

revista politécnica

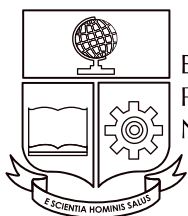


ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 44, No. 2 - Enero 2020

revista politécnica



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 44, No. 2 - Enero 2020

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (física, química y matemática) e ingenierías (agroindustria, ambiental, civil, eléctrica, electrónica, geología, mecánica, petróleos, sistemas y química). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITOR

Oscar Eduardo Camacho, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

Co-EDITORIA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Santiago Arellano
Chalmers University of Technology, Suecia

Ph.D. Carlos Avila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Silvia Calderón
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Jean François Dulhoste
Universidad de los Andes, Venezuela
Dr. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Carlos Gallardo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Victor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Edinzo Iglesias
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba

Ph.D. Diego Ordoñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. José Luis Paz
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Gabriel Salazar
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Pablo Samaniego
Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Francia

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Hebertt Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Carlos Smith
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Sebastian Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Cristian Vallejo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Marcos Villacis
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Cesar Witt
Université des Sciences et Technologies de Lille, Francia

La Revista Politécnica está incluida en Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR).

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec
Teléfono: (+593) 2976300 ext. 5220

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres.

Diseño de Portada

Ing. Santiago Otalima

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Vicerrectora de Investigación, Innovación y Vinculación

Alexandra Alvarado, Ph. D.

Rectora

Florinella Muñoz, Ph. D.

Vicerrector de Docencia

Iván Bernal, Ph. D.

PALABRAS DEL EDITOR

En este primer número del año 2020, la Revista Politécnica presenta 6 trabajos realizados por importantes investigadores sobre diversos temas asociados con la ingeniería Eléctrica y Electrónica. Estas contribuciones destacan por su alcance y contenido científico y poseen una aplicación potencial en nuestro entorno.

El primer artículo es realizado por Valencia y Arcos. En este trabajo, muestran un proceso para aplicar el método de las imágenes en una carga localizada en un medio de tres capas de diferente permitividad. Las imágenes se obtienen mediante el análisis de las condiciones de borde del campo eléctrico entre diferentes capas. Los resultados del método propuesto se contrastan con los obtenidos mediante la aplicación del método de elementos finitos con el programa FEMM 4.2. Se presentan también las limitaciones del método, principalmente relacionadas con la dependencia del valor de carga de las imágenes con las coordenadas donde se calcula el potencial. El modelo obtenido es aplicado a diferentes casos, donde se observa que el mismo puede ser utilizado para problemas de una y dos capas. Finalmente, se implementa la condición de Dirichlet, en la cual se aplica un voltaje nulo a una de las fronteras, con lo cual se demuestra que el método de las imágenes también puede ser utilizado en este tipo de problemas.

En el segundo trabajo, Jaramillo, Fonseca y Pérez detallan en su documento dos métodos para determinar la distribución de la corriente entre la tierra y el cable de guarda en condiciones de desbalance, con el cual es posible seleccionar los parámetros eléctricos para la modelación adecuada de una línea de transmisión. Los resultados de estos métodos, aplicados en cuatro casos de estudio, se verifican en su respectiva simulación en el software Alternative Transients Program (ATP).

En el tercer documento, Cuasapaz y colaboradores presentan la estimación de los parámetros de secuencia: positiva, negativa y cero, de un transformador trifásico de 50 kVA, 6300 - 231/133 V, a partir de mediciones de eventos de fallas monofásicas a tierra y bifásicas a tierra; con ajustes de curvas simuladas y medidas utilizando métodos de optimización no lineal mediante MATLAB-Simulink. Con el objetivo de ajustar estas curvas simuladas con respecto a las medidas, se utilizó la herramienta “Parameter Estimation” de MATLAB-Simulink, la cual varía los parámetros del modelo hasta obtener la menor diferencia entre los valores simulados versus los medidos. Una vez probado el método se trabaja en el transformador de 50 kVA para obtener sus parámetros de secuencia generando eventos de fallas alimentando el lado de alto voltaje a 500 V debido a las condiciones físicas del laboratorio.

Peñaherrera, y Reinoso describen la evaluación de la técnica OPS (Orthogonal Pilot Sequence) para la reducción de la PAPR en un sistema OFDM con canal multitrayecto. Para la evaluación se consideran dos tipos de canales multitrayecto selectivos en frecuencia, con y sin línea de vista. Se evalúa la técnica OPS

obteniendo la gráfica del BER (Bit Error Rate) vs Eb/No (energy per bit to noise power spectral density ratio) y la gráfica de la CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function) para distintos parámetros. Los resultados muestran una reducción de la PAPR cuando se utiliza la técnica OPS y una mejora en el BER.

En el quinto artículo, Moreano, Cajamarca y Tenicota realizan un trabajo donde presentan un sistema de visión por computador en el cual se pretende usar a las hileras de cultivo como marca de navegación para un vehículo agrícola, emulando el comportamiento de un robot seguidor de línea. Una cámara de resolución media toma 30 fotogramas por segundo para que posteriormente un algoritmo procese las imágenes eliminando problemas de perspectiva, luz ambiental y obstáculos en el cultivo para identificar eficientemente la hilera de cultivo que se encuentra precisamente debajo del vehículo. Obtenida la marca de navegación y realizando una aproximación de las dimensiones longitudinales de la realidad con las dimensiones longitudinales en píxeles de las imágenes, se puede obtener un estado estimado del vehículo respecto a la marca antes identificada.

En el último artículo desarrollado por Vallejo, Benavides y Pozo, un circuito combinado, como una nueva metodología para uso de convertidores para operación en cuatro cuadrantes que utilizan la configuración de LUO, basado en el modelo propuesto por Luo y Hong Ye es desarrollado. La combinación combina dos circuitos diferentes, cada uno funciona para controlar dos de los cuatro cuadrantes o modos, respectivamente. Se presentan resultados de simulación para el sistema propuesto con el fin de verificar sus características y funcionalidad.

Anhelamos que el contenido de este volumen sea de utilidad para los lectores de la Revista Politécnica y la comunidad científica.

Queremos invitarlos a leer estos 6 artículos, y expresarles nuestro profundo agradecimiento a todos los autores por su colaboración.

Deseamos a todos un año lleno paz, amor, salud y prosperidad.

Oscar Eduardo Camacho Quintero, Ph.D.

EDITOR

CONTENIDO
Vol. 44, No. 2
Noviembre 2019 – Enero 2020

7

Fausto Valencia; Hugo Arcos

Method of Images for a Charge inside a Three-Layer Medium and Implementation of a Dirichlet Border Condition

Método de las Imágenes para una Carga en un Medio de Tres Capas e Implementación de la Condición de Dirichlet

15

Daniela Jaramillo; Antonio Fonseca; Fabián Pérez

Metodología para Determinar la Distribución de Corrientes de Desbalance en Líneas Aéreas de Transmisión de Energía Eléctrica

Methodology to Determine the Distribution of Unbalanced Currents of Overhead Electric Power Transmission Lines

25

Oscar Cuasapaz; Juan Ramírez; Fausto Avilés; Nelson Granda; Franklin Quilumba
Estimación de los Parámetros de Secuencia de un Transformador Trifásico utilizando Métodos de Optimización no Lineal

Sequence Impedance Parameter Estimation of a Three-Phase Transformer using Nonlinear Optimization Methods

35

María Peñaherrera; Diego Reinoso

Evaluación de OPS para la Reducción de la PAPR en un Sistema OFDM con Canal Multitrayecto

Evaluation of OPS for PAPR Reduction in an OFDM System with Multipath Channel

43

Gabriel Moreano; Julio Cajamarca; Alex Tenicota

**Agricultura de Precisión: Preprocesamiento y Segmentación de Imágenes para
Obtención de una Ruta de Navegación Autónoma Terrestre**

*Precision Agriculture: Preprocessing and Segmentation of Images
to Obtain an Autonomous Land Navigation Route*

51

Jefferson Vallejo; Vanessa Benavides; Marcelo Pozo

Combined Circuit Model for a Four Quadrant Operating Luo-Converter

*Modelo de Circuito Combinado Para Operación en Cuatro Cuadrantes, Convertidor de
Luo*

Method of Images for a Charge inside a Three-Layer Medium and Implementation of a Dirichlet Border Condition

Valencia, Fausto^{1*} ; Arcos, Hugo¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Faculty of Electrical Engineering, Quito, Ecuador

Abstract: A process to apply the method of images for a charge located in a three-layer medium is presented. The images are found according to the boundary conditions between the layers for the electric field. The characteristics of the electric potential are also considered, thus the number of unknown variables becomes a guide to set the image charges needed to solve the problem. The results are compared with finite element simulations through the use of the software FEMM 4.2, showing good agreement. The found limitations of the process are also noted, mainly in regards to the dependence of the images on the coordinates where the field is to be calculated. The model obtained was applied to different cases, where it was seen that it was not limited to three material media only. Finally, the null potential boundary condition was applied, showing how the method of images could be applied to this type of problems.

Keywords: Computational electromagnetics, electrostatic analysis, electric potential, nonhomogeneous media, numerical models, permittivity.

