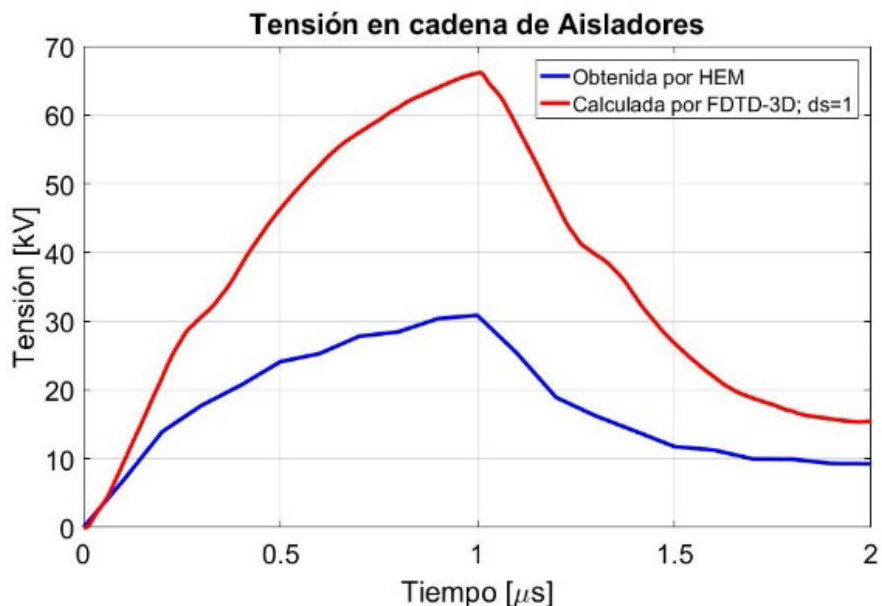


Fig. 22. Tensión en aislador a  $\Delta s=1m$

### Caso III: Tensiones inducidas en líneas de transmisión

Se estudia un modelo de tensión inducida sobre una línea de transmisión urbana presentado por Chamié Filho et. al. [10], estos sugieren la metodología definida por FDTD, ABC-UPML, Thin-Wire Model y procesos de computación paralela.

### Parámetros de la simulación

<b>Espacio de simulación</b>	840m x 150m x 320m
<b>Tamaño de celda uniforme</b>	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta s = 2m$
<b>Tiempo de simulación</b>	1 hora
	<b>Función corriente de retorno:</b>
	<b>Doble rampa</b>
<b>Corriente de descarga inyectada a la torre cilíndrica</b>	$i_z(t) = \begin{cases} \frac{I_p}{\tau_f} t; & \text{si } 0 \leq t \leq \tau_f \\ I_p \left[ 1 - \frac{(t - \tau_f)}{2\tau_m} \right]; & \text{si } t > \tau_f \end{cases}$
	Amplitud: $I_p = 1000 A$
	Tiempo: $\tau_f = 1\mu s$ y $\tau_m = 50\mu s$
<b>Resistencias</b>	De Fuente: $R_s = 1 \times 10^{12} \Omega$
	De línea neutro = $80 \Omega$
<b>ABC aplicada</b>	Frontera de Liao de segundo orden

En las figuras 23 y 24 se muestra el resultado de la simulación sobre el caso en estudio

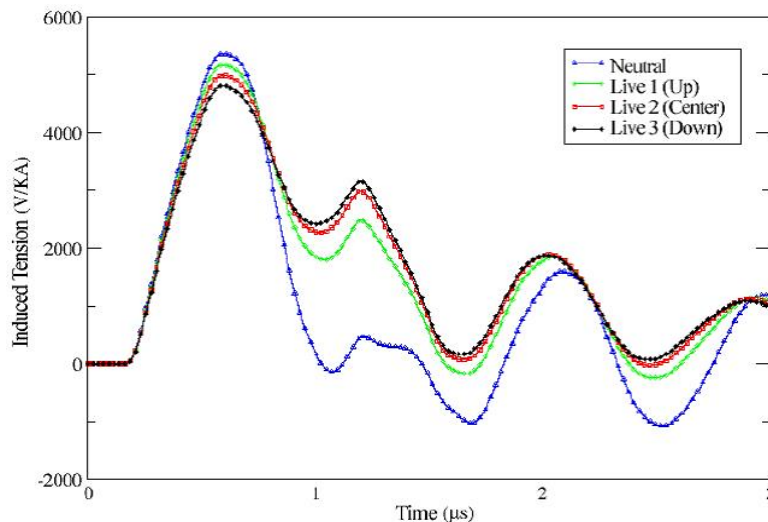


Fig. 23. Tensiones inducidas por torre cilíndrica sobre líneas de transmisión urbanas obtenida por Chamié Filho et. al. [10]

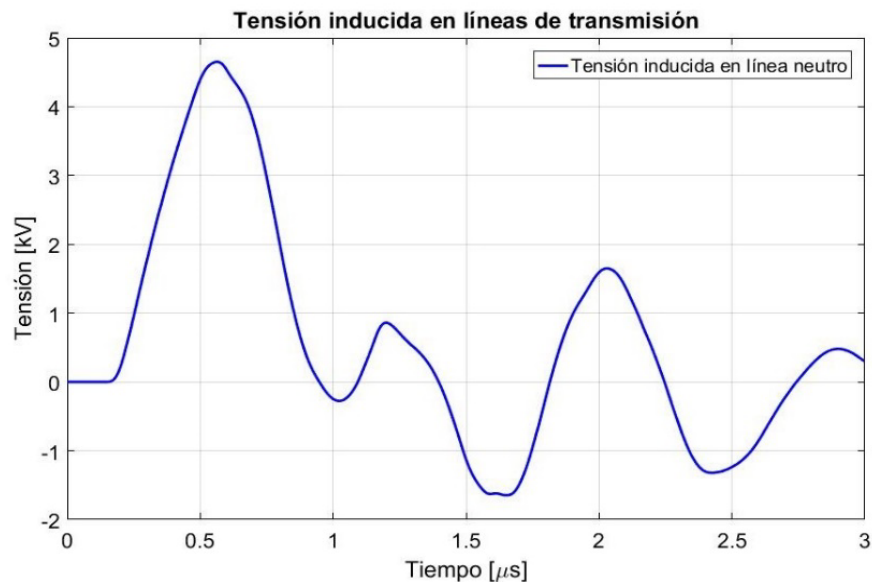


Fig. 24. Tensión inducida por torre cilíndrica sobre línea neutro, obtenida por el autor

La figura anterior señala la tensión inducida sobre la línea neutro, que en comparación con los resultados dados por Chamié Filho et. al. [10] son muy próximos a estos, lo cual evidencia que también esta metodología es aplicable para el caso de tensiones inducidas.

Nota: Todas las simulaciones fueron realizadas con el software MATLAB en un PC con procesador AMD APU-A10 3.5 GHz 4 núcleos, 8GB de RAM en Windows 10 64 bit.

## X.CONCLUSIONES

La metodología empleada en conjunto por FDTD, ABC-Liao y Thin-Wire Model, resultó eficiente para el estudio de subidas de tensión y corrientes asociadas a descargas atmosféricas sobre líneas de transmisión; pero a un costo computacional considerable en memoria RAM para simulaciones de dominios volumétricos computacionales muy grandes. Las comparaciones y validaciones hechas con resultados presentes en artículos como los dados por Noda y Yokoyama [9], Chamié Filho et. al. [10], Jiménez [11] y Silva [8], fueron útiles para la

validación del código desarrollado en MATLAB, dejando una clara aplicabilidad de la herramienta para el cálculo de sobretensiones de origen atmosférico. Así mismo, el estudio de convergencia entre FDTD y HEM mostró en términos generales buena concordancia, sobre todo en la forma de la onda y las magnitudes obtenidas en el tiempo de subida y bajada de la misma; pero no así en los valores máximos alcanzados para un tiempo de frente de  $1\mu\text{s}$  donde ocurrieron las divergencias más notables, debido a que no se pudo refinar a un tamaño menor de  $1\text{m}$  la longitud de la celda; ya que requeriría más recursos en memoria de sistema no disponibles. Por otra parte, la ventaja práctica de utilizar esta metodología, radica en que cualquier interesado en el tema puede analizar problemas de transitorios electromagnéticos en un PC de medianos recursos, desde su hogar, sin la necesidad de utilizar grandes laboratorios de electromagnética computacional ubicados en centros universitarios o empresas.

## REFERENCIAS

- [1] M. Uman, D. McLain and P. Krider. "The Electromagnetic Radiation from a finite antenna" *AJP*, vol. 43, 1975. 1975.
- [2] A. Agrawal, H. Price and S. Gurbaxani. "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a no uniform electromagnetic field". *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, (2), 119-129. 1980.
- [3] C. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz and C. Mazzetti. "Comparison of two coupling models for lightning-induced overvoltage calculations". *IEEE Transactions on power delivery*, 10(1), 330-339. 1995.
- [4] R. Thottappillil and M. Uman. "Comparison of lightning return stroke models". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D12), 22903-22914. 1993.
- [5] K. Yee. "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307, May 1966. 1966.
- [6] A. Taflove and S. Hagness. "Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method". Boston-London: 2005.
- [7] A. Elsherbeni and V. Demir. "The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MATLAB simulations". The Institution of Engineering and Technology. 2016.
- [8] V. Silva. "Aplicação do método FDTD para avaliação da resposta de linhas de transmissão e aterramentos elétricos frente a descargas atmosféricas". Dissertação de Mestrado, Universidade federal de minas gerais. Belo Horizonte, Brasil. 2017.
- [9] T. Noda and S. Yokoyama. "Thin wire representation in finite difference time domain surge simulation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(3), 840-847. 2002.
- [10] R. Chamié-Filho. Análise de tensões induzidas em linhas de distribuição de baixa tensão frente a uma descarga atmosférica. 2009.
- [11] R. Jiménez. "Lightning Induced Voltages on Overhead Lines above Non-Uniform and Non-Homogeneous Ground" Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. 2014.
- [12] S. Visacro and A. Soares. "HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems". *IEEE Transactions on power delivery*, 20(2), 1206-1208. 2005.
- [13] J. Herrera. "Nuevas aproximaciones en el cálculo de tensiones inducidas por descargas eléctricas atmosféricas". Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 128 . 2006.
- [14] C. McAfee. "Lightning return stroke electromagnetics-time domain evaluation and application" Doctoral dissertation. 2016.
- [15] S. Gedney. "Introduction to the finite-difference time-domain (FDTD) method for electromagnetics". *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, 6(1), 1-250. 2011.
- [16] Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka and A. Ametani. "An improved thin wire representation for FDTD computations". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(10), 3248-3252. 2008.
- [17] E. Soto. "Cálculo de campo electromagnético producido por rayo para terreno no plano y su efecto en las tensiones inducidas en líneas de distribución". Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. 2010.
- [18] D. Sullivan. "Electromagnetic simulation using the FDTD method". John Wiley & Sons. 2013

## Red neuronal artificial para el reconocimiento de emociones humanas bajo un algoritmo de retropropagación

**Alexander Caicedo**

<https://orcid.org/0000-0001-8729-5793>  
alex.caicedoalcivar@gmail.com  
Banco General Rumiñahui  
Quito, Ecuador.

**Anthony Caicedo**

<https://orcid.org/0000-0001-7550-4754>  
anthony.caicedo@pucese.edu.ec  
Public Promueve  
Quito, Ecuador

Recibido (10/07/21), Aceptado (15/08/21)

**Resumen:** La era de la revolución tecnológica impulsa cada vez más el desarrollo de tecnologías que facilitan de una u otra manera actividades de la cotidianidad de las personas, generando así un gran avance en el procesamiento de información. Este trabajo tiene como finalidad implementar una red neuronal que permita clasificar los estados emocionales de una persona partiendo de las distintas gestualidades humanas. Se utiliza una base de datos con información de estudiantes de la escuela de Ingeniería en Sistemas y Computación de la PUCE-E. Dicha información son imágenes que expresan las gestualidades de los alumnos y con las cuales se lleva a cabo el análisis comparativo con los datos de entrada. El entorno en el cual converge este trabajo propone que la implementación de este proyecto se realice bajo la programación de una red neuronal de tipo multicapa. Las redes neuronales de alimentación de múltiples capas poseen una serie de propiedades que las hacen particularmente adecuadas para problemas complejos de clasificación de patrones. Back-Propagation, que es un algoritmo de retro propagación empleado en la red neuronal Feedforward fue tomado en consideración para resolver la clasificación de las emociones.

**Palabras Clave:** Procesamiento de imágenes, redes neuronales, gestualidad, back-propagation, feedforward, clasificación, emociones.

## Artificial neural network for the recognition of human emotions under a backpropagation algorithm

**Abstract:** The era of the technological revolution increasingly encourages the development of technologies that facilitate in one way or another people's daily activities, thus generating a great advance in information processing. The purpose of this work is to implement a neural network that allows classifying the emotional states of a person based on the different human gestures. A database is used with information on students from the PUCE-E School of Computer Science and Engineering. Said information are images that express the gestures of the students and with which the comparative analysis with the input data is carried out. The environment in which this work converges proposes that the implementation of this project be carried out under the programming of a multilayer neural network. Multilayer feeding neural networks possess a number of properties that make them particularly suitable for complex pattern classification problems [8]. Back-Propagation [4], which is a backpropagation algorithm used in the Feedforward neural network, was taken into consideration to solve the classification of emotions.

**Keywords:** Image processing, neural networks, gestures, back-propagation, feedforward, classification, emotions.



## I. INTRODUCCIÓN

La evolución en el desarrollo de software junto con la electrónica ha permitido construir nuevas tecnologías, aplicaciones y dispositivos que son manejados a través de la gestualidad humana, dando respuestas a procesos concretos.

En este trabajo se desarrolló un sistema inteligente que caracteriza los rasgos faciales para conocer las emociones humanas. Para el desarrollo de este sistema se utilizaron 68 imágenes de diferentes características emotivas que diferencian las emociones.

Se empleó el software de programación de Matlab 2015 para el procesamiento y desarrollo de la red neuronal, ya que permite el manejo óptimo de los recursos y el procesamiento de los datos de forma agilizada.

Una red neuronal artificial es una técnica de inteligencia artificial que tiene la capacidad de aprender de las experiencias, mejorando su rendimiento al adaptarse a los cambios en el entorno [11].

Las redes neuronales profundas (DNN) son modelos potentes que han logrado un rendimiento excelente en tareas de aprendizaje difíciles. Aunque los DNN funcionan bien cuando hay disponibles conjuntos de entrenamiento etiquetados grandes, no se pueden usar para asignar secuencias a las secuencias [9]. En los últimos años, las redes neuronales artificiales profundas (incluidas las recurrentes) han ganado numerosos concursos de reconocimiento de patrones y aprendizaje automático [10].

Existe un aspecto fundamental que los diseñadores de redes neuronales enfrentan actualmente y no es más que es elegir un tamaño de red apropiado para una aplicación determinada [6]. El tamaño de la red implica en el caso de las arquitecturas de redes neuronales en capas, el número de capas en una red, el número de nodos por capa y el número de conexiones.

Está claro que la velocidad de aprendizaje de las redes neuronales feedforward es en general mucho más lenta de lo requerido y ha sido un cuello de botella importante en sus aplicaciones durante las últimas décadas [7]. Dos razones principales detrás pueden ser: 1. Los algoritmos de aprendizaje basados en gradiente lentos son ampliamente utilizados para entrenar las redes neuronales, y 2. Todos los parámetros de las redes están sintonizados de forma iterativa mediante el uso de este tipo de algoritmos de aprendizaje

## II. DESARROLLO

En este trabajo se empleó el procesamiento de imágenes utilizando redes neuronales artificiales con el uso del algoritmo Back-Propagation [5]. Esta red neuronal se encuentra dentro del grupo de red de aprendizaje supervisado el cual trabajan bajo un gradiente descendente, donde el patrón de entrada se propaga por toda la red hasta la salida, así mismo las salidas de error se propagan hacia la capa anterior de neuronas [2].

Para esta investigación se trabajó con 68 imágenes diferenciadas según la emoción que presenten cada uno de los 17 individuos que conformaron este estudio. Se diferenciaron cuatro gestualidades relacionadas con las siguientes emociones: ira, alegría, tristeza y susto; es decir, por cada individuo del estudio se capturaron cuatro imágenes. Se empleó el software de Matlab 2015 con el toolbox de redes neuronales, ya que ofrece una amplia variedad de comandos y versatilidad para la ejecución del sistema y la obtención de resultados óptimos.

## III. METODOLOGÍA

La aplicación desarrollada consiste en analizar los rostros de los estudiantes del 8vo, 9no semestres de la Escuela de Sistemas y Computación de la universidad Pontificia Universidad Católica Sede Esmeraldas (PUCE-SE). Esta permite ingresar el rostro de los estudiantes a través de una imagen para ser analizados con la base de datos y así determinar cuál es el estado emotivo del estudiante; el procesamiento de la imagen se realizó primero redimensionando la imagen y convirtiendo la misma a escala de grises. En las imágenes en escala de gris, los componentes R, G y B tienen la misma intensidad en el espacio RGB [3]. Pero, son más fáciles de procesar que las imágenes a color.

A partir de las imágenes en escala de grises se extrajeron los ojos y las porciones de la boca ya que estas áreas contienen la información más esencial de la emoción. Estas áreas extraídas se contabilizaron en una matriz de 64X64 cada una [1]. Estas matrices contienen valores numéricos que van de 0 a 255, las mismas que se manipularon para la extracción de características.

En la figura 1 se presenta el esquema del sistema desarrollado donde se observan cinco etapas secuenciales que caracterizan el proceso de clasificación.

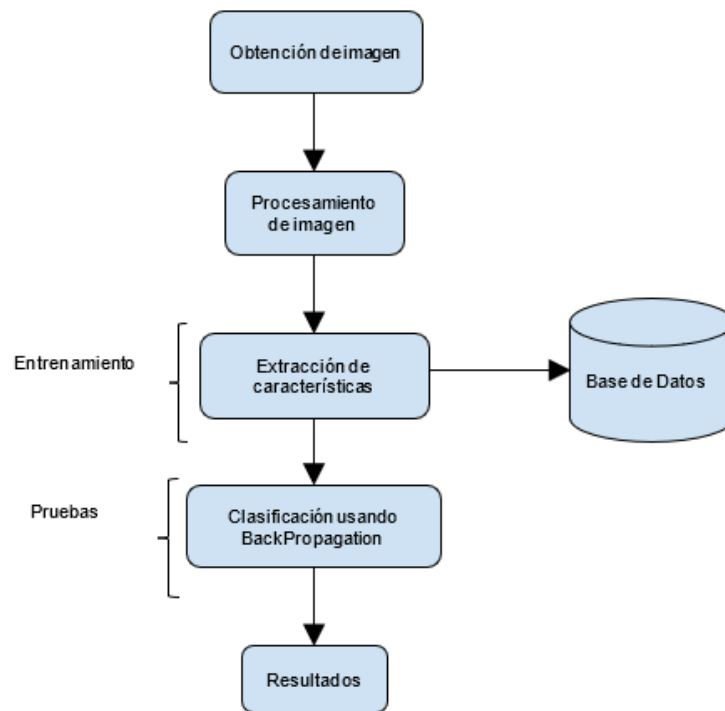


Fig. 1. Esquema de clasificación de gestualidades.

La extracción de la característica se hace usando la transformación 2D discreta del coseno (DCT 2D), ya que este método permite representar cualquier señal en el plano de las frecuencias [1]. Aplicando mencionada transformación en este trabajo se logró cambiar los datos de una imagen del dominio espacial al dominio de la frecuencia. Luego, de esta manera se formó un vector de características para entrenar la red de reconocimiento de patrones, es decir, la red neuronal Feedforward.

El clasificador es la red neural de Feedforward que utiliza el algoritmo de BackPropagation para entrenar al clasificador para datos de entrada contra datos de destino ya especificados, es decir, las cuatro emociones. La función de entrenamiento utilizada para esta red fue Trainscg, que es una función escalada de gradiente conjugado [1].

Para un clasificador, los valores de datos de entrada son características extraídas que forman un vector de particularidades y los datos de destino son otro vector 4X1. El parámetro T es una matriz para los datos objetivos donde las emociones ira, alegría, tristeza y susto se denotan por primera, segunda, tercera y cuarta filas de matriz respectivamente. Para una imagen que contenga una emoción de susto, este vector T mantendrá valores de 0 en todas las filas excepto 1 en la cuarta fila. A continuación se muestra el detalle del vector T.

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

De esta manera el clasificador es entrenado para múltiples imágenes permitiendo al sistema aprender varias emociones.

## IV.RESULTADOS

En la figura 2, se presenta la ventana principal de la aplicación. Esta ventana destaca todos y cada uno de los controles que permiten la interacción con la base de datos donde reposan las imágenes.



Fig. 2. Vista inicial de la aplicación.

Una vez conocidos los controles de la aplicación se podrá cargar una imagen al panel de entrada desde la base de datos previamente almacenada para su posterior análisis (Fig. 3).



Fig. 3. Obtener imagen desde la base de datos.

Previa obtención de la imagen, luego se procede a entrenar la red neuronal. Se debe elegir el tipo de emoción que presenta la imagen precargada. Cabe señalar que cada imagen es usada una sola vez para evitar el sobre-entrenamiento de la red (Fig. 4).





Fig. 4. Entrenamiento de la red neuronal.

Por último, para comprobar que el entrenamiento de la red ha sido el correcto se debe volver a cargar una imagen de prueba para que la aplicación determine qué tipo de emoción presenta el individuo. La imagen de prueba puede ser cualquiera elegida de forma aleatoria de entre un grupo de imágenes que correspondan al individuo en estudio (Fig. 5).



Fig. 5. Reconocimiento de emoción.

## V.CONCLUSIONES

1.La gestualidad de las personas es de fácil reconocimiento siempre que la individualidad de la misma lo permita, ya que existen personas de difícil expresividad que no manifiestan sus estados de ánimo, en cuyos casos resulta de mayor dificultad.

2.La gestualidad de las personas es una característica inevitable, que permite caracterizar las formas de sus emociones y las manifestaciones de las mismas.

3.Las redes neuronales artificiales permiten resolver problemas de no linealidad, como el caso de la gestualidad humana, que difiere considerablemente en cada individuo.

4.Es preciso señalar que debido a que la muestra de estudio es reducida no es posible realizar un análisis mucho más profundo. Este punto sería una de las limitaciones de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] S. Gangwar, S. Shukla, D. Arora. "Human Emotion Recognition by Using Pattern Recognition Network", *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, Issue 5, pp.535-539, 2013.
- [2] K. Rohit. "Back Propagation Neural Network based Emotion Recognition System". *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Vol. 22, N° 4, 2015.
- [3] S. Eishu, K. Ranju, S. Malika, "Speech Emotion Recognition using BFO and BPNN", *International Journal of Advances in Science and Technology (IJAST)*, ISSN2348-5426, Vol. 2 Issue 3, 2014.
- [4] A. Fiszlelew, R. García-Martínez and T. de Buenos Aires. "Generación automática de redes neuronales con ajuste de parámetros basado en algoritmos genéticos". *Revista del Instituto Tecnológico de Buenos Aires*, 26, 76-101, 2002.
- [5] Y. LeCun, B. Boser, J. Denker, D. Henderson, R. Howard, W. Hubbard, and L. Jackel. "Handwritten digit recognition with a back-propagation network". In *Advances in neural information processing systems*. pp. 396-404, 1990.
- [6] G. Bebis and M. Georgiopoulos. "Feed-forward neural networks". *IEEE Potentials*, 13(4), 27-31, 1994.
- [7] G. Huang, Q. Zhu and C. Siew. "Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks". In *Neural Networks, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Joint Conference*. Vol. 2, pp. 985-990. IEEE, 2004.
- [8] D. Montana and L. Davis. "Training Feedforward Neural Networks Using Genetic Algorithms". In *IJCAI*, Vol. 89, pp. 762-767, 1989.
- [9] I. Sutskever, O. Vinyals and Q. Le. "Sequence to sequence learning with neural networks". In *Advances in neural information processing systems*. pp. 3104-3112, 2014.
- [10] J. Schmidhuber. "Deep learning in neural networks: An overview". *Neural networks*, 61, 85-117, 2015.
- [11] R. Santos, M. Rupp, S. Bonzi and A. Filetia, "Comparación entre redes neuronales feedforward de múltiples capas y una red de función radial para detectar y localizar fugas en tuberías que transportan gas". *Chem. Ing. Trans* , 32 (1375), e1380, 2013.

## Algoritmos adaptativos: una revisión bibliográfica

Luis González  
<https://orcid.org/0000-0001-9933-4147>  
gonzalezluisj@gmail.com  
UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz  
Estado Bolívar, Venezuela.

**Recibido (08/07/21), Aceptado (10/08/21)**

---

**Resumen:** Se presenta el análisis de un trabajo de investigación desarrollado en la empresa C.V.G CARBONORCA de Venezuela, la cual cuenta con dos plantas depuradoras de gases para el área de cocción, destinadas a purificar el gas que proviene de los hornos de cocción. Cada planta está conformada por electroválvulas, válvulas neumáticas, transmisores, panel mímico del proceso y un sistema supervisorio. Todos estos elementos son gobernados por un PLC SIEMENS S5-115U el cual se encuentra en estado de obsolescencia, razón por la cual se diseñó la sustitución de estos autómatas por autómatas ContolLogix de ALLEN BRADLEY, con el fin de garantizar la continuidad en las operaciones en la planta. La investigación se hizo con un diseño descriptivo del tipo experimental de campo. Se obtuvo un código para cada planta depuradora de gas en RSLOGIX 5000 v17.00.00 y la actualización de la base de datos del sistema supervisorio. También se comprobó el funcionamiento del programa a través de una simulación de la planta en un sistema supervisorio, cuyo despliegue se diseñó para ese fin.

**Palabras Clave:** Autómata, Modernización, ControlLogix, Sistema Supervisorio, Panel Mímico.

---

## Adaptive algorithms: a bibliographic review

**Abstract:** The analysis of a research work developed in the company C.V.G CARBONORCA of Venezuela is presented, which has two gas purification plants for the cooking area, designed to purify the gas that comes from the cooking ovens. Each plant is made up of solenoid valves, pneumatic valves, transmitters, process mimic panel and a supervisory system. All these elements are governed by a SIEMENS S5-115U PLC which is in a state of obsolescence, which is why the replacement of these automata by ALLEN BRADLEY ContolLogix automata was designed, in order to guarantee continuity in operations in plant. The research was done with a descriptive design of the field experimental type. A code for each gas treatment plant was obtained in RSLOGIX 5000 v17.00.00 and the update of the database of the supervisory system. The operation of the program was also verified through a simulation of the plant in a supervisory system, the deployment of which was designed for this purpose.

**Keywords:** Automation, Modernization, ControlLogix, Supervisory System, Mimic Panel



## I. INTRODUCCIÓN

Los movimientos voluntarios de los brazos, manos, piernas, rostro u otras partes del cuerpo son una parte esencial de la vida y de la capacidad de comunicación no verbal del ser humano. Estos movimientos intensionales son posibles gracias al control voluntario de nuestros músculos y para ello el cerebro posee un complejo mecanismo de activación muscular a través de los nervios motores, en respuesta los músculos se contraen de manera coordinada para ejecutar los movimientos ordenados lo que a su vez generan potenciales bioeléctricos que pueden ser registrados por electrodos en la superficie de la piel. A partir del análisis regresivo multivariable de estos biopotenciales o potenciales mioeléctricos registrados mediante N electrodos, convenientemente colocados sobre la piel, es factible determinar en tiempo real los M músculos que intervinieron en el movimiento, lo que permite controlar con éxito algún mecanismo que emule en tiempo real el movimiento realizado. Esta tecnología de registro de potenciales mioeléctricos superficiales o electromiografía superficial (sEMG) con la intención de identificar los músculos activados, para luego reconocer en tiempo real los movimientos que se ejecutaron, o que se pretendían ejecutar en caso de un miembro parcialmente amputado, se encuentra en plena expansión, estando sus principales aplicaciones circunscritas al campo de las interfaces hombre-máquina tanto en prótesis mioeléctricas como en mecanismos para expandir las capacidades humanas. Sin embargo, esta tecnología aún enfrenta múltiples desafíos, puesto que dependiendo del hardware utilizado para la medición, el preprocesamiento de datos, el algoritmo matemático empleado para la decodificación de las señales mioeléctricas, del número de grados de libertad del movimiento a reconocer, del tipo de miembro, y de si se trata de un patrón de movimiento conocido o un patrón de movimiento nuevo, la tasa de éxito de reconocimiento se ubica entre un 80% y un 95% (ver tabla X); es decir, hasta 1 de cada 5 movimientos de una prótesis mioeléctrica mano-muñeca o un mecanismo de expansión de las habilidades humanas puede ser errado. En este sentido, la tesis doctoral propuesta versará sobre el diseño de un algoritmo de reconocimiento de movimientos de más de un grado de libertad en tiempo real, partiendo desde la consideración del estudio de variables tales como la interfaz eléctrica electrodo-piel, hasta el algoritmo de regresión multidimensional para lograr igualar o superar el benchmarking de las investigaciones reportadas en la literatura especializada, teniendo un enfoque público, poniendo a disposición de la comunidad científica, mediante publicaciones técnicas, los detalles del hardware utilizado, los datos registrados y los algoritmos matemáticos implementados, con el fin de hacer frente a una de las principales problemáticas reportadas por algunos investigadores [1] respecto a lo difícil de reproducir los experimentos presentados por otros investigadores en este campo de la ciencia y la tecnología.

## II. DESARROLLO

El reconocimiento de movimientos compuestos a partir de señales mioeléctricas con el objetivo de controlar un sistema ciberfísico es un complejo problema científico-tecnológico. Estos sistemas ciberfísicos que se desean controlar sirven para expandir las capacidades humanas, bien sea para recobrar en de alguna forma, funciones disminuidas debido a discapacidades, o bien sea para ampliar las facultades naturales.