Método de las Imágenes para una Carga en un Medio de Tres Capas e Implementación de la Condición de Dirichlet

Resumen: En el presente artículo, se presenta un proceso para aplicar el método de las imágenes en una carga localizada en un medio de tres capas de diferente permitividad. Las imágenes se determinan mediante el análisis de las condiciones de borde del campo eléctrico entre diferentes capas. También se considera el comportamiento del potencial eléctrico, de esta manera, se logra tener el mismo número de ecuaciones y de incógnitas para la determinación del valor de las imágenes. Los resultados del método propuesto se contrastan con los obtenidos mediante la aplicación del método de elementos finitos con el programa FEMM 4.2. Se presentan también las limitaciones del método, principalmente relacionadas con la dependencia del valor de carga de las imágenes con las coordenadas donde se calcula el potencial. El modelo obtenido fue aplicado a diferentes casos, donde se observó que el mismo puede ser utilizado para problemas de una y dos capas. Finalmente, se implementó la condición de Dirichlet, en la cual se aplicó un voltaje nulo a una de las fronteras, con lo cual se demostró que el método de las imágenes también puede ser utilizado en este tipo de problemas.

Palabras clave: Métodos computacionales en electromagnetismo, análisis electrostático, potencial eléctrico, medios no homogéneos, modelos numéricos, permitividad.

1. INTRODUCTION

Electrostatics is an important subject of Electromagnetic Theory that contributes to the understanding of complex phenomena and industrial applications such as high voltage breakdown (Abdel, 2018), aerosol particles (Kawada, 2002), or the analysis of molecular surfaces (Bulat, 2010). For this reason, some numerical techniques to solve electrostatics problems have been developed and are still under investigation. See, for example (Tausch, 2001) for the Method of Moments, (Karkkainen, 2001) for the Finite Difference Method or (Hamou, 2015) for the Finite Element Method. The Finite Element Method (FEM) is the most used method in electromagnetics research as it may be seen in the number of publications found in the scientific community. It solves the Laplace equation, taken as a boundary-value problem (Jin, 2017). However, this very characteristic of being able to solve bounded problems is, sometimes, its weakest feature, because

solving unbounded problems could become extremely difficult; in fact, some attempts are still being done to solve unbounded problems as seen in (Cao, 2016).

On the other hand, the Method of Images (MOI) is very suitable to solve unbounded problems, which is the reason why it has been used in the analysis of transmission lines (Bracken, 1976), or grounding systems (Dawalibi, 1994). But the method has not been developed for bounded problems, which is a great disadvantage in regards with the bounded methods seen before. This has made the method to be disregarded even though it has good features like speed of solution or implementation simplicity.

In the face of that, this paper shows a process to get the images for a charge located inside a medium that contains three different materials. Then, the model is simplified in order to apply a null potential boundary condition.

fausto.valencia@epn.edu.ec

Recibido: 18/07/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/tp.vol44n2.01

2. DETERMINATION OF THE CHARGE IMAGES

A charge is immersed in a three-layer medium, with permittivity ϵ_1, ϵ_2 , and ϵ_3 , as seen in Figure 1. The charge is located in the first layer, at the point (d, x) , the second layer is h meters width, and the third layer goes towards infinity. The purpose of this analysis is to obtain the electric field and the electric potential on each layer. The procedure is an extension of that presented in (Jackson, 1975).

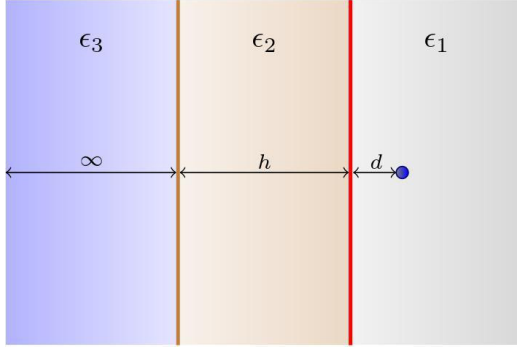


Figure 1. Charge in a three-layer medium

The equations governing the system under analysis, where there is a field E and a charge density ρ , are:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= 0 && \text{The whole space} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho && \text{First layer} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 && \text{Second and third layers} \end{aligned} \quad (1)$$

The border conditions for the frontier between layer 1 (permittivity ϵ_1) and layer 2 (permittivity ϵ_2) are shown in (2) and (3), whereas those for the frontier between layers 2 and 3 (permittivity ϵ_3) are shown in (4) and (5).

$$\epsilon_1 E_{x1} = \epsilon_2 E_{x2} \quad (2)$$

$$E_{y1} = E_{y2} \quad (3)$$

$$\epsilon_2 E_{x2} = \epsilon_3 E_{x3} \quad (4)$$

$$E_{y2} = E_{y3} \quad (5)$$

From (1) to (5) the following criteria come out:

- The null rotational, that comes from the electrostatic nature of the problem, allows for the definition of a potential in all the regions considered.
- Due to the presence of charge only on the first layer, the original charge must be considered exclusively on that layer.
- There are four border conditions, two per each layer division. Hence, four charge images are needed to represent the whole problem.

The four charge images interact with the potential in the way shown in Table I, where Φ_i is the potential for the layer i .

Accordingly, the four images are located as shown in Figure 2. The charge images should be symmetrical at most as possible

to reduce the effect of the y coordinate. As a consequence, the images q_2, q_4 stay at the same point of the original charge q_0 , although their values are not necessarily the same.

Table 1. Characteristics of the Charge Images

Charge Image	Symmetrical to	Potential of influence
q_1	q_0 around the border from layer 1 to layer 2	Φ_1
q_2	q_1 around the border from layer 1 to layer 2	Φ_2
q_3	q_0 around the border from layer 2 to layer 3	Φ_1, Φ_2
q_4	q_3 around the border from layer 2 to layer 3	Φ_3

With all those considerations, the potential Φ for each layer is:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \left(\frac{q_0}{R_0} + \frac{q_1}{R_1} + \frac{q_3}{R_3} \right) \\ \Phi_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \left(\frac{q_2}{R_2} + \frac{q_3}{R_3} \right) \\ \Phi_3 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_3\epsilon_0} \frac{q_4}{R_4} \end{aligned} \quad (6)$$

The position vectors, according to Figure 2, are:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_0 &= (x - d)\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y \\ \mathbf{R}_1 &= (x + d)\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y \\ \mathbf{R}_2 &= \mathbf{R}_4 = \mathbf{R}_0 \\ \mathbf{R}_3 &= (x + d + 2h)\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y \end{aligned} \quad (7)$$

The electric field $\mathbf{E}$ is determined by:

$$\mathbf{E} = \nabla\Phi \quad (8)$$

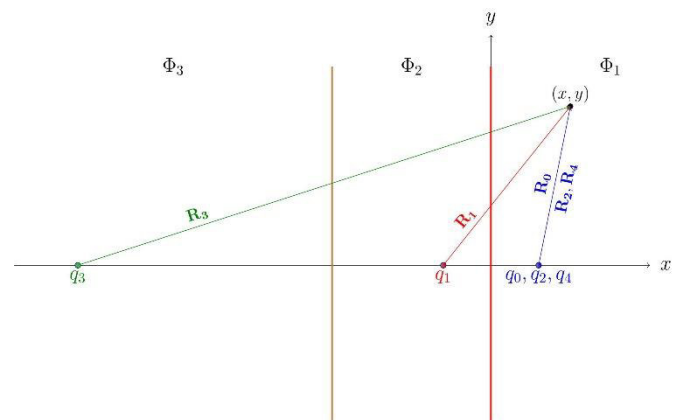


Figure 2. Location of the four charge images and the original charge. The position vectors for the electrostatic analysis in the point (x, y) are also included.

After applying (8), the electric fields for each layer are found with (9). In its derivation, we assumed that the charge images do not vary with any coordinate, neither x nor y . However, after solving the system, it was seen that they indeed depend on the coordinates. Even so, that dependence resulted to be negligible for the case under analysis, and the assumption made in the derivation could be taken for certain.

Nonetheless, each problem should be tested, mainly when the value of the charge inside the first layer is in the order of units of coulombs.

The border conditions are considered in (9). In $x = 0$, (2) and (3) were applied, noting that the module of the vector $R_0 = R_1$. On the other hand, in $x = -h$ the conditions (4) and (5) prevail, with $R_0 = R_3$ at this line. Then, the system of equations (10) is obtained.

After the system is solved, the charge images can be used in (6) and (9) to get the potential and the electric field.

$$\begin{aligned}
 E_{x1} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \left[\frac{q_0(x-d)}{R_0^3} + \frac{q_1(x+d)}{R_1^3} + \frac{q_3(x+d+2h)}{R_3^3} \right] \\
 E_{y1} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \left[\frac{q_0y}{R_0^3} + \frac{q_1y}{R_1^3} + \frac{q_3y}{R_3^3} \right] \\
 E_{x2} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \left[\frac{q_2(x-d)}{R_2^3} + \frac{q_3(x+d+2h)}{R_3^3} \right] \\
 E_{y2} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \left[\frac{q_2y}{R_2^3} + \frac{q_3y}{R_3^3} \right] \\
 E_{x3} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_3\epsilon_0} \left[\frac{q_4(x-d)}{R_4^3} \right] \\
 E_{y2} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \left[\frac{q_4y}{R_4^3} \right] \\
 q_1 + q_2 &= q_0 \\
 q_1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} q_2 + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{R_0^3}{R_3^3} \Big|_{x=0} q_3 &= -q_0 \\
 -q_2 + q_3 + q_4 &= 0 \\
 q_2 + q_3 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} q_4 &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

3. DIRICHLET NULL POTENTIAL CONDITION

If compared with the Finite Element Method, the Method of Images has the disadvantage of not being suitable to treat borders with fixed potential, which are known as Dirichlet border condition. On the other hand, the Method of Images has

the advantage of solving open boundary problems, which is somehow complicated for the Finite Element Method. In order to face this issue, in this research, we used the results of the three-layer model to get a Dirichlet null potential condition in a two-layer medium.