Según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [citar el informe] aproximadamente 1,71 mil millones de personas padecen afecciones musculoesqueléticas en todo el mundo, siendo el principal factor que contribuye a la discapacidad en todo el mundo puesto que limitan significativamente la movilidad y la destreza, lo que conduce a niveles más bajos de bienestar y una capacidad reducida para participar en la sociedad. Debido al aumento de la población y al envejecimiento, la cantidad de personas con afecciones musculoesqueléticas está aumentando rápidamente por lo que la discapacidad asociada con las afecciones musculoesqueléticas se prevé que seguirá aumentando en las próximas décadas. Un ejemplo significativo es Ecuador, ya que, comparativamente con el número poblacional, es el primer país de Latinoamérica con el mayor número de discapacitados [citar], al que le sigue Brasil [citar].

La tasa de éxito de los sistemas ciberfísicos destinados a expandir las capacidades humanas depende en gran medida de la precisión y exactitud en el reconocimiento de los movimientos que el individuo desea ejecutar [citar], y de la naturalidad en su uso; sin embargo, dicha precisión y exactitud están notablemente influenciadas por parámetros sistemáticos y aleatorios tales como: el adecuado tamaño, espaciado y material de los electrodos de registro, el adecuado posicionamiento de estos electrodos sobre la región en la que se desean registrar las señales mioeléctricas, la interferencia de señales ajenas al cuerpo humano como la frecuencia de la red de distribución de energía eléctrica, la interferencia de señales propias del cuerpo humano como los potenciales bioeléctricos del corazón (ECG) [citar], la circulación de la sangre, la respiración, la activación de otros grupos musculares [citar], el nivel de transpiración del individuo, el espesor de la capa de células muertas sobre la piel, la vellosoidad de la

piel, el espesor de capa de grasa en el tejido subcutáneo [citar], el algoritmo de transformación regresiva del espacio N-dimensional de electrodos al espacio M-dimensional de músculos [citar], la ausencia parcial miembros (personas con amputaciones), el número de grados de libertad del movimiento a reconocer, del tipo de miembro, y de si se trata de un patrón de movimiento conocido por el sistema ciberfísico o un patrón de movimiento nuevo.

Producto de todos estos factores, la tasa de éxito de reconocimiento de movimientos simples se ubica entre un 70% y un 96% [citar] (es decir, hasta 1 de cada 5 movimientos de una prótesis mioeléctrica o un mecanismo de expansión de las capacidades humanas puede ser errado. Además, los costos de adquisición de las prótesis más avanzadas pueden oscilar entre los 35mil y 60mil dólares americanos, para prótesis de mano-muñeca y los 100mil dólares para las prótesis más avanzadas de tobillo-pie [citar].

El binomio complejidad-costo, impide la adopción masiva de esta tecnología, que como se señaló anteriormente podría mitigar las disminuciones funcionales de una fracción de los 1,71 mil millones de personas que padecen afecciones musculoesqueléticas en todo el mundo.

Es un fenómeno ampliamente reconocido en la historia de la humanidad que, a medida que se mejoran las tecnologías y se optimizan sus procesos productivos, los costos bajan y puede ser masificada.

En este sentido, el trabajo propuesto estará centrado en el estudio del reconocimiento adaptativo de movimientos de más de un grado de libertad en tiempo real, considerando variables tales como la interfaz eléctrica electrodo-piel, enlista las variables. El trabajo utilizará un algoritmo de regresión multidimensional para lograr igualar o superar el benchmarking de las investigaciones reportadas en la literatura especializada [citar], con un enfoque abierto.

### III. METODOLOGÍA

La investigación será abordada adoptando una postura epistémica la cual ha sido resumida en la tabla 3

**Tabla 1 - Matriz epistémica de la Investigación**

Objeto	Es encontrar, definir y delimitar un método para realizar el reconocimiento adaptativo de movimientos compuestos en tiempo real a partir del registro superficial de potenciales mioeléctricos.
	Se realizará la definición formal de los elementos que conforman el problema de reconocimiento adaptativo de movimientos compuestos en tiempo real partiendo de señales mioeléctricas superficiales, las fuentes de error, sus características, propiedades e interacciones para formular un algoritmo que permita cumplir con las especificaciones de desempeño requeridas relativas a la precisión del reconocimiento.
Ontológico	
Epistemológico	La postura epistémica que se adoptará para la investigación para es el paradigma cuantitativo positivista. El investigador buscará definir correlaciones entre variables fundamentales como el espesor del tejido adiposo y la intensidad de las señales mioeléctricas, la influencia de la velloidad y el nivel de transpiración en el registro de los biopotenciales, el tamaño, cantidad y disposición de los electrodos con respecto a la precisión en el reconocimiento de los movimientos, entre otros.
Metodológico	Será una metodología ágil de desarrollo basado en sprint mensuales, partiendo del conocimiento científico aceptado y validado por la comunidad de investigadores buscando ampliar ese conocimiento, esto permitirá un avance progresivo de la investigación al presentar desarrollos incrementales, teniéndose a la vez la flexibilidad necesaria para hacer frente a situaciones no previstas en el plan inicial con el objeto de no desviarse del objetivo planteado.

Axiológico	Se valorará las estrategias ya publicadas para solventar los problemas presentados en el objeto de estudio, identificando las técnicas que mejor contribuyen a la solución de la problemática, optimizándolas en caso de ser necesario e incorporándolas al algoritmo a desarrollar.
Teleológico	El propósito de la investigación será el de concebir un algoritmo adaptativo de reconocimiento de movimientos compuestos que permita un sistema ciberfísico el seguimiento de las trayectorias de movimiento deseadas por la persona.
Gnoseológica	El documento final presentará el origen y alcance de un nuevo algoritmo adaptativo para reconocer movimientos compuestos derivado de la investigación documental, análisis, simulación y optimización del algoritmo como razón de ser de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a metodología, se plantea seguir una metodología Scrum de desarrollo ágil basada en sprint trimestrales académicos con un horizonte de tiempo de 24 meses, lo que permitirá ir presentando avances sucesivos de la investigación. En este sentido, se espera poder ejecutar por lo menos 6 sprint conforme al siguiente cronograma de actividades.

#### IV.RESULTADOS

Haciendo un análisis correlacional de los resultados presentados en la Tabla 1 se puede concluir que el principal problema que se investiga en lo relativo al registro de potenciales mioeléctricos es el de la mitigación de la interferencia de la red eléctrica (PLI) en las mediciones, pero situaciones como la impedancia de la interfaz electrodo-piel, o la correlación entre la magnitud de la sEMG y el espesor del tejido adiposo subcutáneo, e incluso el efecto de la distancia entre electrodos (sobre todo en los arreglos matriciales) son menos abordados. También es interesante notar que los investigadores pocas veces comparten detalles del hardware de adquisición de datos utilizado y prácticamente es nulo el acceso a los datos sin preprocesamiento. En lo que si se tiene un consenso más o menos establecido es en el rango de frecuencias de interés ubicado entre 1Hz y 1000Hz aproximadamente, y la frecuencia de muestreo ubicada entre los 1024Hz y 2048Hz. Por lo tanto, en este particular se tiene la oportunidad de realizar aportes al focalizar estudios sistemático de aspectos como: el modelado matemático y su símil eléctrico del generador de potenciales mioeléctricos, el estudio del rango de variación de impedancia de la interfaz electrodo-piel en función de parámetros como velloidad, sudoración, presión de los electrodos sobre la piel, espesor del tejido adiposo, la validación de la banda de frecuencias de interés, la validación de la tasa de muestreo, la comparación de distintas técnicas de mitigación de la PLI en base a un índice de desempeño.

Respecto a la precisión en el reconocimiento de movimientos, analizando la revisión bibliográfica es interesante notar que en gran parte las investigaciones se concentran en pocos movimientos, de hecho, las prótesis mioeléctricas de mano más avanzadas (y costosas) del mercado a la fecha solo tienen la capacidad de aprender a reconocer hasta un máximo de 16 movimientos. También es importante notar que los investigadores poco revelan información relativa al coste computacional de los diversos algoritmos, el tiempo de respuesta, la correlación entre la mejora en la precisión versus el coste computacional.

Puesto que el objetivo del trabajo es el de desarrollar un algoritmo para el reconocimiento adaptativo de movimientos compuestos en tiempo real a partir del registro superficial de potenciales mioeléctricos, la estrategia que se plantea es la de estudiar, analizar, contrastar, testear, correlacionar de manera iterativa los avances científicos que se vayan reportando en este campo del conocimiento para así poder concebir un algoritmo adaptativo optimizado y un protocolo de medición que de manera global logre optimizar el índice de desempeño de precisión en el reconocimiento de movimientos compuestos tanto aprendidos como nóveles.

Para lograr alcanzar el objetivo general planteado se seguirá el siguiente proceso iterativo:

Análisis de las diversas metodologías reportadas en el estado del arte.

Diseño y construcción de sistemas prototipo de adquisición de datos basados en las metodologías reportadas.

•Adquisición y preprocesamiento de datos.

- Procesamiento de datos.
- Formulación de modelos matemáticos.
- Validación de modelos matemáticos.
- Incorporación de los hallazgos en la mejora de los procesos de adquisición, preprocesamiento y procesamiento de los datos.
- Presentación de los resultados.
- Reinicio del ciclo.

## V.CONCLUSIONES

Debido a la carencia de información técnica sobre las prótesis, se tiene la oportunidad de realizar diversos estudios comparativos para establecer una especie de algoritmo de selección del método de reconocimiento en función de las características particulares del problema que se desee abordar.

Se tiene la oportunidad de realizar aportes al focalizar estudios sistemáticos de aspectos como: el modelado matemático y su símil eléctrico del generador de potenciales mioeléctricos, el estudio del rango de variación de impedancia de la interfaz electrodo-piel en función de parámetros como vellosoidad, sudoración, presión de los electrodos sobre la piel, espesor del tejido adiposo, la validación de la banda de frecuencias de interés, la validación de la tasa de muestreo,

Se deben evaluar los avances científicos que se vayan reportando en este campo del conocimiento para así poder concebir un algoritmo adaptativo optimizado y un protocolo de medición que de manera global logre optimizar el índice de desempeño de precisión en el reconocimiento de movimientos compuestos tanto aprendidos como nóveles

## REFERENCIAS

- [1]M. Simao, N. Mendes, O. Gibaru y P. Neto, «A Review on Electromyography Decoding and Pattern Recognition for Human-Machine Interaction,» IEEE Access, vol. 7, pp. 39564 - 39582, 2019.
- [2]Instituto de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Tecnología, «Clasificación Internacional Normalizada de la Educación CINE,» UNESCO Institute for Statistics, Montréal, 2011.
- [3]Y. Zheng y H. Xiaogang, «Interference Removal From Electromyography Based on Independent Component Analysis,» IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, vol. 27, nº 5, pp. 887-894, Mayo 2019.
- [4]B. Afsharipour, F. Petracca, M. Gasparini y R. Merletti, «Spatial distribution of surface EMG on trapezius and lumbar muscles of violin and cello players in single note playing,» Journal Electromyography Kinesiology, vol. 31, pp. 144 - 153, 2016.
- [5]M. Niegowski, M. Zivanovic, M. Gómez y P. Lecumberri, «Unsupervised learning technique for surface electromyogram denoising from power line interference and baseline wander,» de 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Milan, Italia, 2015.
- [6]S. D. Soedirdjo, K. Ullah y R. Merletti, «Power line interference attenuation in multi-channel sEMG signals: Algorithms and analysis,» de Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., 2015.
- [7]A. Phinyomark, F. Quaine, S. Charbonnier, C. Serviere, F. Tarpin-Bernard y Y. Laurillau, «Feature extraction of the first difference of EMG time series for EMG pattern recognition,» Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol. 117, nº 2, pp. 247-256, Noviembre 2014.
- [8]M. Malboubi, F. Razzazi, M. Aliyari y A. Davari, «Power line noise elimination from EMG signals using adaptive Laguerre filter with fuzzy step size,» de 17th Iranian Conference of Biomedical Engineering (ICBME), Isfahan, Iran, 2010.
- [9]C. Luca, L. Gilmore, M. Kuznetsov y S. Roy, «Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination,» J. Biomech, pp. 1573-1582, 28 Mayo 2010.
- [10]R. Mello, L. Oliveira y J. Nadal, «Digital Butterworth filter for subtracting noise from low magnitude surface electromyogram,» Comput Methods Programs Biomed, vol. 1, nº 87, pp. 28-35, 2007.
- [11]A. Botter y T. Vieira, «Filtered virtual reference: A new method for the reduction of power line interference with minimal distortion of monopolar surface EMG,» IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 62, nº 11, pp. 2638 - 2647, 2015.

- [12]J. R. Potvin y S. H. Brown, «Less is more: high pass filtering, to remove up to 99% of the surface EMG signal power, improves EMG-based biceps brachii muscle force estimates,» J. Electromyogr. Kinesiol., vol. 14, nº 3, pp. 389-399, 2004.
- [13]D. T. Mewett, K. J. Reynolds y H. Nazeran, «Reducing power line interference in digitised electromyogram recordings by spectrum interpolation,» Med. Biol. Eng. Comput., vol. 4, nº 42, pp. 524-531, 2004.
- [14]D. T. Mewett, H. Nazeran y K. J. Reynolds, «Removing power line noise from recorded EMG,» de 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Istanbul, Turkey, 2001.



## Modelo matemático basado en aprendizaje de máquina para la predisposición automática del flujo de cal y hrd en hornos eléctricos

**Marlon Rojas**

<https://orcid.org/0000-0002-1065-7992>  
Marlonrj@gmail.com  
UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz  
Estado Bolívar, Venezuela

**Olga Prado**

<https://orcid.org/0000-0002-8003-2904>  
Herpra7@gmail.com  
SIDOR  
Estado Bolívar, Venezuela

**Alejandro Zambrano**

<https://orcid.org/0000-0002-7465-8636>  
Alejandro.zambrano@gmail.com  
SIDOR  
Estado Bolívar, Venezuela

**Octavio Carvajal**

<https://orcid.org/0000-0002-6055-8511>  
sirocc@gmail.com  
SIDOR  
Estado Bolívar, Venezuela

Recibido (08/07/21), Aceptado (10/08/21)

**Resumen:** En este trabajo se desarrolla un modelo matemático para la predisposición automática del flujo de cal y HRD durante el proceso de aceración primaria en HEA de la acería de planchones de Sidor, C.A. Modelo que fue posible a través de un sistema de control inteligente de proceso dinámico, bajo un perfil de investigación de campo del tipo descriptivo; considerando una muestra de 46 coladas de acero de calidad comercial (ASTM A 1018). El sistema está conformado por dos módulos de simulación que permite asegurar la condición termodinámica ideal (temperatura del acero entre 1535 a 1575°C, indicador ITHD menores a 1,5% y un índice de basicidad binaria de la escoria entre 2 a 2,6) para la protección del material refractario y desfosforación del acero. Teniéndose como resultado, una reducción del Tap To Tap del 7,08%; reducción del consumo de cal en 5,28% y un aumento de la productividad del 7,51%.

**Palabras Clave:** Metalurgia Primaria; Horno de Arco Eléctrico (HEA); Modelo Matemático; Aprendizaje de Máquina.

## Machine learning mathematical model for the automatic setup of the cal and hrd flow during the process of primary aceration in electric ovens

**Abstract:** In this work, a mathematical model is developed for the automatic predisposition of the flow of lime and HRD during the primary steeling process in HEA of the steel mill of Sidor, C.A. Model that was possible through an intelligent dynamic process control system, under a descriptive field research profile; considering a sample of 46 commercial grade steel castings (ASTM A 1018). The system consists of two simulation modules that ensure the ideal thermodynamic condition (steel temperature between 1535 to 1575 ° C, ITHD indicator less than 1,5% and a binary base index of the slag between 2 to 2,6 ) for the protection of refractory material and dephosphorization of steel. Having as a result, a reduction of the Tap To Tap of 7,08%; reduction of lime consumption by 5,28% and an increase in productivity of 7,51%.

**Keywords:** Primary Metallurgy; Electric Arc Furnace (HEA); Mathematical Model; Machine Learning.

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, según la Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO) [1] existen dos tecnologías alternativas que pueden seguir las empresas siderúrgicas para fabricar acero, que son: acería integral y acería eléctrica; siendo esta última la que se emplea en Venezuela; específicamente, en SIDOR durante su proceso productivo. Dicha tecnología consiste en utilizar hornos de arcos eléctricos (HEA) en la fase inicial de producción de acero denominada aceración primaria, en donde la carga metálica (HRD y chatarra) es fundida al hacer contacto con los arcos eléctricos generados por los electrodos de grafito a través del paso de corriente eléctrica.

Una vez que la carga metálica es fundida, se obtienen como producto acero líquido que pasa a la segunda fase de producción denominada afino o metalurgia secundaria, en donde se logra obtener tanto la composición química final del producto, como la temperatura final a la cual empieza el proceso de solidificación. Las coladas de acero antes de llegar a la etapa de afino tienen que lograr cumplir con cierta especificación en su composición química, siendo de especial interés el control del porcentaje en masa del fósforo (P), ya que según [2] tiene un efecto fragilizante sobre la estructura del acero con una marcada disminución de la tenacidad. Por ello, [3] indica que el P se especifica como elemento aleante solo en pocos grados, y más que todo, para aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión atmosférica del acero.

Para disminuir el P en el acero, [4] y [5] señalan que es necesario añadir cal mezcla, el cual actúan como fundente que aporta óxido de calcio (CaO) que reacciona químicamente con el P para formar fosfatos estables que permanecen en la escoria, la cual posteriormente es retirada del proceso. Sin embargo, en la escoria también hay sílice (SiO<sub>2</sub>) que es aportada por la materia prima HRD y que el mismo compite con el P por el CaO disponible para mantener la basicidad de la escoria, y con ello aumentar el tiempo de vida útil del horno.

En este sentido, la cal mezcla que se utilice en el proceso de aceración primaria, debe ser consumida de manera eficiente que permita cumplir con ambas condiciones señaladas anteriormente. Lo que resulta difícil, por la ausencia de un sistema de control inteligente automático en el proceso que a partir de medidas cuantitativas, permita en tiempo real, la supervisión, monitoreo y acción de control sobre las variables físicas involucradas en la operación. Problema que se intensifica aún más con el hecho de que la adición de dichas materias primas se realiza mediante prácticas operativas totalmente empíricas. Es decir, están basadas en la experiencia y experticia que tienen los operadores sobre el proceso y que además desconocen el dato real de la composición química del HRD; especialmente, el porcentaje en masa del SiO<sub>2</sub>, el cual tiende a ser muy variable hoy en día.

Esta falta de uniformidad en la operación, causa variabilidad en el consumo de cal mezcla, situación que trae como consecuencia que en el momento que su consumo sea en exceso; es decir, mayor al requerido, se estaría produciendo una colada de acero líquido a un costo elevado por el alto consumo de cal. Por otro lado, en el momento que el consumo de cal sea déficit; es decir, menor al requerido, se tiene como efecto que se alarguen los tiempos de procesamiento del acero, para así poder cumplir con los atributos de calidad, lo que causa disminución en la productividad, aumento del consumo energético y disminución en el tiempo de vida útil de servicio de los equipos utilizados en el proceso.

Es por ello que en busca de la mejora continua, se ha desarrollado un modelo matemático para la predisposición automática del flujo de cal mezcla y flujo de HRD durante el proceso de aceración primaria en HEA de la acería de planchones de SIDOR. De tal manera que se disponga de una única práctica de operación con un alto nivel de confianza que pueda ser fácilmente seguida por los fundidores, para seguir garantizando la calidad del producto final con un consumo eficiente de las materias primas, independientemente, de la variabilidad que estuviese presentando en su composición química.

Modelo que fue posible empleando técnicas de control inteligentes, herramienta que se ha venido incrementado en los últimos años, ya que como señala [6], se ha demostrado ser un recurso estratégico que a partir de los mecanismos de procesamiento de información de los humanos, permite resolver problemas particulares o complejos en ambientes cambiantes; como lo representa los sistemas dinámicos. Esto, dado que en la automatización se programan diversos elementos computacionales que permiten verificar, monitorear y supervisar los valores de las variables principales involucradas dentro de un proceso, que en función de un rango operativo confiable y una serie de reglas permitirá tomar decisiones en tiempo real, lo que en efecto reduce la necesidad de la intervención del personal en los procesos, quienes pueden incurrir en errores humanos. Es por ello, que la optimización de los hornos de arco eléctrico se ha abordado principalmente a través de modelos basados en técnicas de control inteligentes; siendo la técnica de red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) la que ha tenido mayor aplicación en este campo.

El éxito del uso de la técnica de ANN para modelar el comportamiento no lineal y variante en el tiempo del proceso de fabricación de acero en un horno de arco eléctrico, según [7], se debe, a que estos modelos infieren el resultado a partir de datos obtenidos directamente del proceso, los cuales son utilizados para el entrenamiento de la red neuronal; lo que sin duda alguna, proporciona un modelo razonablemente exacto, siendo el proceso de aceración primaria en HEA un ejemplo claro y propicio para aplicar este tipo de técnica.

Son contados, por no decir pocos, las investigaciones que se han realizado con respecto a la aplicación de las técnicas inteligentes para el control del proceso de aceración primaria con la tecnología de HEA, y que además, las mismas están enfocadas más que todo al control y regulación del posicionamiento de los electrodos mediante la técnica de ANN, que si bien es cierto, evidencian que este tipo de técnica tiene gran aplicación y beneficio para el control de dicho proceso dinámico; también es cierto, que representan una idea vagamente relacionada con el problema en estudio; es decir, aún no se tiene evidencia hasta el momento en que este tipo de técnica inteligente, haya sido utilizada y/o implementada para controlar de forma automática la adición de materias primas durante el proceso de aceración primaria con la tecnología de HEA. De modo que, el presente proyecto investigativo implica un tema poco estudiado que no ha sido abordado antes. Lo que, sin duda alguna, hace que dicho estudio sea considerado como un producto investigativo tecnológico de gran relevancia en el área de la siderurgia y computación Inteligente.

## II. METODOLOGÍA

### A. Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de Cal

Para predisponer el flujo de cal mezcla durante el proceso de aceración primaria en el HEA, se utilizó el modelo desarrollado por [8] y a modo de validación en su estimación, se procedió a realizar algunas pruebas experimentales a través de un simulador desarrollado. Dichas pruebas se llevaron a cabo en dos períodos: Turno N° 1 y Turno N° 2. En el turno N° 1, un día previo a las pruebas se realizaron los siguientes pasos:

- Se recolectó una muestra especial del material (HRD y cal mezcla)

- Se envió la muestra recolectada en el punto anterior, al laboratorio de materias primas, identificadas como muestras especiales, para su posterior análisis químico.

En el turno N° 2, una vez que se haya introducido la carga metálica y conectado el horno eléctrico, para la fabricación de aceros en estudio, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Se introduce en el modelo de simulación desarrollado, el dato de la composición química del HRD y cal mezcla de las muestras recolectadas en el turno N° 1.

- Se ajusta el índice de basicidad binaria objetivo en el modelo según el tipo de acero a fabricar

- Se introduce en el modelo de simulación, el flujo de HRD establecido por el técnico de aceración (fundidor) durante el proceso de aceración primaria.

- Se indica al fundidor el flujo de cal mezcla estimado por el modelo, para que proceda a suministrar dicha cantidad en el proceso.

- Una vez superadas las 190 toneladas de carga total en la colada actual del experimento, se procede a medir la temperatura, la actividad de oxígeno, recolectar muestra de acero y muestra de escoria.

### B. Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de HRD

Para el desarrollo de este modelo, primeramente, se seleccionó el patrón de datos que contenían todas las variables requeridas; pertenecientes a una colada de acero que se fabricó con el más alto nivel de eficiencia. Luego, se procedió a realizar el entrenamiento de la red, siguiendo los siguientes eventos:

- Se definió una arquitectura de la red neuronal empleada en sistemas dinámicos. En este caso, la arquitectura adoptada para la simulación, es del tipo neuronal auto-regresivo con entradas exógenas (NARX). Este tipo de red según lo indicado por [9], posee una conexión en serie-paralelo, lo que significa que salida de la red será retroalimentada con retardo como entrada a la primera capa de neuronas que integra la red neuronal.

- Se realizó el algoritmo de aprendizaje de la red (principio de Levenberg Marquardt), haciendo uso de la herramienta MATLAB.

- Luego se especificaron los valores iniciales (número de capas de la red, número de neuronas y

-funciones de activación entre las capas) y los valores paramétricos de aprendizaje (Goal, Epochs, Lr y Mínimo Gradiente).

-Se realizó la corrida del modelo en el software MATLAB.

-Se midió el error de aprendizaje y el error de generalización, con el fin último de ir ajustando en la medida que se alcance los objetivos y de esta manera se estableció la arquitectura de la red deseada en el modelo matemático.

-Finalmente, se procedió a extraer el modelo matemático obtenido con el entrenamiento de la red neuronal.

### C.Recolección de Datos: Pruebas Fuera de Línea

-Se programaron los modelos de simulación.

-Se recolectaron de la base de datos históricos, los datos requeridos en los modelos de simulación para su operación.

-Con los datos recolectados, se realizaron las simulaciones en los modelos matemáticos desarrollados.

-Luego se realizaron gráficos de control, para comparar los datos estimados por el modelo con el dato real.

## III.RESULTADOS

### A.Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de Cal.

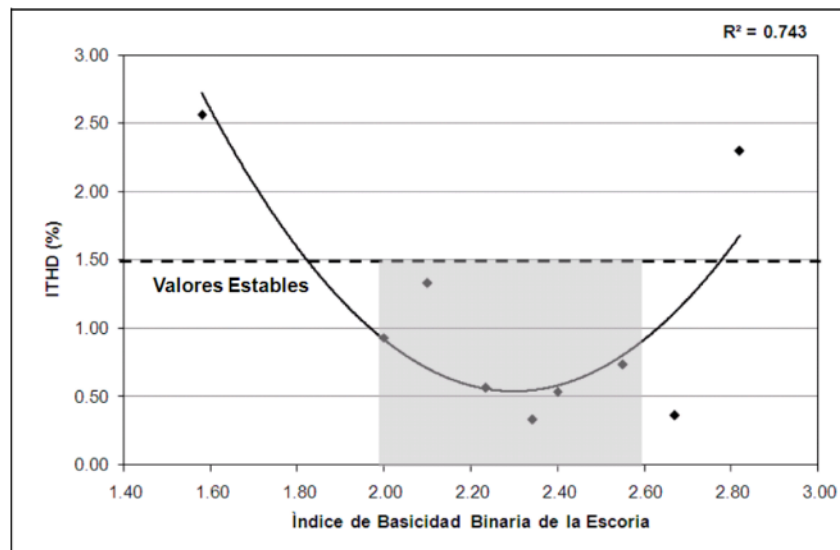
El modelo de predisposición de cal mezcla que se empleó fue justificado y desarrollado por [8], dicho modelo tiene como objetivo estimar el flujo de cal para mantener el índice de basicidad binaria de la escoria en un rango estrecho durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico independientemente de la composición química que posea tanto el HRD como la cal. La formulación matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{M}_{CAL} = \dot{M}_{HRD} \left[ \frac{B_2(SiO_2)_{HRD} - (CaO)_{HRD}}{(CaO)_{CAL} - B_2(SiO_2)_{CAL}} \right] \quad (1)$$

Siendo;  $M_{CAL}$ , flujo másico de cal (ton/h);  $M_{HRD}$ , flujo másico de HRD (ton/h);  $B_2$ , índice de basicidad binaria de la escoria;  $(SiO_2)_{HRD}$ , contenido de  $SiO_2$  en HRD (%);  $(CaO)_{HRD}$ , contenido de CaO en HRD (%);  $(SiO_2)_{CAL}$ , contenido de  $SiO_2$  en la Cal (%) y  $(CaO)_{CAL}$ , contenido de CaO en la Cal (%).

Luego, se realizó una experimentación con el fin último de establecer un rango de operación del índice de basicidad binaria de la escoria a fijar en el modelo, que a su vez depende de las condiciones operativas del proceso y del tipo de acero a fabricar en el horno eléctrico. Con respecto a la protección del material refractario, se debe tener en cuenta que la misma se logra, siempre y cuando se minimice un desgaste acelerado causado por el ataque químico de los óxidos ácidos y por la radiación del arco eléctrico. Para asegurar que el material refractario minimice el ataque químico, la escoria a formar durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico tiene que poseer características básicas; para ello, [10] indican que el mismo se consigue apuntando a un índice de la basicidad binaria de la escoria mayor e igual a 1.

Para minimizar el desgaste del material refractario por causa de la radiación del arco eléctrico, es necesario formar una adecuada escoria espumosa, para cubrir el arco eléctrico generado por los electrodos. Al considerar el indicador ITHD como variable de referencia para medir la espumosis de la escoria, se encontró que las mejores condiciones de formación de escoria espumosa que mantuvieron valores de ITHD dentro de rango de estabilidad (menores a 1,5%) establecido en [11] y [12], se obtuvieron en coladas de acero cuyo proceso de fabricación mantuvieron un índice de basicidad binaria de la escoria entre 2 y 2,6 (véase Fig.1).



**Fig. 1. Relación de índice de basicidad binaria de la escoria con el indicador ITHD.**

Esto se explica, dado que, en procesos reales de fabricación de acero, la espumabilidad de la escoria se logra con la generación de grandes volúmenes de burbujas de monóxido de carbono (CO), productos de reacciones químicas que compiten simultáneamente. Estas burbujas se desprenden del líquido y al atravesar la escoria, producen su espumado. Sin embargo, [13] asegura que la generación de grandes volúmenes de burbujas de CO solo representa una condición necesaria pero no suficiente para lograr la formación de una escoria espumosa estable, pues también debe cumplirse una segunda condición que consiste en mantener buenas propiedades físicas en la escoria, como alta viscosidad superficial, baja densidad y baja tensión superficial. Propiedades que según [14] se logra incrementando el índice de basicidad binaria de la escoria y disminuyendo la temperatura; pues, disminuye el límite de saturación de los óxidos básicos en la escoria como los son: CaO y MgO.