The null potential was placed at $x = -h$, i.e. on the division between the second and third layer. As a result, and to have the same behavior shown by Finite Element simulations, the whole third layer should have a potential of zero volts. In (6), this could be accomplished by setting $q_4 = 0$ or $\epsilon_3 \rightarrow \infty$. The first option brings out some inconsistencies in the border equations (2) to (4). Hence, we opted for the use of the second option by giving an infinite value to the third permeability.

As a parallel consequence, the border conditions force the y component to disappear, since there is no field in the third layer. The same is not truth for the x component, because, as seen in (4), the ratio between the field components in both layers is given by the ratio between each permeability, and so, at infinite permeability, E_{x2} could exist, even though E_{x3} is zero.

4. RESULTS

4.1. Comparison with the finite element method

The results of the Method of Images are compared with those of the software FEMM 4.2 which uses the Finite Element Method.

a) Three - layer médium

A charge of $1 \mu C$, at a distance $d = 0.1 m$ from the division between the first and the second layer is analysed. The second layer has a width $h = 1 m$. The first layer has a relative permittivity of 1, the second layer, 10, and the third layer, 50.

The implementation of the problem in FEMM 4.2 is shown in Figure 3. The problem has been set as axisymmetric, i.e. the geometry rotates around the vertical axis, thus building a sphere. The other option - rectangular geometry - could not be used because the method would create a line instead of a point charge.

Due to the characteristics of FEM, it was necessary to assume a null potential border, which in Figure 3 is represented by an external circle located at 30 m from the charge.

A detailed sample of the results for the potential is shown in Figure 4. The contour lines for the potential are shown at a radius of $0.6 mm$. It is not possible to show a larger area due to the high potential around the charge.

In this figure we could check the inaccuracies present due to the small features of the charge; note that the contours are far from being round locus. Besides, note that the contours are not perpendicular in the point of contact with the vertical axis; as a consequence, there is a horizontal component of the electric field in this point, which does not agree with the real case.

The results of simulations with FEM and MOI for the potential and the electric field are shown in Figure 5 and Figure 6 respectively. Note that those results are very similar, which suggest that the MOI model is close to the actual values. The maximum relative difference is 15% and for the potential and 34% for the electric field. Although those differences seem high, consider that FEM is not very suitable for the simulation of single charges.

b) Two-layer material with the Dirichlet condition

The same problem now is simulated setting the division of the second and third layer with a null potential, which is known as Dirichlet condition.

Figure 7 and Figure 8 show a good agreement between the results for FEM and MOI for the potential and the electric field respectively.

4.2. Analysis of potential and electric field for different configurations

In this section, a charge inside different configurations of material is simulated. In order to show the versatility of the method, not all of the cases are for three-layer media.

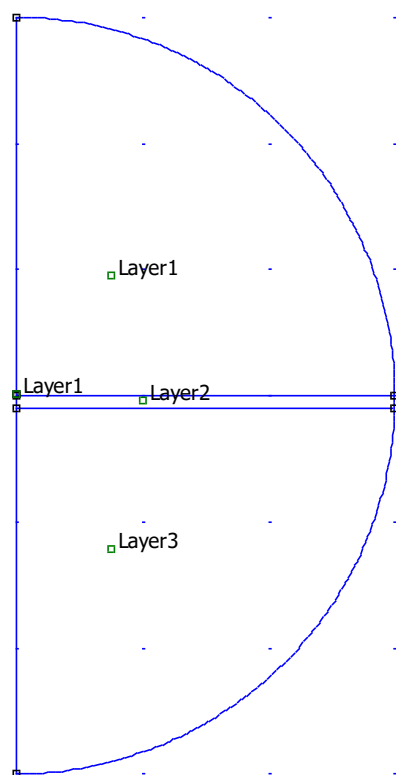


Figure 3. Implementation of the problem of one charge in a three-layer medium for the simulation in FEMM 4.2

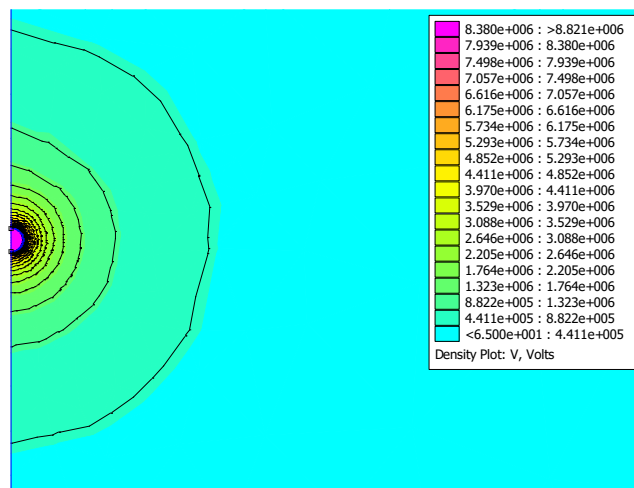


Figure 4. Equipotential lines and potential for the single charge in a three-layer medium.

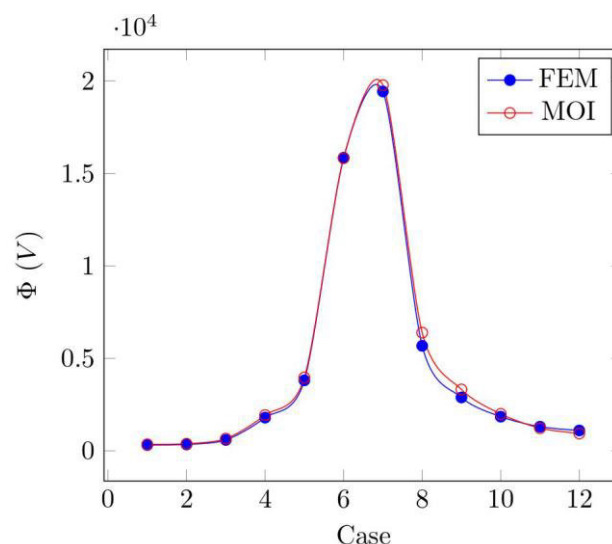


Figure 5. Results for simulation of a charge in a three-layer medium with the finite element method and the method of images.

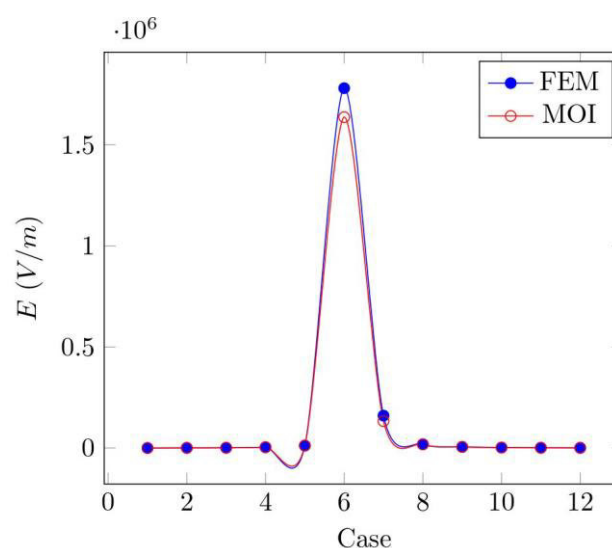


Figure 6. Results for the electric field of simulations with the finite element method and the method of images.

a) Homogeneous medium

The homogeneous medium means that the permittivity is the same for the three-layers. The results are shown in Figure 9. As expected, the field lines go out from the charge and are perpendicular to the potential contours. There is no change in the field, due to the homogeneity of the medium.

b) Two-layer medium $\epsilon_1 < \epsilon_2$

The charge is now inside a medium with two different materials. The relative permittivity of the first layer is 1 and that of the second layer is 10. For three-layer model, this means to set the third and second permittivity with the same value. In this case, the charge was located at 0.5 m from the division of layers for a better appreciation of the results. Figure 10 shows the field and the potential.