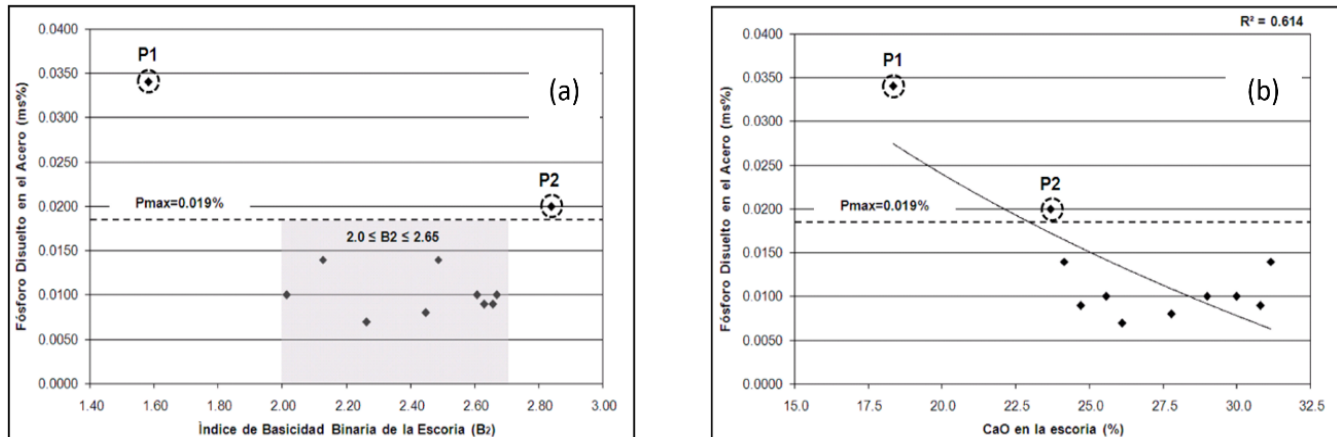
La saturación en ambos compuestos, garantiza a su vez, la formación de precipitados de segunda fase sólidas, como los son  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  y magnesita-wüstita, que son esenciales para una adecuada espumación de la escoria. Bajo este contexto, [15] indica que la estabilidad de la escoria espumosa lograda con los precipitados de segunda fase sólidas, se debe a que dichos elementos tienen una tensión superficial menor que la matriz de escoria insaturada, actuando como núcleos mejorando así la adsorción y retención de burbujas de CO generadas.

En la Fig. 1, también se puede notar que un aumento excesivo de las partículas sólidas (con el incremento de del índice de basicidad binaria), genera una disminución en el espumado de la escoria, en donde las paredes refractarias del horno quedarían totalmente expuestas a la radiación del arco eléctrico generado por los electrodos. Este comportamiento fue estudiado por [16], donde revela que es debido a dos condiciones: una alta basicidad de la escoria y bajo intervalo de solidificación de las partículas suspendidas.

Ambas condiciones se tienen que satisfacer, pues al aumentar la basicidad de la escoria, disminuye la fluidez de la misma, que traduce en dificultad de movimiento de las partículas. Pero, si el intervalo de solidificación de estas partículas es bajo, estas se mantienen menos tiempo en estado semilíquido, por lo que solidifican con gran facilidad. Esto conlleva a un aumento de partículas solidificadas en la superficie del baño, y finalmente un aumento de la viscosidad, lo que tiende a producir una escoria sólida con pocos beneficios metalúrgicos y poca o ninguna protección al refractario. Bien lo plantea [11] en señalar que una escoria parcialmente líquida está conformada por una fracción líquida y una fracción sólida. Mientras mayor sea la fracción sólida, la fluidez de la escoria disminuye y cambia de “cremosa” a “espumosa”, y eventualmente a “costrosa” o “sólida”.

Por el contrario, la adición de muy poco óxido refractario; es decir, valores bajos del índice de basicidad binaria de la escoria, produciría una escoria muy fluida con pocos beneficios metalúrgicos y altamente agresiva para el refractario. De modo, que manteniendo un índice de basicidad binaria en un rango comprendido entre 2 y 2,6 durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, según el análisis anterior resulta la mejor opción para minimizar el desgaste prematuro del material refractario. También se encontró que a través de dicho rango de operación del índice de basicidad, se garantiza una disolución del P en el acero dentro de las especificaciones de

calidad del producto, que para el tipo de acero en estudio (ASTM A 1018), el porcentaje en masa del P máximo permitido es 0,019% (ver Fig. 2). Como es de esperarse, a mayores índices de la basicidad de la escoria menor será la disolución del P en el acero líquido, ya que se aumenta el contenido de CaO en la escoria, que reacciona químicamente con el pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ , producto de la oxidación del fósforo), para formar fosfatos estables que permanecen en la escoria. Para una mayor apreciación véase la Fig. 3, donde claramente se muestra el efecto que tiene el contenido de CaO de la escoria en el P disuelto en el acero, descrito anteriormente.



**Fig. 2. Relación del P disuelto en el acero con: (a) índice de basicidad binaria de la escoria y (b) contenido de CaO en la escoria.**

Tanto en la Fig. 2.a, como la Fig. 2.b, se identificaron dos puntos (P1 y P2), los cuales se encontraron por encima de la especificación máxima permitida del P disuelto en el acero. Siendo el punto P2, el que más ruido hace dentro del análisis, pues para dicho punto el índice de basicidad de la escoria fue mayor en comparación al resto de los datos y además el contenido de CaO en la escoria estuvo muy similar en aquellos puntos donde el P disuelto en el acero se encontró dentro de la especificación.

Al analizar en detalle las condiciones termodinámicas por las cuales se obtuvieron los puntos P1 y P2, se encontró que en ambos casos la temperatura en el acero fue relativamente superior en comparación con el resto de los datos, tal y como se visualiza en la Fig. 3, en donde a medida que se aumenta la temperatura del acero mayor será la disolución del P en el mismo; pues, la energía libre de Gibbs de la reacción de desfosforación aumenta, en magnitud positiva por lo que el fosfato de cal tiende a ser menos estable, permitiendo así, la liberación del pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) de la escoria y este puede ser reducido por el carbono y/o el hierro disuelto en el acero líquido. Es por este motivo, que el punto P2, se obtuvo un P disuelto en el acero fuera de especificación a pesar de haber mantenido un índice de basicidad binaria de la escoria dentro del rango de estabilidad. Este efecto también ocurre con el punto P1, solo que este tiende a ser mucho más significativo; pues a parte de poseer una alta temperatura ( $1642^{\circ}C$ ), el índice de basicidad binaria de la escoria se mantuvo relativamente bajo (1,58) y el contenido de CaO en la escoria fue de 18,38%; condiciones termodinámicas que no son las más óptimas para beneficiar la desfosforación del acero.

Por el contrario, la mejor opción para beneficiar la desfosforación del acero es mantener una basicidad binaria entre 2 y 2,60 y además mantener la temperatura del acero en un rango comprendido entre  $1530$  y  $1570^{\circ}C$ . Bajo estas condiciones fue que se obtuvo un elevado coeficiente de distribución del fósforo entre la escoria y el acero, dentro de las especificaciones del producto, además de garantiza los requisitos principales de protección del material refractario (con una adecuada formación de escoria espumosa), tal y como se aprecia tanto en la Fig. 2, como en la Fig.3.

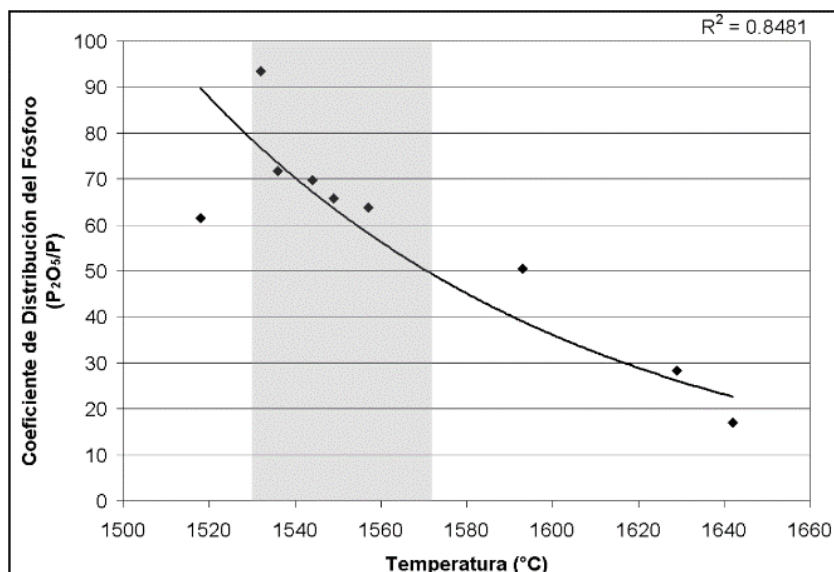


Fig. 3. Efecto de la temperatura en el coeficiente de distribución del fósforo entre la escoria y el acero.

### B.Experimentación con el Modelo de Cal Mezcla

El sistema integral del modelo, está concebido de tal forma, para que el índice de basicidad binaria de la escoria se controle a través del modelo de predisposición del flujo de cal mezcla y para ello, es necesario disponer en línea del dato de la composición química tanto de la materia prima HRD como de la cal mezcla por colada de acero a fabricar. Pues, solo se disponen de una muestra que se recolecta de forma especial en el turno N°1 y al operar el modelo con dicho dato, considerando que el mismo se mantiene invariante en el tiempo, se pierde precisión en la estimación arrojado por el modelo.

A manera de validación, en la Fig. 4, se muestra una comparación entre flujo de cal estimado con el modelo mediante la química de la muestra recolectada en el turno N° 1 (siendo este flujo el empleado por los fundidores) y el flujo de cal estimado con el modelo mediante la química de la muestra recolectada en el turno N° 2, durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en HEA. Como se puede notar existe una diferencia entre ambos flujos estimados por el modelo, el cual se debe al porcentaje de SiO<sub>2</sub> contenido en el HRD, pues en la muestra recolectada en el turno N° 1, fue de 3,9%, mientras que por el contrario en la muestra recolectada en el turno N° 2, fue de 3,5% (siendo esta química correspondiente a la colada en producción), habiendo una diferencia de 0,4%.

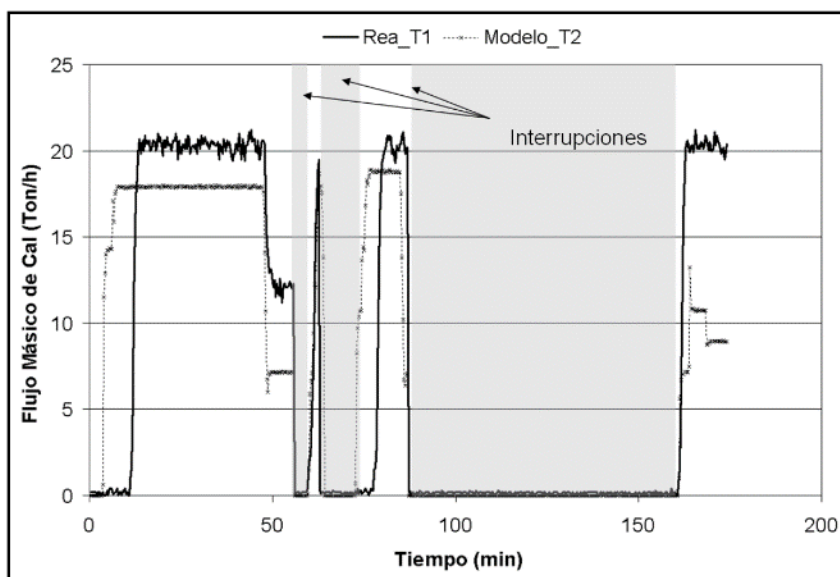


Fig. 4. Comparación entre los flujos estimados por el modelo, durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en HEA.

Evidentemente, al considerar un contenido de  $\text{SiO}_2$  mayor que la química real de la colada en producción, el modelo predispondrá un mayor consumo de cal, obteniendo un índice de basicidad binaria de 2,26 y que con los flujos de HRD empleados por el fundidor del horno, se logró alcanzar una temperatura de  $1532^\circ\text{C}$ , al finalizar la etapa fusión. Bajo estas condiciones, según lo analizado se favorece la desfosforación del acero, el cual permitió conseguir una disolución del P en el acero de 0,007%; muy por debajo de la especificación (que para este acero es de 0,015%); pero con un alto consumo de cal por encima del requerido. Por tal motivo, se estima que al considerar el modelo de cal con la química real, con los mismos flujo de HRD empleados por el fundidor, se tendría un menor consumo de cal, al mismo tiempo que se tendría un mayor P disuelto en el acero, pero que dicha diferencia sería tal que aún se mantendría dentro de la especificación de calidad del producto.

### C. Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de HRD

En la sección anterior se presentó el efecto que tiene el flujo de HRD en la temperatura del acero; ésta afecta las condiciones termodinámicas en la desfosforación del acero y por ende la calidad del mismo. Condición, que al no garantizarse una vez finalizada la etapa de fusión del proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, en donde ya se ha fundido casi el 70% de la carga metálica, implicaría aumentar los tiempos de procesamiento del acero y con ello disminución de productividad. Por ello la importancia de contar un modelo que permita la predisposición del flujo de HRD lo más eficiente y óptimo posible.

Para ello, fue necesario determinar las variables de entradas que se miden en tiempo real y que tenga mayor efecto en el flujo de HRD. En este sentido, se encontró que la interacción del indicador ITHD con la energía específica tiene un efecto estadísticamente significativo con respecto a los flujos de HRD, tal y como se puede observar en la Fig. 5. En donde los mayores valores del indicador ITHD fuera de la estabilidad (mayores a 1,5%), son generados manteniendo un alto flujo de HRD y bajo consumo de energía específica aproximadamente 475 Kwh/ton. Efecto mejor conocido como “embaucamiento del horno”, el cual ocurre cuando se está suministrando un exceso de carga metálica (en este caso HRD) que con la energía aportada no es capaz de fundirlo por completo y más si el porcentaje de ganga contenido en este material tiende a ser alto, pues como indica [17], los elementos que conforman la ganga (especialmente  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) tienen alto punto de fusión. Causando una concentración significativa de toneladas de HRD en el centro del horno, justamente en las paredes adyacentes de los electrodos, reduciendo la formación de espuma, debido a un fenómeno de superficie que rompe las burbujas de monóxido de carbono. Dejando así, descubierto el arco eléctrico y en este sentido el incremento de los valores del indicador ITHD.

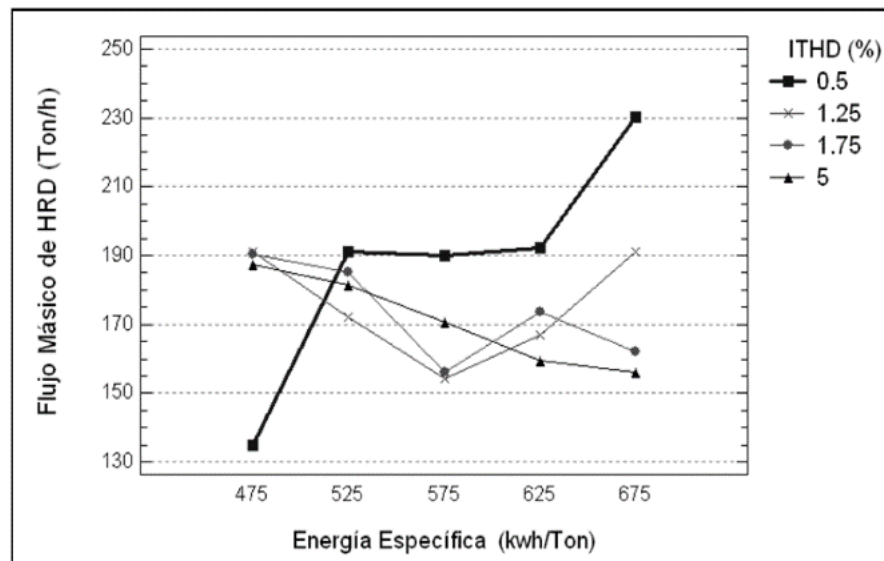


Fig. 5. Variabilidad del flujo de HRD con respecto a la energía específica y el indicador ITHD.

También se observó alto valores del indicador ITHD fuera de la estabilidad, a medida que se disminuye el flujo de HRD y se incrementa el consumo de energía específica. En este caso, debido a que se está suministro mayor energía al requerido para fundir la carga metálica, por lo que parte de esta energía es aprovechada y/o utilizada para



aumentar la temperatura del acero líquido. En donde, aumenta el oxígeno disuelto en el acero y simultáneamente aumenta el FeO en la escoria, y más aun manteniendo el consumo de carbón bajo, donde la cinética de reducción del óxido de hierro es desfavorecida. Se desfavorece así la formación de escoria espumosa teniendo a fluidizarla, originando que el volumen de la misma sea reducido (menores a 60 cm) y se incrementan las perturbaciones dentro del horno y más aún si se trabaja con arcos largos. En donde se tendría pocos beneficios metalúrgicos y un desgaste brusco del material refractario.

Sin embargo, este efecto tiende a ser significativo dependiendo del tiempo que se mantenga el horno bajo esas condiciones. Es por ello, que los fundidores de las diferentes cuadrillas que operan el horno eléctrico, frecuentemente proceden a disminuir el flujo de HRD (en un tiempo relativamente corto) minutos antes de finalizar la etapa fusión. De tal manera, que permita lograr una temperatura adecuada aun manteniendo la estabilidad de la escoria espumosa, en condiciones aceptable. Este comportamiento lo puede visualizar en la Fig. 5, siguiendo la línea correspondiente a los valores del indicador ITHD en el rango de 1,25%, hasta llegar a los bajos flujos de HRD (aproximadamente 150 Ton/h) con un consumo de energía específica de aproximadamente 575 Kwh/Ton.

En resumen, la mejor opción para manejar los flujos de HRD que garantice la temperatura ideal del acero, sin incrementar los valores del indicador ITHD fuera de la estabilidad y con ello una eficiente formación de escoria espumosa que permita la protección del material refractario durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, sería incrementar los flujos de HRD a medida que se incrementa el consumo de energía específica (cuya condición se reflejada en la Fig. 5, con la línea de mayor grosor correspondiente a los valores del ITHD igual a 0,5%), permitiendo que la corriente eléctrica se transfiera directamente al baño líquido para aprovechar el calor durante todo el ciclo del proceso, garantizando así el uso de posiciones más alta de control de potencia sin necesidad de aumentar la carga térmica (por radiación) en las paredes refractarias del horno.

Bajo este contexto, debido al efecto que tienen tanto el indicador ITHD como la energía específica en el flujo de HRD, ambos se consideraron como variables de entradas en el diseño del modelo. Otras de las variables de entradas que se tomaron en cuenta en este modelo, lo representa el flujo de las materias primas: cal, oxígeno y carbón. En un estudio anterior realizado por [18] se analizaron los efectos principales del flujo de las materias primas sobre el indicador ITHD. Donde se encontró que el consumo de cal tiende a aumentar los valores del indicador ITHD; mientras que el consumo de coque y el oxígeno tienden a disminuirlo. De modo, que estos flujos de las materias primas, si tienen un efecto en el indicador ITHD, y como este si evidenció tener un efecto estadísticamente significativo con respecto al flujo de HRD. Entonces, en el diseño del modelo matemático basado en la red neuronal artificial, para una predisposición más eficiente, también se consideró como variables de entradas las correspondientes al flujo de las materias primas.

#### D. Topología del Modelo de la Red Neuronal Artificial

El modelo de predisposición de flujo másico de HRD se llevó a cabo mediante una técnica de control inteligente; específicamente, la técnica de ANN, por tener mayor aplicación en el campo del modelado del comportamiento no lineal y variante en el tiempo del proceso de aceración primaria en hornos eléctricos. El patrón elemental para el entrenamiento de la red; con el propósito de predecir un flujo de HRD óptimo durante la etapa fusión del proceso aceración primaria, corresponde aquella colada de acero que logro en menor tiempo cumplir con las especificaciones requeridas y que son mantener valores en promedio del indicador ITHD menores a 1,5%; la carga total entre 210 y 250 Ton, temperatura del acero entre 1535 y 1570°C, energía específica menor a 540 Kwh/Ton y el porcentaje en masa del P disuelto menor a la especificación del acero (que varía según el tace).

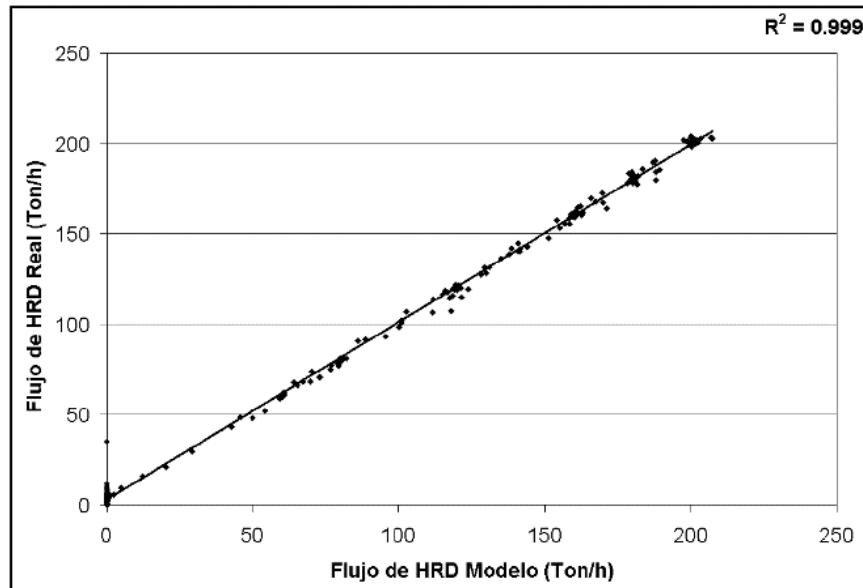
El mejor entrenamiento y predisposición del modelo, se obtuvo empleando en el diseño de la red neuronal artificial, una topología del tipo NARX en conexión serie-paralelo, con 32 entradas, una capa oculta de 6 neuronas y considerando una función d activación del tipo lineal tanto en la capa oculta como en la capa de salida y con un delta de tiempo de 6 segundos.

Matemáticamente, el modelo basado en la red neuronal artificial, se puede expresar a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{M}_{HRD} = \left( \sum_{n=1}^6 W_n^2 \cdot \left( \sum_{m=1}^{32} W_{nm}^1 \cdot X_m \right) + b_n^1 \right) + b^2 \quad (2)$$

Donde;  $M_{HRD}$ , flujo másico de HRD (ton/h);  $w_n^2$ , pesos de la capa de salida;  $w_{nm}^1$ , peso de la capa oculta;  $b_n^1$ , tendencias de la capa oculta;  $b^2$ , tendencia de la capa de salida y  $X_m$ , entradas de la red.

Los valores de pesos y tendencias tanto de la capa oculta como de la capa de salida, son coeficientes que como permiten el control y predisposición del horno eléctrico, por normativa de la empresa los mismos no pueden ser publicados en el presente documento. Sin embargo, a manera de apreciación, en la Fig.6, se muestra la correlación ( $R^2=0.9$ ) existente entre el flujo de HRD real (patrón de entrenamiento) y el flujo de HRD estimado por el modelo una vez entrenado.



**Fig. 6. Comparación entre el flujo de HRD real y el flujo de HRD predicho por el modelo matemático de la red neuronal.**

#### **E.Pruebas Fuera de Línea del Modelo Matemático de Validación y Ajuste**

Se hicieron pruebas con coladas de acero, donde se empleó un patrón de flujo de HRD con un nivel de eficiencia bueno durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria, el cual permitió cumplir en gran medida con las especificaciones de la colada al finalizar la etapa (ver tabla 1).

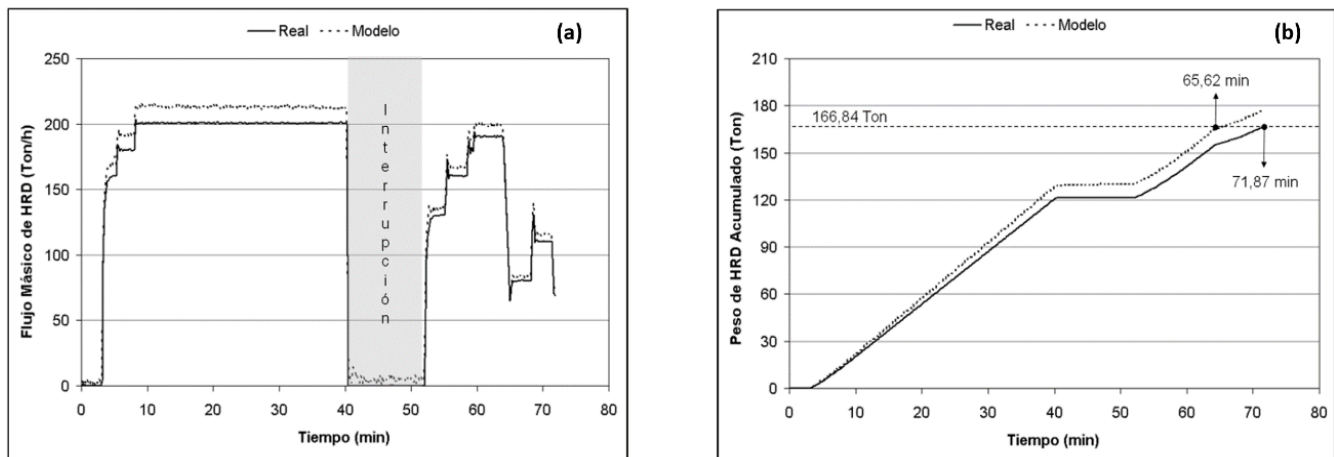
**Tabla 1. Resultados de emplear un patrón del flujo de HRD con un nivel de eficiencia bueno durante la etapa fusión durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico.**

<b>P en acero (%)</b>	<b>C en el acero (%)</b>	<b>ITHD (%)</b>	<b>Carga Total (Ton)</b>	<b>Energía Especifica (Kwh/Ton)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
0.007	0.073	1.63	216.84	560.60	1557

Considerando los patrones de entradas empleados en dicha colada, se predice el flujo de HRD ideal a través del modelo propuesto, este comportamiento se puede visualizar en la Fig. 7.a. Como se puede notar, el flujo de HRD predicho por el modelo tiene una tendencia a estar relativamente por encima del flujo real, según la energía suministrada al horno. Se estima que una de las causas que favorece dicho comportamiento, se debe a una disminución de la temperatura del baño metálico con el incremento del caudal de HRD, para beneficiar la estabilidad de la escoria espumosa. Debido a que, mientras mayor sea la temperatura, tiende a que la escoria sea muy fluida, originando que el espesor de la misma disminuya, por lo que las perturbaciones dentro del horno serían presenciadas y más

aún si se trabaja con arcos largos, como se trabaja en la etapa de fusión.

Otra causa, lo representa el aumento del contenido de FeO en la escoria, pues a medida que se incrementa el flujo de HRD, se incrementa el contenido de FeO en la escoria, generado con la inyección de oxígeno y al reaccionar con el hierro disuelto en el acero líquido, para luego ser reducido con el carbono, produciendo CO y de esta forma dar ciclo al proceso de formación de escoria espumosa; aportando energía química que ayuda a la fusión acelerada del HRD. Ante este argumento se justifica el incremento del flujo de HRD estimado por el modelo en este tipo de coladas, ya que garantiza mantener valores de ITHD estables durante el proceso de aceración en la etapa fusión, además de cumplir con el resto de las variables operativas finales del proceso e incluso en menor tiempo de procesamiento, tal y como se puede apreciar en la Fig. 7.b. En donde, se nota claramente que para llegar al mismo peso de HRD obtenido con el flujo de HRD real, que en este caso es 166,84 Ton; el modelo logra llegar al mismo tonelaje de HRD, pero un tiempo (65,62 min) significativamente menor en comparación con el tiempo que se obtiene empleado el flujo real que fue 71,87 min. Lográndose con ello una disminución del tiempo de procesamiento del acero en un orden del 8%.



**Fig. 7. Comparación del dato real con el dato estimado por modelo: (a) considerando el flujo de HRD y (b) considerando el peso de HRD**

Por otra parte, es muy importante destacar que el consumo de cal obtenido con el modelo fue de 20,94 Ton; siendo este valor menor en comparación con el consumo de cal obtenido con flujo real empleado por el fundidor durante la etapa de fusión del proceso de aceración primaria; que fue de 22,70 Ton. Este último, generó que el índice de la basicidad binaria de la escoria fuera un poco alto (2,5); cuyo valor a una temperatura del acero adecuada de 1557°C (obtenido gracias al patrón eficiente del HRD empleado en esta colada), permitió obtener una condición termodinámica eficiente para que ocurra la desfosforación del acero. Donde el P disuelto del acero (ver tabla 1) estuvo muy por debajo de la especificación del producto que es 0,015%. De modo que a través del modelo de predisposición del flujo de cal mezcla, en combinación con el modelo de predisposición del flujo de HRD, se estima un consumo mucho más eficiente e incluso menor (en un orden del 5.28%) al obtenido con la predisposición empírica del fundidor, en donde quizás se hubiese aumentado un poco el contenido del P disuelto en el acero, pero aún valor tal que aún se mantendría dentro de la especificación del producto final.

### **A. Impacto sobre la Producción de Acero a partir del Modelo Matemático Propuesto**

En la sección anterior se obtuvo por medio del modelo matemático desarrollado, el dato referente al ahorro estimado que se tendría en cuanto al tap to tap (tiempo de fabricación de acero) y el consumo de cal mezcla promedio por colada. Al considerar el impacto que tiene en la fabricación de acero anualmente, el resultado es verdadera muy significativo, tal y como se detalla en la tabla 2. En dicha tabla, se especifica el impacto que tiene el modelo sobre la productividad del proceso. En donde, evidentemente al disminuir el tap to tap en un promedio de 8,89 min por colada (estimado por el modelo), se logra aumentar la productividad del horno, pasando de 94,29 a 101,37 ton/h.

En el mismo orden de ideas, considerando el hecho de que el operador logró fabricar 2647 coladas con un tiempo promedio de 127.7 minutos, el modelo pudo haber mejorado el tiempo de fabricación a un promedio de 118.38

minutos por colada, por lo que hubiese fabricado adicionalmente 199 coladas para llegar a un total de 2845 coladas. Así pues, asumiendo que cada colada tiene un peso de 200 ton, a través de modelo se logra aumentar las toneladas de acero líquido producido con una diferencia de 39744,45 toneladas; adicionales al utilizado por el fundidor.