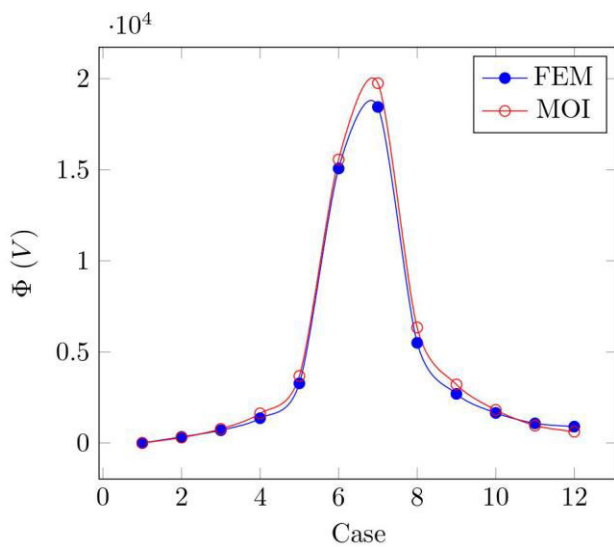


Figure 7. Results of the potential, simulated with FEM and MOI, when the second layer is grounded.

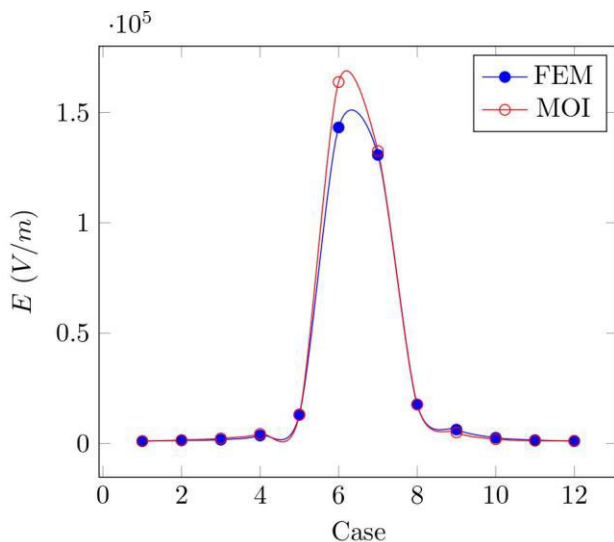


Figure 8. Results of the electric field, simulated with FEM and MOI, when the second layer is grounded

It is evident that the potential has a deviation when touching the second layer. In the same fashion, the electric field changes its direction and opens in the second layer. In the first layer,

the electric field, different from the homogeneous case, is somehow attracted to the second layer. The electric field is not perpendicular to the division of layers, which is logical since the second material is not a conductor.

c) Two-layer medium: $\epsilon_2 < \epsilon_1$

The second layer has a relative permittivity of 1, and the first layer has one of 5. Figure 11 shows the results. The electric field is repelled from the division of layers, and is trying to be tangential at that division. Once the field enters the second layer, it reduces its slope and goes radially to the infinity.

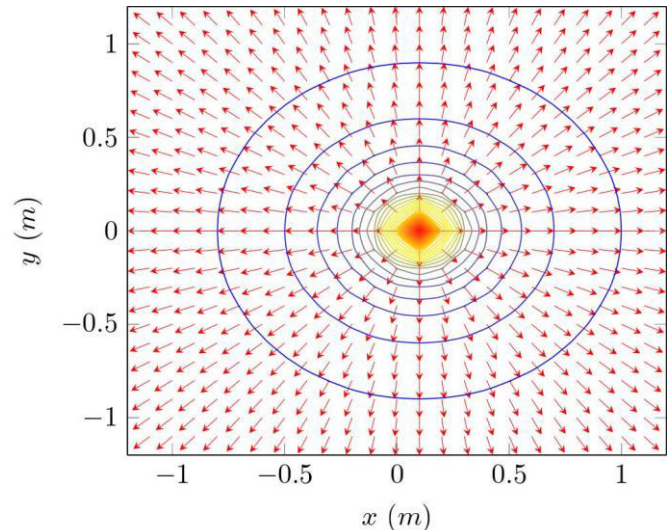


Figure 9. Electric field and potential for a charge on a homogeneous medium.

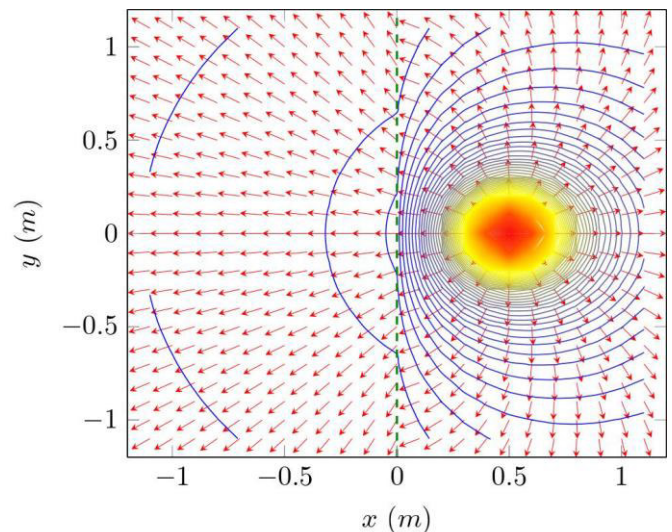


Figure 10. Electric field and potential for a charge inside a two-layer medium, where the permittivity of the first layer is less than that of the second layer.

d) One layer with one extreme grounded

The relative permittivity of the first and second layers was set to 1, and that of the third layer was set to infinite.

The results are exposed in Figure 12. Note how the equipotential contours try to be parallel to the grounded line as

they are closer to it. Finally at the grounded line, the electric field becomes perpendicular.

e) Three layers with different permittivity

The most general case is simulated in this section. The medium contains three layers, each one of different permittivity: 1 for the first layer, 10 for the second layer and 5 for the third layer. Figure 13 shows the result.

In the potential contours we could see the sudden change when the field crosses each layer. In the first layer, the field is somehow attracted to the second layer.

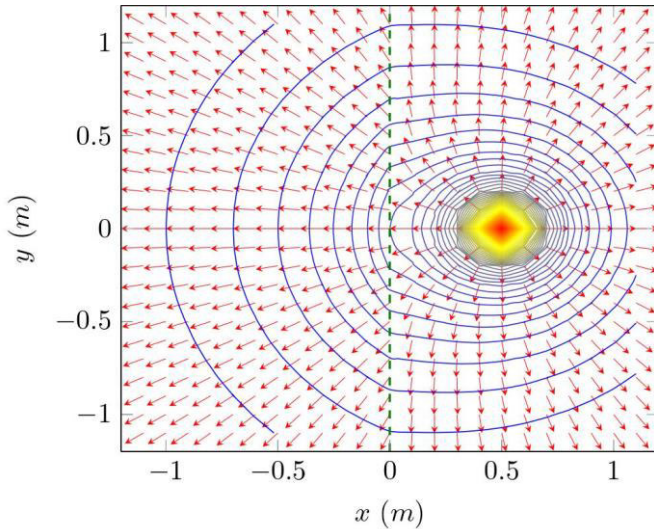


Figure 11. Electric field and potential for a charge inside a two-layer medium, where the permittivity of the first layer is greater than that of the second layer.

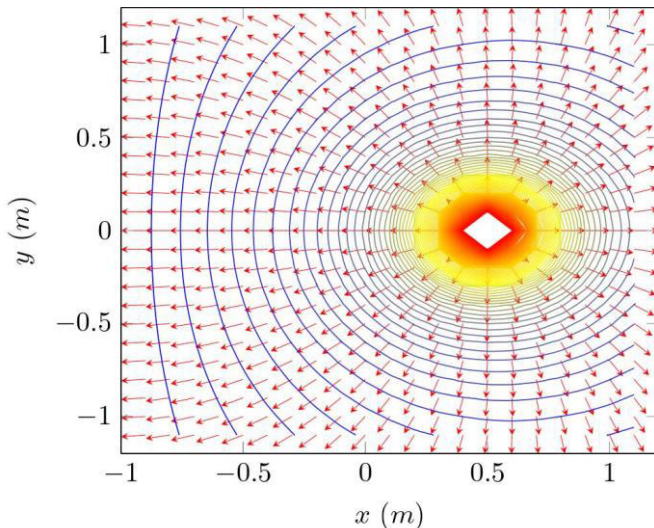


Figure 12. Electric field and potential contours for a charge in a homogeneous medium with the line ($x=-1$) grounded.

f) Two-layers with the second layer grounded

The charge is immersed in a two-layer medium, the second layer is grounded in its farther side. The relative permittivity of the first layer is 1 and that of the second layer is 10, i.e. the two layers are the same as the case before.

The results are shown in Figure 14. The electric field is forced to be attracted towards the null potential, even though, as it was seen in the three-layer case, the field is usually going outside due to the higher permittivity of the second layer. A very important difference with the three-layer case is the influence of the null potential in the values of potential, which are seen to be closer to the charge.

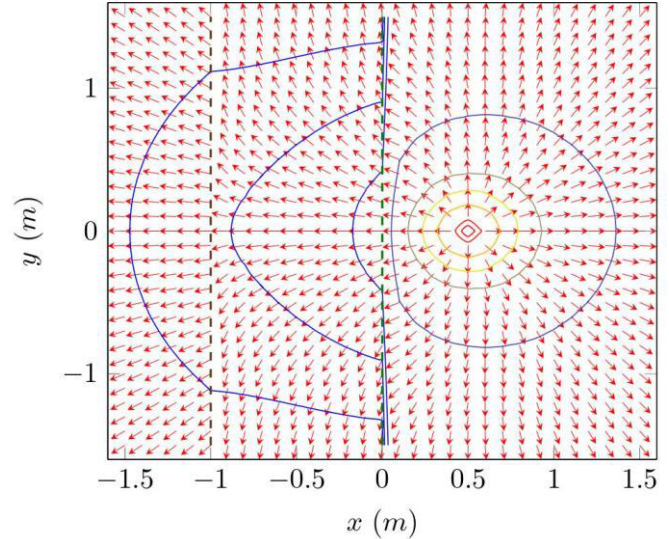


Figure 13. Electric field and potential contours for a charge inside a three-layer medium.