**Tabla 2. Comparación de producción de acero líquido acumulado desde enero 2014 - diciembre 2015.**

Indicadores	Unidades	Valor Real	Valor Estimado	Desviación
Tap to Tap	(min)	127.7	118.38	-8.89
Productividad	(Ton/h)	94.29	101.37	7.08
Nro. Coladas Fabricadas	----	2647	2845	199
Acero Producido	(Ton)	529302	569046.45	39744.45

#### IV.CONCLUSIONES

1.La aplicación de la técnica de control inteligente basado en ANN, permite modelar el comportamiento no lineal del proceso de aceración primaria en horno eléctrico, en este caso, ideal para la predisposición del flujo de HRD.

2.El modelo matemático propuesto, permite predisponer un flujo de HRD y cal mezcla durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, que asegura la condición termodinámica ideal para la protección del material refractario y desfosforación del acero.

3.La formación de una escoria balanceada (espumosa) ideal para una desfosforación efectiva y protección del material refractario durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, se logra bajo una condición termodinámica ideal: una temperatura en el rango de 1535 a 1575 °C, el indicador ITHD menores a 1,5% y un índice de basicidad binaria comprendido entre 2 y 2,6.

4.El sistema integral del modelo matemático propuesto basado en un control inteligente de proceso dinámico, estima una reducción del Tap To Tap en torno al 7,08%, una reducción del consumo de cal en 5,28% y un aumento de la productividad en torno al 7,51%.

#### REFERENCIAS

- [1]Asociación Latinoamericana del Acero, "Alacero", [En línea]. Available: [https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/proceso\\_siderurgico.pdf](https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/proceso_siderurgico.pdf). [Último acceso: 04 Julio 2020].
- [2]F. Morral, E. Jimeno y P. Molera, Metalurgia general, Barcelona: Reverté, 1985.
- [3]B. Bucciarelli, G. Torga, F. Sabugal, F. Díaz y M. Lardizabal, "Evolución en el control del fósforo en la acería de Ternaris SIDERCA", de 18a Conferencia de acería del IAS, Rosario, Santa Fe, 2011.
- [4]S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 4ta ed., México: Pearson educación, 2002.
- [5]M. Oropeza, J. López, A. Pérez y J. Ucar, "Contribuciones para el control del fósforo cuando se utiliza mineral reducido de hierro", Revista metalurgia, vol. 35, n° 2, pp. 479-490, 2008.
- [6]J. Castro y F. Echeverría, Introducción a las técnicas de computación inteligente, 1era ed., Venezuela: Universidad de los andes, 2001.
- [7]A. Sadeghian y J. Lavers, "Application of radial basis function networks to model electric arc furnaces", IJCNN, vol. 6, pp. 3996-4001, 1999.
- [8]J. Brito, "Diseño de un control automatizado para la alimentación de cal mezcla en función del HRD para ajustar la basicidad binaria de la escoria del horno eléctrico #1 de la acería de planchones de Ternium SIDOR", trabajo de grado inédito, 2008.
- [9]A. Zambrano, V. Collazo, N. Troncone y J. Rodríguez, "A computer tool for closed-loop dynamical system identification through artificial neural networks", Universidad, Ciencia y Tecnología (UCT), vol. 16, n° 64, pp. 190-202, 2012.

- [10]E. Moreno, Tecnología de producción del ferrosilicio, 3era ed., Venezuela: Ferroatlántica de Venezuela, 2005.
- [11]C. García, "Optimización del proceso de formación de escoria espumosa en los hornos eléctricos de acerías de planchones de Sidor", trabajo de grado inédito, UNEFM, Punto Fijo, 2011.
- [12]M. Rojas, "Estudio del consumo de cal, coque, oxígeno y HRD en el proceso de formación de esocria epsumosa en el HE-5 de la acería de planchones de Sidor, C.A.", trabajo de grado inédito, UNEXPO, Puerto Ordaz, 2012.
- [13]R. Morales, R. Lule, F. López, J. Camacho y J. Romaero, "The slag foaming practice in EAF and its influence on the stelmaking shop productivity", ISIJ International, vol. 35, n° 9, pp. 1054-1062, 1995.
- [14]W. García, "Implementación de prácticas de escorias espumosa en los EAF de la acería eléctrica de planchones de Sidor, C.A.", trabajo de grado inédito, USB, Caracas, 2002.
- [15]S. Alameddine, B. Bowman, S. Paege y P. Stafford, "Innovation in EAF and in steelmaking processes", de AIM, Milano-Italia, 2009.
- [16]J. Mateos, "Análisis y optimización de costes en una planta de procesado y producción de acero", trabajo de grado inédito, UC3M, Madrid, 2010.
- [17]A. Conejo y J. Cárdenas, "Energy consumption in the EAF with 100% DRI", AISTECH Proceeddings, vol. 1, pp. 529-535, 2006.
- [18]M. Rojas, O. Prado, O. Carvajal y R. Higuerey, "Impacto del consumo de cal, coque, oxígeno y HRD en la formación de escoria espumosa durante el proceso de aceración primaria en hornos de arco eléctrico", Universidad, Ciencia y Tecnología (UCT), vol. 17, n° 67, pp. 134-140, 2013.

## RESUMEN CURRICULAR



**Marlon Rojas**, Magister Scientiarum en Ingeniería Metalúrgica, venezolano. Destacado profesional con 9 años de experiencia en el área de automatización desarrollando modelos matemáticos basados en inteligencia artificial aplicados a la mejora continua de los procesos de producción siderúrgicos.




**Olga Prado Leivas**, Graduada en Matemáticas Industriales en la UCV, venezolana. Su vida profesional se desarrolla tanto en la industria como en la docencia. En la industria siderúrgica desde hace más de 30 años, dirige proyectos para el desarrollo e implementación de modelos matemáticos para la operación de grandes máquinas. En la docencia ha trabajado en varias facultades de ingeniería impartiendo cursos de análisis, métodos numéricos y diseño experimental tanto a nivel de pregrado como de postgrado. El punto de unión de estos dos mundos lo logra a través de sus tesis, dirigiendo sus proyectos de tesis, logrando ellos en muchos casos, los más altos reconocimientos por sus proyectos.



**Octavio Carvajal**, Ingeniero químico con diploma en siderurgia del instituto argentino de siderurgias (IAS), venezolano. Tiene 23 años de experiencia en instalaciones siderúrgicas con tecnologías EAF-LF-CC.



**Alejandro Zambrano**, Ingeniero electrónico, venezolano. Posee 10 años de experiencia en el diseño, desarrollo e implementación de modelos de control de procesos para industria siderúrgica.


$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

## Proyectos de ingeniería y paradigmas educativos

**Ceballos Bejarano Edison Wernher**  
eceballos@unsa.edu.pe  
<https://orcid.org/0000-0002-6830-0355>  
Universidad Nacional de San Agustín de  
Arequipa, Perú

**Huaita Bedregal Asencio Alejandro**  
ahuaita@unsa.edu.pe  
<https://orcid.org/0000-0003-2819-1745>  
Universidad Nacional de San Agustín de A  
requipa, Perú

**Recibido (08/07/21), Aceptado (10/08/21)**

---

**Resumen:** La ingeniería forma parte de una de las carreras con más visión para el futuro de las industrias. En este trabajo se evalúan los principios elementales de los proyectos de ingeniería en la educación universitaria y se establecen los criterios mínimos que debería tener un proyecto de ingeniería para que el futuro profesional desarrolle las habilidades necesarias para su desempeño como ingeniero. Se realiza entonces una revisión bibliográfica de la enseñanza en ingeniería y la formulación de proyectos que hacen posible el desarrollo de habilidades prácticas.

---

**Palabras Clave:** Metalurgia Prácticas de ingeniería, proyectos académicos, industria 4.0.

## Engineering projects and educational paradigms

---

**Abstract:** Engineering is part of one of the most forward-thinking careers in industries. In this work, the elementary principles of engineering projects in university education are evaluated and the minimum criteria that an engineering project should have are established so that the future professional develops the necessary skills for their performance as an engineer. A bibliographic review of engineering education is then carried out and the formulation of projects that make the development of practical skills possible.

---

**Keywords:** Engineering practices, academic projects, industry 4.0.





## I. INTRODUCCIÓN

La educación en ingeniería es clave para el futuro de la economía, ya que su impacto en los procesos industriales, será crucial en el futuro inmediato. De ahí que se evalúen de forma casi urgente, los procesos y metodologías educativas aplicadas hasta el momento para el desarrollo de proyectos en los programas de ingeniería.

Un proyecto educativo es por sí mismo un reto para cualquier profesión, pero en el caso de las ingenierías resulta un poco más complejo de concebir, ya que un proyecto debe cumplir con ciertas características para que el futuro profesional desarrolle las habilidades necesarias para los requerimientos de la industria, que es cambiante en sí misma [1], [2].

La industria moderna, conocida como industria 4.0 [2], [3], trae consigo las exigencias de ingeniería que antes no eran visibles, pues se incorporan aplicaciones tecnológicas, que permiten la globalización de sistemas, visiones más complejas de los procesos, con integración de productos, servicios y consumidores.

En este trabajo se exponen las revisiones bibliográficas entorno a la educación y su avance metodológico a lo largo de la historia, además se toman en cuenta las enseñanzas en ingeniería y las mejoras necesarias para la formación de profesionales aptos y capaces para la industria moderna. Se exponen tres secciones además de esta, el desarrollo donde se describen los aspectos teóricos del tema, la metodología donde se exponen los fundamentos metodológicos llevados a cabo durante el proceso de revisión, finalmente se presentan los resultados y las conclusiones.

## II. DESARROLLO

### La transformación digital y la educación 4.0

En el escenario actual del mercado laboral, el uso de herramientas digitales ha ido en ascenso, no solo a nivel de presencia en las diferentes áreas productivas, sino también a nivel de complejidad y de importancia [4]. En este sentido, las universidades que ofertan carreras de ingeniería se encuentran ante un escenario desafiante, ya que son estas carreras las que precisamente requieren de una reestructuración más urgente y más profunda tanto en su enfoque como en las metodologías de enseñanza-aprendizaje que deben emplearse [5]. La idea no solo es garantizar la empleabilidad de los estudiantes mediante el desarrollo de las habilidades y las destrezas requeridas por los empleadores, sino también mantener el enfoque de ciudadanos que aporten valor a la sociedad en la cual habiten [6].

En este punto, incluso el paradigma de las relaciones laborales como hasta el momento se han concebido y puesto en práctica, está experimentando profundas revisiones. Esto se debe a que las transformaciones sociales, políticas, económicas y laborales que están resultando de la masificación de las telecomunicaciones y el acceso a internet junto con los avances en inteligencia artificial, realidad aumentada, impresiones 3D, miniaturización de sensores, entre otros, conducen a nuevas formas de producción y consumo de bienes y servicios; a una mayor conciencia acerca de autonomía personal y laboral, además de nuevos enfoques acerca de la movilidad, la ecología y la sostenibilidad medioambiental entre muchos otros aspectos dentro de la sociedad.

Es en este contexto, donde se están viviendo profundos cambios en todo sentido en períodos de tiempo relativamente cortos, donde los estudiantes de ingeniería deben formarse. Entonces, bajo estas circunstancias no es suficiente conocer los fundamentos de la ingeniería sino también saber operar las tecnologías que se requieren para cumplimentar un perfil que se adecue a las nuevas circunstancias [6]. La revolución digital hace posible el advenimiento de las denominadas fábricas inteligentes, en donde se aplican e integran las tecnologías de la Industria 4.0 [4]. Es aquí donde los ingenieros, los encargados de la operatividad de las plantas de producción requieren de un conjunto de habilidades que no están alineadas con los programas educativos de la mayoría de las universidades actuales [7]. Esta realidad es de conocimiento de las mismas casas de educación superior, y por ello, luego de múltiples acercamientos a la problemática entorno a esta situación, se ha concluido que:

- Los países que queden atrás en la adopción de estrategias adecuadas para el mejoramiento del talento humano en función de los nuevos paradigmas económicos y productivos tendrán menos oportunidades de crecimiento y diversificación productiva. Si logran un acercamiento positivo en este sentido a los nuevos paradigmas productivos las oportunidades de crecimiento son muy potentes.

- Que el enfoque de la enseñanza en ingeniería requiere de metodologías y procedimientos flexibles y novedosos, que permitan a los estudiantes ser competentes en entornos cambiantes, donde la enseñanza continua, el aprendizaje autónomo y emprendimiento serán normalizados. Esto requiere de esfuerzos tanto a nivel alta como de baja tecnologías de enseñanza [8].

- Que, para poder lograr resultados positivos y sostenibles en el tiempo, los programas de extensión entre las universidades y las empresas deben derivar a otros modelos mucho más pertinentes y efectivos [4].

- Se necesita de un personal docente y administrativo con un nivel calidad superior a los actuales. Esto se traduce en una mejor preparación tanto en habilidades blandas como en habilidades técnicas.

- Los esfuerzos de las universidades y de las empresas para transitar hacia nuevos modelos productivos serían insuficientes sin políticas clara de los estados en apoyo a estas circunstancias socioeconómicas emergentes [9].

### **La enseñanza en ingeniería dentro de la revolución industrial**

La enseñanza de ingeniería en la revolución digital y de cara a la pertinencia del talento humano en la implementación de la fabricación inteligente mediante los paradigmas de la industria 4.0 se centrarían en los siguientes aspectos:

- Enfoque tecno-científico de la enseñanza de las bases y principios de ingeniería junto con habilidades digitales tales como programación y simulación de procesos.

- Los programas de extensión académicas enfocadas en la pertinencia de las empresas de cara a un mercado tanto local como global, apoyando las posibilidades de innovación productiva, buscando potenciar las ventajas competitivas identificadas mediante el empleo y construcción de tecnología.

- Aprendizaje interdisciplinar, potenciando la integración de conocimientos de diferentes ingenierías como el conocimiento mecánico y de resistencia de materiales en disciplinas computacionales.

Se debe recalcar la importancia del enfoque interdisciplinar como base en el aprendizaje integral de los estudiantes de ingeniería. Esto debido a la tendencia evidente de la fusión de disciplinas dentro de las dinámicas económicas actuales. Como hace una década se hizo evidente el requerimiento de profesionales con conocimientos de electrónica y mecánica integradas, del cual se generaron los perfiles de los primeros ingenieros mecatrónicos, en la actualidad, perfiles como ingenieros computacionales con conocimiento avanzados en electrónica y matemáticas están generando los perfiles de los científicos de datos. Esto muestra que el enfoque general será desarrollar habilidades tanto científicas como tecnológicas dentro de los entornos tanto universitarios como naturales de los estudiantes.

La variable de tiempo, del arco de aprendizaje será de carácter fundamental. Por ello la flexibilización de los entornos de enseñanza-aprendizaje se hacen obligatorios. Por ello los requerimientos tecnológicos se han diversificado y aún quedan por delinarse las futuras tendencias a este respecto, que estará, sin duda desarrolladas por estos nuevos ingenieros.