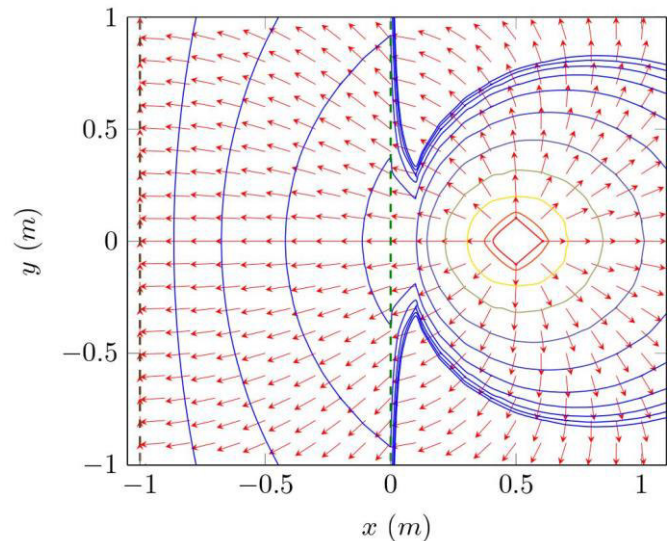


Figure 14. Electric field and potential contours for a charge inside a two-layer medium with the second layer grounded.

5. CONCLUSION

The method of images was successfully applied to a charge inside a three-layer medium. The model has good agreement with the finite element method, and in some extreme cases, represents better the real case, as it was seen when one of the components of the field does not exist.

Once the main equations for the field and potential are set, the determination of the images is straightforward. The implementation of the model does not require advance

programming techniques, because only basic operations are involved.

In the three-layer model, the images depend on the value of the y coordinate where the electrostatic values must be calculated. Although this characteristic could seem to be an obstacle for the application of the method, in the long term it did not affect the results, as it was seen when comparing with FEM.

The Dirichlet condition for a null potential was possible by setting the adequate value of permittivity in the related layer. Thus, by using this technique, the method of images could replicate some problems that are usually analysed only with boundary suited numerical methods. This is an important advantage that allows the method of images to solve bounded and unbounded problems, which is not so feasible in other numerical methods such as finite element or finite difference methods.

The process for the development of the method of images for a charge inside a three-layer medium could be extended to more layers and to different charge configurations, such as lines, capacitor plates, etc.

A complementary analysis could be the application of the process in the analysis of magnetostatic problems where the permeability is variable and the field is not radial but is solenoidal.

REFERENCES

- Abdel-Salam, M. (2018). Electrical Breakdown in Gases, in *High-Voltage Engineering*. CRC Press.
- Bulat, F. A., Toro-Labbé, A., Brinck, T., Murray, J. S., & Politzer, P. (2010). Quantitative analysis of molecular surfaces: areas, volumes, electrostatic potentials and average local ionization energies. *Journal of molecular modeling*, 16(11), 1679-1691.
- Cao, Y., Chu, Y., Zhang, X., & Zhang, X. (2016). Immersed finite element methods for unbounded interface problems with periodic structures. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 307, 72-81.
- Dawalibi, F. P., Ma, J., & Southey, R. D. (1994). Behaviour of grounding systems in multilayer soils: a parametric analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1), 334-342.
- Hamou, N., Massinissa, A., Hakim, A., & Youcef, Z. (2015). Finite element method investigation of electrostatic precipitator performance. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 28(2), 138-154.
- Jackson, J. D., & Zia, R. K. (1977). Classical electrodynamics. *Physics Today*, 30, 61.
- Jin, J. M. (2015). Introduction to the Finite Element Method. *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons.
- Karkkainen, K., Sihvola, A., & Nikoskinen, K. (2001). Analysis of a three-dimensional dielectric mixture with finite difference method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5), 1013-1018.
- Kawada, Y., Kaneko, T., Ito, T., & Chang, J. S. (2002). Simultaneous removal of aerosol particles, NO_x and SO₂, from incense smokes by a DC electrostatic precipitator with dielectric barrier discharge prechargers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35(16), 1961.
- Tausch, J., Wang, J., & White, J. (2001). Improved integral formulations for fast 3-D method-of-moments solvers. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 20(12), 1398-1405.

BIOGRAFÍAS



Fausto Valencia, was graduated as Electrical Engineer and Master in Electrical Engineering both in the National Polytechnic School. He is a full time teacher and is currently developing the research towards obtaining the doctoral degree at the same institution. His fields of interest are high voltage, power system transients and the application of electromagnetic models in Electrical Engineering problems.



Hugo Arcos Martínez, born in Quito, Ecuador, in 1972. He received the Electrical Engineering degree at the National Polytechnic School in 1998, and PhD in Electrical Engineering at the National University of San Juan Argentina in 2003. He has developed his career professionals in various institutions of the Ecuadorian electricity sector and currently serves as Coordinator of the School of Electrical Engineering at the National Polytechnic School. His areas of interest are: Modeling in Electric Power Systems, Studies in steady state and transient and reliability SEP.

Metodología para Determinar la Distribución de Corrientes de Desbalance en Líneas Aéreas de Transmisión de Energía Eléctrica

Jaramillo, Daniela^{1*} ; Fonseca, Antonio¹ ; Pérez, Fabián¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

Resumen: Las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica presentan un régimen de operación constante y deben soportar esfuerzos mecánicos debido a posibles descargas atmosféricas, en este sentido es importante realizar una adecuada selección de sus conductores de fase y de guarda. Para soportar los esfuerzos mecánicos los conductores de guarda tienen un componente de acero que presenta características eléctricas variables en función de la corriente circulante por el mismo, por otra parte, esta corriente puede determinarse si se conocen los parámetros eléctricos del cable de guarda. En este contexto, el presente documento detalla dos métodos para determinar la distribución de la corriente entre la tierra y el cable de guarda en condiciones de desbalance, con el cual es posible seleccionar los parámetros eléctricos para la modelación adecuada de una línea de transmisión. Los resultados de estos métodos, aplicados en cuatro casos de estudio, se verifican en su respectiva simulación en el software Alternative Transients Program (ATP).

Palabras clave. Conductor de acero, Corrientes de desbalance, Líneas de transmisión.

Methodology to Determine the Distribution of Unbalanced Currents of Overhead Electric Power Transmission Lines

Abstract: Electrical overhead power lines present a constant function of operation and must withstand against environmental factors such as electrostatic discharges. Therefore, it is important to select adequate phase and ground conductors in order to support their mechanical characteristics. In addition, ground conductors have a steel component presenting variable electrical parameters that can be utilized to determine the current flowing through the ground wire. Accordingly, this document describes two possible methods to determine the distribution of the current between the earth and the ground wire within unbalanced conditions in which it is possible to select the electrical parameters for the correct configuration of a transmission line. The results of these methods, applied in four case studies, can be verified with their respective simulations using the Alternative Transients Program (ATP) software.

Keywords. Steel conductor, Unbalanced currents, Transmission lines.

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión son un elemento importante para el transporte de energía, su diseño debe ser realizado cuidadosamente ya que, al operar constantemente, debe estar preparado para cualquier tipo de contingencia o desbalance. El hilo de guarda es un componente importante de la línea, su propósito principal es la protección de los conductores de fase contra la incidencia directa de descargas atmosféricas, que pueden causar solicitaciones eléctricas y mecánicas en la línea, además proporcionan un camino de retorno para las corrientes de cortocircuito.

Bajo estas consideraciones, el conductor de guarda se debe especificar de manera apropiada tanto para conducir las corrientes de cortocircuito pronosticadas del sistema como para el esfuerzo mecánico del conductor ante descargas, es por esa razón que los conductores de guarda generalmente son de acero.

Generalmente cuando ocurre este tipo de fallas en la línea, la corriente de retorno va a circular por tierra y los cables de guarda. La proporción de corriente que va a fluir por cada uno no se la conoce, y es por este motivo que el estudio técnico propuesto presenta dos métodos con los cuales, es posible el cálculo de la cantidad de corriente que posiblemente va a ser transportada por el hilo de guarda, para su selección.

Para realizar este tipo de estudios eléctricos en una línea de transmisión, es necesario usar componentes de secuencia; es por ese motivo que es importante calcular previamente los parámetros eléctricos, y en el caso del hilo de guarda va a depender de las propiedades variables del conductor de acero. Por lo tanto, el estudio técnico va a aplicar dos metodologías para diferentes escenarios con su respectiva simulación en el Software ATP, en donde se puede observar el comportamiento de las corrientes en estado transitorio.

Los métodos son desarrollados a partir del criterio de Kersting (William H. Kersting, 2002) y Blackburn (J. Lewis Blackburn,

danielajaramilloa11@gmail.com

Recibido: 18/07/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/tp.vol44n2.02

1993). Los autores han planteado la base para el cálculo de esta corriente, el primero con un análisis a las matrices de las líneas de transmisión y el segundo con un procedimiento diferente al usar el equivalente de las tres corrientes de los conductores de fase con el cable de tierra para formar un circuito monofásico y de esta manera calcular la corriente del hilo de guarda. Gracias a la aportación de la bibliografía mencionada se lleva a cabo este estudio, de tal manera que reúna, desarrolle y compare información, para así validarla y ser usada para estudios futuros.

Además, se detalla un análisis para cables de acero con el cual se puede seleccionar, con cierto porcentaje de error, la impedancia del conductor por ser esta variable con la incidencia de la corriente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La base del estudio es el desconocimiento de la distribución de corrientes de desbalance, ya que estas toman dos caminos: por tierra y por el conductor de hilo de guarda. Hay que resaltar que como parte del estudio se considera el uso de conductor de acero como hilo de guarda, el cual tiene un comportamiento magnético.

2.1 Corrientes de desbalance

En condiciones de operación normal las corrientes de desbalance son bajas y cualquier calibre de conductor del cable de guarda puede soportarlas, así que para una correcta selección de cable de guarda se lo determinará mediante corrientes de desbalance ante fallas.

En condiciones de falla, estas corrientes se distribuyen por dos caminos, por tierra e hilo de guarda, la proporción que va a circular por cada uno, no se la conoce. Las corrientes se las puede observar en condiciones transitorias, en este sentido una falla monofásica facilita un análisis adecuado bajo estas condiciones.

2.2 Conductor de acero

Cuando se aumenta la corriente que incide en conductores con material de acero, se produce una variación de su permeabilidad magnética, y con ello sus propiedades eléctricas como la resistencia y reactancia interna también van a cambiar, por lo tanto, se puede decir que son conductores con una respuesta variable magnética. Bajo esta condición, la impedancia correcta para este conductor se lo puede determinar conociendo ya la corriente que va a circular por este elemento. Se han realizado varias pruebas en conductores de acero galvanizado y al presentar los resultados de algunos trabajos sobre las propiedades eléctricas de ciertas muestras, que usan composiciones químicas y propiedades mecánicas que ya han sido determinadas previamente, se puede demostrar que cualquier intento de cálculo de los valores de resistencia y reactancia inductiva interna para los conductores de acero es impracticable (E. C. Walton, B. Eng., 1928).

A continuación, en la figura 1 se representa de una forma conveniente las curvas de resistencia y el radio medio

geométrico RMG de diferentes tipos de conductores en función de la corriente, además se toma en cuenta que las características son prácticamente proporcionales a la frecuencia es por esta razón que se muestra curvas con 25 y 60 Hertz, para su comparación.

Hay que aclarar que con el valor de RMG se puede calcular la reactancia interna del cable, para la frecuencia de 60 Hertz, de la siguiente manera:

$$x = 0,1736 \log_{10} \frac{\text{radio}}{\text{RMG}} \Omega/\text{km} \quad (1)$$

Para 25 Hertz, la constante 0.1736 cambiará a 0.0723 (C. F. Wagner, 1933).

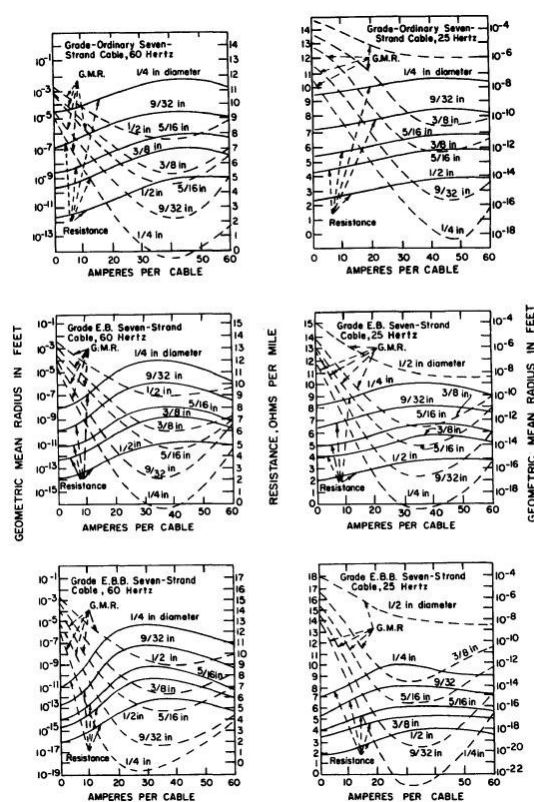


Figura 1. Características eléctricas de los conductores de acero (Paul M. Anderson, 1995).

Con la variación de las características de los conductores ante cambios de la corriente circulante, no se identifican correctamente los parámetros eléctricos de la línea, debido a que se requiere conocer de antemano la corriente que transporta el conductor.

3. CORRIENTES DE DESBALANCE

En esta sección se resumen dos metodologías con las cuales son posible el cálculo de la corriente que va a circular por el hilo de guarda. Además, se las comparará con la simulación en el software ATP para su validación.

El modelamiento de la línea ayuda al cálculo de las corrientes de desbalance, por lo tanto, es importante conocer a

impedancia serie de la línea de transmisión y el efecto de regreso por tierra, de esta manera se usa las ecuaciones de Carson.

El modelo del efecto de retorno por tierra es desarrollado por John Carson en 1926, una publicación que demuestra una técnica para determinar las impedancias propias y mutuas para un número arbitrario de conductores aéreos, considerando el efecto de retorno por tierra. Las ecuaciones pueden ser también aplicadas para cables subterráneos.

Se asume que la frecuencia de 60 Hertz y la resistividad del suelo es de 100 ohm-metro, por esto se tienen las siguientes ecuaciones modificadas de Carson (Carson, John R., 1926):

$$Z_{ii} = r_i + 0,05923 + j0,0754 \left(\ln \frac{1}{RMG_i} + 7,93402 \right) \frac{\Omega}{km} \quad (2)$$

$$Z_{ij} = 0,05923 + j0,0754 \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \frac{\Omega}{km} \quad (3)$$

Además, usando la siguiente relación:

$$7,93402 = \ln D_e$$

Donde:

D_e es la profundidad equivalente del regreso por tierra.

Para este valor hay que tomar en cuenta que pueden existir variaciones por el tipo de condiciones de la tierra de retorno. Al estar en función de la resistividad de la tierra ρ y la frecuencia f , por esta razón es definida la siguiente relación.

$$D_e = 658,35 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ m}$$

A una frecuencia de 60 Hz y una resistividad de suelo promedio de 100 ohm-m, se obtiene un valor aproximado de:

$$D_e = 850,4 \text{ m}$$

Por lo tanto, las ecuaciones de Carson se simplifican de tal manera que se tiene:

$$Z_{ii} = r_i + 0,0592 + j0,0754 \left(\ln \frac{D_e}{RMG_i} \right) \Omega/km \quad (4)$$

$$Z_{ij} = 0,0592 + j0,0754 \left(\ln \frac{D_e}{D_{ij}} \right) \Omega/km \quad (5)$$

Siendo la Ecuación (4) la impedancia propia de un conductor i y la Ecuación (5) la impedancia mutua entre el conductor i y el conductor j .

Con el cálculo de estos valores se puede construir la matriz primitiva de una línea de transmisión como se muestra a continuación (William H. Kersting, 2002).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para encontrar la impedancia de secuencia de la línea se muestra en la Ecuación (7), usando la matriz primitiva de la línea trifásica, sin considerar cable de guarda.

$$Z_{012} = [A]^{-1} \cdot [Z_{abc}] \cdot [A] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Los términos de la diagonal de la matriz son las impedancias de secuencia de la línea de tal manera que:

- Z_{00} = impedancia de secuencia cero
- Z_{11} = impedancia de secuencia positiva
- Z_{22} = impedancia de secuencia negativa

Los términos fuera de la diagonal de la Ecuación (6) representa el acoplamiento mutuo entre las secuencias, en un estado idealizado estos serían cero. Para que esto suceda, una línea de transmisión de alto voltaje debe ser transpuesta. Dado que las líneas de distribución rara vez se transponen, el acoplamiento mutuo entre las fases no es igual, por lo tanto, los términos fuera de la diagonal de la matriz de secuencia serán diferente de cero.

La matriz de impedancia serie de una línea trifásica considerando el hilo de guarda se detalla a continuación:

$$Z_{ABCN} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & | & Z_{AN} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & | & Z_{BN} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & | & Z_{CN} \\ - & - & - & | & - \\ Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & | & Z_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Las líneas de transmisión esencialmente son balanceadas, y es por este motivo que no existen corrientes de secuencia cero. Pero cuando ocurre una falla, el sistema se torna desbalanceado y aparecen estas corrientes llamadas también de desbalance.

Se sabe que en cada fase circulará una unidad de corriente de secuencia cero, y su retorno será la suma de estas tres corrientes.