Otro punto a recalcar es la necesaria integración entre las Instituciones de educación superior, públicas y privadas junto con el sector industrial y empresarial de las naciones como de los organismos del estado encargados de la producción y la educación para abordar los desafíos que se desprenden de la digitalización de la producción y de la economía. El diseño de los programas debe ser ajustados tanto en pertinencia social como profesional, apuntando al desarrollo de las destrezas y habilidades digitales necesarias para la operación de nuevas industrias con mayor presencia tecnológica, ajustando los elementos funcionales y complementándolos con pasantías efectivas en las empresas locales.

Resulta evidente la necesidad de una red de conocimientos multidisciplinarios para afrontar esta nueva tendencia educativa, lo que requerirá de profesionales en ciencias de la ingeniería, en computación, matemáticas, electrónica entre otros para crear una visión conjunta en lo referente a las metodologías más adecuadas para la enseñanza en ingeniería, haciendo uso de los enfoques tanto presenciales como remotos (e-learning, b-learning, etcétera).

### **III.METODOLOGÍA**

En este trabajo se ha realizado una búsqueda bibliográfica con el fin de conocer los desafíos de la educación para los programas de ingeniería, y se ha buscado con detenimiento, aquellos criterios necesarios que deben tener los proyectos para alcanzar una formación del ingeniero apta para afrontar los retos de la industria moderna.

Se realizó un proceso de revisión de documentos académicos, científicos, actas de congresos, material académico que ofrecen aportes en temas de educación e ingeniería, y que permiten contrastar los fundamentos industriales con los currículos educativos.

La revisión estuvo organizada según los elementos de la figura 1, donde se observa una selección de material a partir de los objetivos previos, que definen el tema de estudio, y que en este caso, están enmarcados entorno a las nuevas metodologías educativas que favorecen al profesional de la ingeniería, para la industria 4.0.

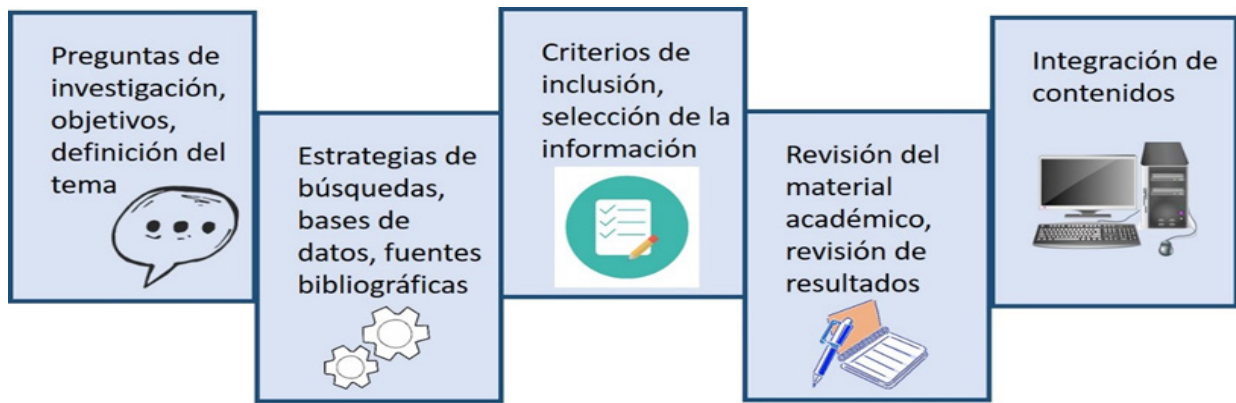


Fig. 1. Elementos metodológicos del proceso de revisión bibliográfica.

La selección y revisión de material científico, se fundamentó en la evaluación de resultados que reflejaran las necesidades de proyectos de ingeniería más actualizados a las necesidades sociales, industriales, médicas, y que sirvieran de apoyo efectivo a las demás áreas profesionales. Además, se consideró los aspectos necesarios que deben incorporarse en el proceso de enseñanza para poder atender las exigencias actuales de ingeniería.

#### IV.RESULTADOS

Un proyecto de ingeniería es un conjunto de elementos científicos y técnicos que se elabora para hacer ciclos de pruebas, que conduzcan a una solución para una necesidad de la sociedad. De tal manera que un proyecto de ingeniería no es simplemente concebir una idea, sino que deben argumentarse teorías científicas, modelos, pruebas, entre otros para lograrlo.

En ingeniería existen dos tipos principales de proyectos:

1. Proyectos por innovación
2. Proyectos por evolución.

En el caso de los proyectos por innovación, se definen como aquellos en los que se predicen las necesidades sociales, y se pueden realizar sistemas o máquinas que ofrezcan las prestaciones necesarias para situaciones específicas del entorno humano.

Por su parte, los proyectos por evolución, son aquellos en los que se requiere un proceso sistemático para alcanzar sus objetivos, en este tipo de proyectos, se toman en cuenta los procesos evolutivos del caso, y se va progresando en función a las mejoras de cada fase del proyecto (fig. 1).

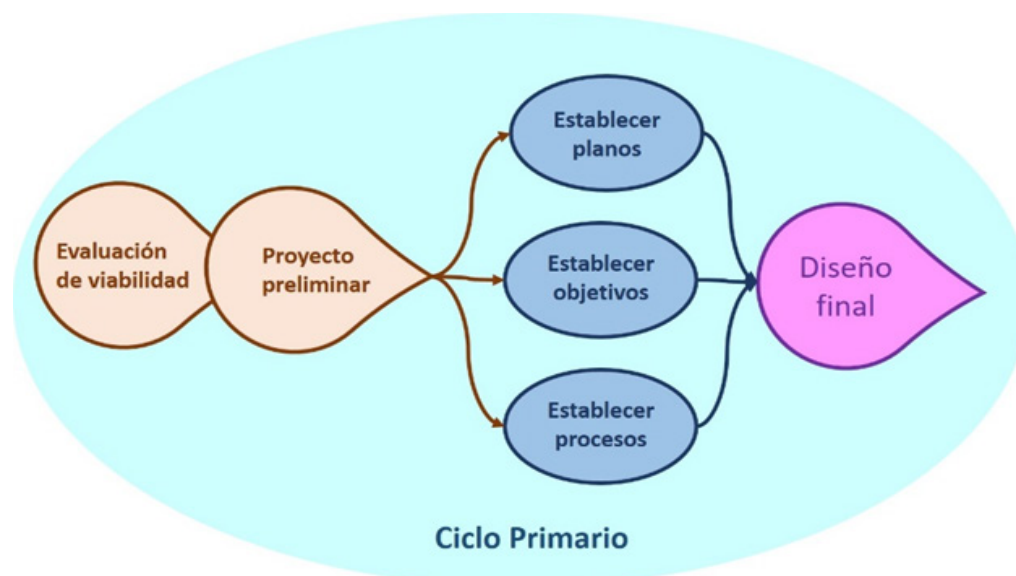


Fig. 2. Ciclo primario del proyecto por evolución.

El proyecto por evolución consta de dos fases, la primera es un ciclo primerio que incluye una revisión cuidadosa de las viabilidades de acción para la ejecución del proyecto, además se deben definir los criterios científicos y teóricos que sustentarán el tema de estudio. En esta primera fase se establecen los objetivos y el alcance del proyecto, y se establece un diseño final de ejecución.

A partir de este diseño final, se definen los criterios para la puesta en marcha de la fase final del proyecto con las consideraciones de cambio necesarias y con todos los aspectos clave para la ejecución efectiva del proyecto.

Con las nuevas metodologías de enseñanza, resulta necesario el uso de las herramientas tecnológicas para mejorar cada fase del proyecto. Además, las posibilidades de comunicación online son más efectiva y permiten la integración de equipos multidisciplinario y

multiculturales, lo que concede una mayor posibilidad de éxito del proyecto, con enfoques que enriquecen las variantes del tema y que fortalecen los resultados.

Los proyectos de ingeniería para las nuevas tendencias educativas, exigen habilidades múltiples por cada persona, ya no es suficiente con el dominio específico de las áreas de ingeniería, ya resulta indispensable que se complementen los aprendizajes en áreas blandas, en áreas de software y en áreas de integración globalizada de procesos y sistemas.

La industria 4.0 exige profesionales cada vez más capaces, con diversas habilidades que le permitan impulsar la industria, desarrollar sistemas y procesos acordes a las necesidades cambiantes de los consumidores. En la figura 2 se muestran los criterios mínimos que debe tener un proyecto de ingeniería en los nuevos paradigmas de la educación.



**Fig. 3. Nuevos desafíos de los proyectos académicos de ingeniería.**

#### IV. CONCLUSIONES

1. La educación actual requiere ciertos cambios para las mejoras del profesional en ingeniería, ya que las necesidades industriales y sociales, son cada vez más elevadas, y exigen la integración de procesos y sistemas, portabilidad, rapidez de respuestas, y digitalización de datos. Además, la educación, desde su modelo tradicional, aplicado hasta el presente, requiere de metodologías más abiertas, adaptables, versátiles, integradas, y globalizadas, que faciliten el aprendizaje remoto.

2. Los proyectos de ingeniería no deben desligarse de los desarrollos científicos, pese a que se ha hecho costumbre en muchas partes, el desarrollo de ingeniería sin modelos o procesos matemáticos que lo sustente, y

se ejecutan máquinas, equipos y sistemas sin la profundidad científica necesaria.

3. Los proyectos de ingeniería deben ser concebidos para su ejecución en pro de las actividades humanas, que permitan satisfacer las necesidades y el futuro de la sociedad. De ahí que, una visión apropiada del entorno, ofrezca alternativas de innovación que contribuyan de diferentes maneras los escenarios sociales.


4. Un proyecto de ingeniería multicultural y multidisciplinario, puede ser la mejor manera de encaminar el éxito de un tema de estudio, y su diversidad de posturas, de seguro permitirá enriquecer las alternativas de solución del problema.

5. Las reformas educativas para la elaboración de

proyectos de ingeniería, es necesaria para lograr que el nuevo profesional de ingeniería, desarrolle las debidas competencias para la industria moderna, y además sea apto para la globalización de productos y servicios.

## REFERENCIAS

- [1] A. Olaya, *Bioinformática como recurso educativo: Proyecto de ingeniería*, Córdoba: Universidad de Córdoba, 2018.
- [2] L. Antoni, *La Industria 4.0 en la sociedad digital*, Barcelona: Marge Books, 2019.
- [3] d. V. José, «Industria 4.0: la transformación digital de la industria,» Universidad de Deusto, Deusto.
- [4] G. Mendizábal y A. Escalante, «El reto de la educación 4.0: competencias laborales para el trabajo emergente por la covid-19,» *RICSH*, vol. 10, nº 19, pp. 261 - 283., 2021.
- [5] R. Ramírez-Mendoza, R. Morales-Menendez, H. Iqbal y R. Parra-Saldivar, «Educación en Ingeniería 4.0: - propuesta para un nuevo currículo,» de EDUCON, Conferencia Global de Educación en Ingeniería de la IEEE 2018, 2018.
- [6] T. P. Ngoc y N. M. Tri, «Desarrollar la educación superior en el contexto de la revolución industrial 4.0,» *Multicultural Education*, vol. 7, nº 6, pp. 208-217, 2021.
- [7] A. Benešová y J. Tupa, «Requisitos para la educación y calificación de las personas en la industria 4.0,» *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 2195-2202, 2017.
- [8] C. Huerta y M. Velázquez, «Educación 4.0 como respuesta a la Industria 4.0: un estudio analítico-descriptivo,» *Ciencia Latina*, vol. 5, nº 1, 2021.
- [9] R. L. Katz, «Capital humano para la transformación digital en América Latina,» CEPAL, 2018.
- [10] R. Pallás-Areny, «LA INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y LA MEDICINA,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Ramon-Pallas-Areny/publication/239813249\\_La\\_Ingenieria\\_electronica\\_y\\_la\\_medicina/links/0deec539fea82baf03000000/La-Ingenieria-electronica-y-la-medicina.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ramon-Pallas-Areny/publication/239813249_La_Ingenieria_electronica_y_la_medicina/links/0deec539fea82baf03000000/La-Ingenieria-electronica-y-la-medicina.pdf). [Último acceso: 27 diciembre 2021].
- [11] H. Medellín, G. González, R. Espinosa, E. Govea y T. Lim, «Desarrollo de Aplicaciones de Realidad Virtual y Sistemas Hápticos en Ingeniería, medicina y arte,» de *Ciencias de la Ingeniería y Tecnología*, San Luis Potosí-Mexico, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2014, pp. 77-93.
- [12] S. Chris, E. Ray, J. Andrew y L. Jason, «Designing cranial implants in a haptic augmented reality environment,» *Communications of the ACM*, vol. 47, nº 8, pp. 33-38, 2004.
- [13] G. Sabine, K. Erwin y G. Bernd, «Advances in interactive craniofacial surgery planning by 3D simulation and visualization.,» *Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 24, pp. 120-125, 1995.
- [14] P. Philipp, G. B. Alexander, P. Andreas, V. S. Norman, P. Bernhard, P. Andreas, H. Karl-Heinz, T. Ulf, S. Ingo y H. Max, «Virtual Dental Surgery as a New Educational Tool in Dental School,» *Journal of Cranio- Maxillo-Facial Surgery*, vol. 38, pp. 560-564, 2010.
- [15] C. Castañeda y F. Vázquez, «Realidad Virtual, un apoyo en la Terapia de Acrofobia, Claustrofobia y Agorafobia,» de *Memorias del VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2011)*, Cuernavaca Morelos, México., 2011.
- [16] F. Suárez, O. Flor y L. Rosales, «Sistema de interpretación de conductas para identificación de situaciones de riesgo,» *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, vol. E31, pp. 309-317, 2020.
- [17] La importancia de las letras, «La historia de la educación,» 2010. [En línea]. Available: <http://historiageneraldeeducacion.blogspot.com/2010/03/historia-de-la-educacion-conclusion.html>. [Último acceso: 27 11 2021].
- [18] V. Guichot, «HISTORIA DE LA EDUCACIÓN: REFLEXIONES SOBRE SU OBJETO, UBICACIÓN EPIS-TEMOLÓGICA, DEVENIR HISTÓRICO Y TENDENCIAS ACTUALES,» *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, vol. 2, nº 1, pp. 11-51, 2006.
- [19] K. Zambrano, «Línea de tiempo de la historia de la educación,» 13 septiembre 2018. [En línea]. Available: [https://prezi.com/p/oashlaqm\\_uxn/linea-del-tiempo-historia-de-la-educacion/](https://prezi.com/p/oashlaqm_uxn/linea-del-tiempo-historia-de-la-educacion/). [Último acceso: 24 noviembre 2021].
- [20] M. Begoña Tellería, «Educación y nuevas tecnologías. Educación a Distancia y Educación Virtual,» *Revista de Teoría y Didáctica de las Ciencias*, nº 9, pp. 209-222, 2004.
- [21] R. Nieto, «EDUCACIÓN VIRTUAL O VIRTUALIDAD DE LA EDUCACIÓN,» *Rev.hist.educ.latinoam*, vol. 14, nº 19, 2012.
- [22] S. Levy, D. Romero y R. Pasini, «Implementación práctica del agilismo en proyecto de Ingeniería de Software,» de *XLV Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa*, Argentina, 2016.


$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$