Generalmente la corriente de retorno se distribuye entre la tierra y el hilo de guarda, sin embargo, no se conoce la proporción que puede circular en este último y es asumida. Parte de esta sección describe como puede ser calculada la corriente que va a circular por el hilo de guarda mediante dos diferentes maneras.

3.1 Metodología 1: Cálculo de la corriente del cable de guarda con la matriz de impedancias serie (William H. Kersting, 2002)

Se aplica el método de reducción estándar de Kron, arreglando las matrices de tal manera que se separan las impedancias

propias de los conductores de fase, del hilo de guarda y las impedancias mutuas entre ellos.

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_{a'b'c'}] \\ [V_{n'}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [Z_{ij}] & [Z_{in}] \\ [Z_{nj}] & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (9)$$

Siendo:

- i, j número de conductores de fases
- n número de conductores de neutro

Al estar el conductor de guarda aterrizado a tierra, los voltajes V_n y $V_{n'}$ son igual a cero, sustituyendo estos valores en la Ecuación (9) se tiene las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} [V_{abc}] &= [V_{a'b'c'}] + [Z_{ij}] \cdot [I_{abc}] + [Z_{in}] \cdot [I_n] \\ [0] &= [0] + [Z_{nj}] \cdot [I_{abc}] + [Z_{nn}] \cdot [I_n] \end{aligned}$$

En esta última se despeja la corriente I_n con la cual se puede conocer la corriente que posiblemente va a circular por el cable de guarda (William H. Kersting, 2002), en el caso que exista una contingencia en el sistema, es importante conocer las corrientes que van a circular por las fases para realizar el cálculo.

$$[I_n] = -[Z_{nn}]^{-1} \cdot [Z_{nj}] \cdot [I_{abc}] \quad (10)$$

Cada una de las fases lleva una unidad de corriente y su retorno la suma de ellas, para conocer estas corrientes se toma en cuenta que la corriente de retorno será una unidad y que se va a dividir en los tres conductores; y al considerar que la unidad es 100%, cada fase conducirá aproximadamente 33,33%, aplicando lo último en la Ecuación (10), la corriente va a ser expresada en número complejos y para su interpretación se presenta el módulo de este, dejando como resultado el porcentaje de corriente que puede circular a través del hilo de guarda.

Aprovechando estas ecuaciones de la caída de voltaje, queda demostrado cómo se realiza la reducción de la matriz de impedancias, puesto que al tratarse de una línea trifásica con un conductor de guarda tiene dimensiones 4x4, y para calcular las impedancias de secuencia de la línea es preciso reducir la matriz hasta que sea 3x3, así que usando las expresiones de la caída de voltaje del circuito se encuentra la ecuación que realiza esta reducción.

$$Z_{ABC} = [Z_{ij}] - [Z_{in}] \cdot [Z_{nn}]^{-1} \cdot [Z_{nj}] \quad (11)$$

Una matriz primitiva de impedancia que representa los cables de guarda o haz de conductores puede siempre ser convertida en una matriz de 3x3 y que puede ser usada para calcular de una manera más precisa la caída de voltaje en segmentos de la línea, una vez determinada las corrientes que fluyen a través de las fases.

3.2 Metodología 2: Cálculo de la corriente del cable de guarda con impedancia de secuencia cero (J. Lewis Blackburn, 1993)

Otro método de cálculo es realizando un análisis a la corriente de secuencia cero, como se muestra en la Figura 2, en el que se juntan las corrientes de los conductores de fase, simulando así un conductor equivalente del circuito trifásico, con su respectiva corriente de retorno.

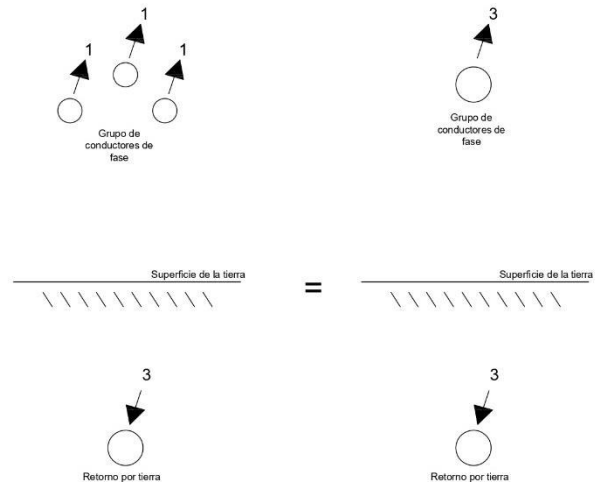


Figura 2. Corrientes de secuencia cero

La red de secuencia cero por definición tendrá una unidad de corriente que consiste en, una unidad de corriente que circula en cada fase del circuito trifásico y tres unidades de corriente de retorno fluyendo por tierra, como se aprecia en la Figura 2. Al reemplazar las tres fases en un conductor equivalente, las tres unidades de corriente circulan por este.

Usando la ley de Ohm, para mantener la misma caída de voltaje, será lo mismo si una unidad de corriente circula en tres unidades de impedancia; y que tres unidades de corriente fluya en una unidad de impedancia, es por eso que para mantener la unidad de corriente, esta impedancia es multiplicada por tres (J. Lewis Blackburn, 1993).

Por lo tanto, la impedancia propia y mutua de la línea va a ser multiplicada por tres, para conocer las impedancias de secuencia cero del sistema.

$$\begin{aligned} Z_0 &= 3 \cdot Z_{AA} \\ Z_{0m} &= 3 \cdot Z_{AB} \end{aligned}$$

Siendo:

- Z_{AA} impedancia propia de fase de la línea de transmisión
- Z_{AB} impedancia mutua entre los conductores de fase y el retorno por tierra

Con este análisis se tiene la impedancia propia y mutua de secuencia cero de la línea en la Ecuación (12) y Ecuación (13) respectivamente.

$$Z_{0a} = r_a + 0,1776 + j0,2262 \left(\ln \frac{D_e}{R_{MG}} \right) \Omega/km \quad (12)$$

$$Z_{0m} = 0,1776 + j0,2262 \left(\ln \frac{D_e}{D_{MG}} \right) \Omega/km \quad (13)$$

Incluyendo el cable de guarda, la distribución de corrientes de secuencia cero se distribuyen como se muestra en la Figura 3.

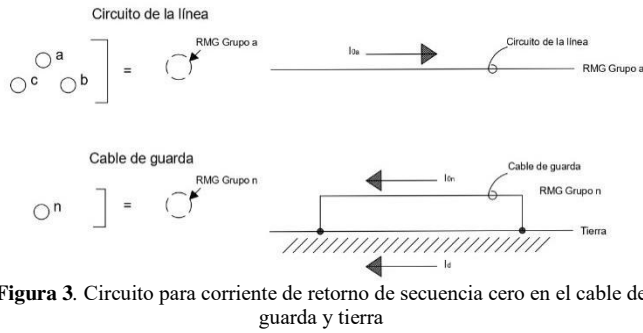


Figura 3. Circuito para corriente de retorno de secuencia cero en el cable de guarda y tierra

Además, se considera ya la impedancia propia de secuencia cero de un cable de guarda que se detalla en la Ecuación (14).

$$Z_{0n} = 3r_n + 0,1776 + j0,2262 \ln \frac{D_e}{RMG_n(gr.de 1)} \quad (14)$$

El $RMG_{gr.a}$ es el radio medio geométrico del circuito de la línea de la Figura 3 que puede ser representado por cualquier tipo de configuraciones de líneas trifásicas, así sea de uno o doble circuito.

Los hilos de guarda están conectados a tierra en cada polo o torre. En la práctica estas conexiones a tierra tendrán la misma impedancia (mayormente resistiva), conocida como resistencia de pie de torre. En los cálculos de impedancia de secuencia cero de la línea, la resistencia de pie de torre es asumida a cero, lo cual es práctico para el cálculo de fallas.

La caída de voltaje a través del circuito de la línea trifásica de la Figura 3 es:

$$\begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0a} & Z_{0m} \\ Z_{0m} & Z_{0n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{0a} \\ I_{0n} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Con estas ecuaciones se tiene el voltaje de secuencia cero de la línea:

$$V_{0a} = Z'_{0a} I_{0a} + Z_{0m} I_d \quad (16)$$

Donde:

- $Z'_{0a} = Z_{0a} - Z_{0m}$ impedancia de dispersión del grupo de conductores de fase
- $I_d = I_{0a} - I_{0n}$ corriente de retorno que va por tierra

Además, la caída de voltaje en el cable de cero, que será igual a cero.

$$V_{0n} = Z'_{0n} I_{0n} - Z_{0m} I_d = 0 \quad (17)$$

Donde:

- $Z'_{0n} = Z_{0n} - Z_{0m}$ impedancia de dispersión de los cables de guarda

Con este análisis se obtienen impedancias llamadas de dispersión, en donde anula el efecto mutuo entre los conductores y tierra.

$$Z'_{0a} = r + j0,2262 \ln \frac{DMG(gr.de 3 a gr.de 1)}{RMG_a(gr.de 3)} \quad (18)$$

$$Z'_{0n} = 3r_n + j \cdot 0,2262 \cdot \ln \frac{DMG(gr.de 3 a gr.de 1)}{RMG_n(gr.de 1)} \quad (19)$$

En la Figura 4 se plasma un circuito equivalente considerando los voltajes de secuencia cero de la línea de la Ecuación (16) y el voltaje del hilo de guarda de la Ecuación (17), para así representar como la corriente de retorno se distribuye entre el cable de guarda y tierra.

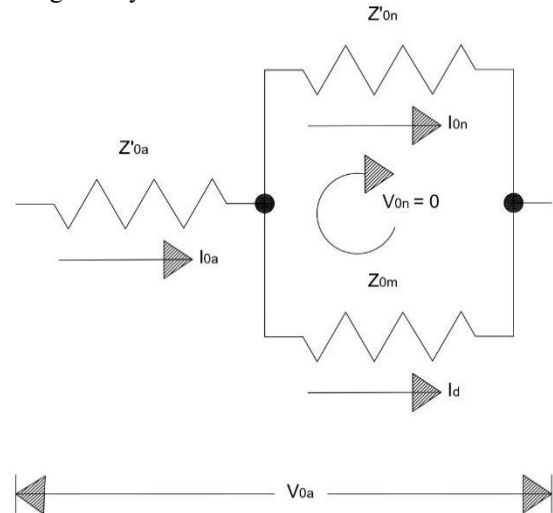


Figura 4. Circuito equivalente para corriente de retorno de secuencia cero a través del cable de guarda y tierra

El cálculo de la impedancia de secuencia cero del circuito se representa en la Ecuación (20).

$$Z_0 = Z'_{0a} + \frac{Z'_{0n} Z_{0m}}{Z'_{0n} + Z_{0m}} \quad (20)$$

La proporción de corriente de hilo de guarda se calcula con un divisor de corriente en el circuito de la Figura 4, usando la Ecuación (21).

$$I_{0n} = 100\% \cdot \frac{Z_{0m}}{Z'_{0n} + Z_{0m}} \quad (21)$$

Para un circuito con dos conductores de guarda, las ecuaciones de impedancias de secuencia cero de este grupo va a cambiar el valor de su resistencia porque la suma en paralelo de los dos conductores va a ser $r/2$.

4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS

Las dos metodologías antes descritas serán usadas para calcular cuatro casos de estudios de las referencias (J. Lewis Blackburn, 1993; Paul M. Anderson, 1995).

- Caso 1: una línea trifásica con un cable de guarda, considerando este último como un conductor normal.
- Caso 2: una línea trifásica con dos cables de guarda, considerando estos últimos como conductores normales.
- Caso 3: una línea trifásica con un cable de guarda, considerando este último como un conductor de acero.

- Caso 4: una línea trifásica con un cable de guarda, considerando estos últimos como conductores de acero.

Se realizarán los cálculos respectivos de forma manual a estos ejercicios, de tal manera que se obtengan los resultados de corriente en el cable de guarda y del valor de la impedancia de secuencia cero.

Los resultados van a ser verificados con el software de simulación ATP (Alternative Transients Program) (László Prikler & Hans Kristian Hoidalen, 2009). Junto a esto se presenta la configuración del circuito para cada caso.

4.1 Caso 1: línea trifásica con un cable de guarda, considerando este último como un conductor normal

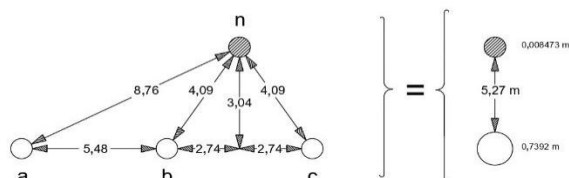


Figura 5. Configuración línea trifásica con un cable de guarda

Tabla 1. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el primer caso

CASO 1		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		39,74 %	0,308+j1,0938
Metodología 1	Valor	43,27 %	0,3091+j1,0917
	Error	8,88 %	0,15 %
Metodología 2	Valor	43,10 %	0,3092+j1,0917
	Error	8,45 %	0,15 %

El cálculo de la corriente en el hilo de guarda presenta un mínimo error, es por este motivo que se garantiza el uso de estos métodos para un ejemplo tan simple como una línea trifásica con un hilo de guarda, usando el mismo conductor para las tres fases y el hilo de guarda. Además, se puede notar que las impedancias de secuencia cero calculadas también son parecidas entre ellas, y presentan una mínima variación que puede darse por motivos ajenos al procedimiento.

4.2 Caso 2: línea trifásica con dos cables de guarda, considerando estos últimos como conductores normales

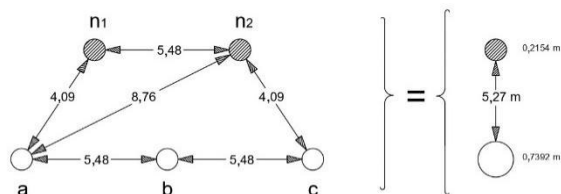


Figura 6. Configuración línea trifásica con dos cables de guarda

Tabla 2. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el segundo caso

CASO 2		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		60,07 %	0,2773+j0,8929
Metodología 1	Valor	60,62 %	0,2776+j0,8924
	Error	0,92 %	0,04 %
Metodología 2	Valor	60,40 %	0,2778+j0,8918
	Error	0,55 %	0,09 %

De igual manera para este caso, la corriente no presenta mayor variación, y su error en comparación con la simulación no es mayor al 1% en ninguno de los dos métodos. La impedancia de secuencia cero de la línea de igual manera tiene un error menor al 1%. La corriente de falla en este caso se va a distribuir por tierra y por los dos cables de guarda que tiene la línea.

4.3 Caso 3: línea trifásica con un cable de guarda, considerando este último como conductor de acero

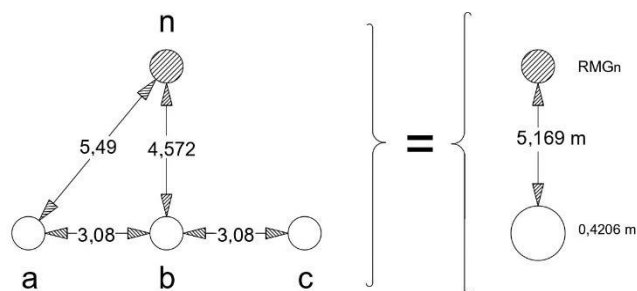


Figura 7. Configuración línea trifásica con un conductor de acero como cable de guarda

Tabla 3. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el tercer caso, usando impedancia para 1 amperio

CASO 3 (1 A)		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		15,70 %	0,4789+j1,6009
Metodología 1	Valor	15,58 %	0,4811+j1,5948
	Error	0,76 %	0,31 %
Metodología 2	Valor	14,50 %	0,4811+j1,5948
	Error	7,64 %	0,31 %

Tabla 4. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el tercer caso, usando impedancia para 30 amperios

CASO 3 (30 A)		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		7,15 %	0,4042+j1,6693
Metodología 1	Valor	7,04 %	0,4085+j1,6633
	Error	0,84 %	0,28 %
Metodología 2	Valor	6,83 %	0,4085+j1,6633
	Error	4,48 %	0,28 %

Tabla 5. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el tercer caso, usando impedancia para 60 amperios

CASO 3 (60 A)		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		8,9 %	0,4141+j1,6502
Metodología 1	Valor	8,82 %	0,4180+j1,6443
	Error	0,9 %	0,28 %
Metodología 2	Valor	8,5 %	0,4180+j1,6443
	Error	4,5 %	0,28 %

Se obtiene que en los valores de corriente de hilo de guarda presenta un margen mayor de error con el método que usa impedancias de secuencia cero, valor que no supera el 10%, haciendo efectivo el método. Pero se recomendaría usar el de impedancias de serie, por el hecho de ser más preciso.

4.4 Caso 4: línea trifásica con dos cables de guarda, considerando estos últimos como conductores de acero

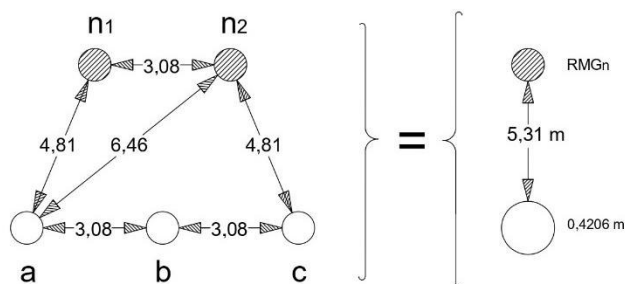


Figura 8. Configuración línea trifásica con dos conductores de acero como cables de guarda

Tabla 6. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el cuarto caso, usando impedancia para 1 amperio

CASO 4 (1 A)		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		28,3 %	0,5521+j1,4719
Metodología 1	Valor	28,02 %	0,5529+j1,4666
	Error	0,99 %	0,29 %
Metodología 2	Valor	25,1 %	0,5529+j1,4671
	Error	11,31 %	0,26 %

Tabla 7. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el cuarto caso, usando impedancia para 30 amperios

CASO 4 (30 A)		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		13,5 %	0,4500+j1,6108
Metodología 1	Valor	13,36 %	0,4532+j1,6050
	Error	1,04 %	0,28 %
Metodología 2	Valor	12,68 %	0,4532+j1,6055
	Error	6,07 %	0,25 %

Tabla 8. Cálculo de error entre las metodologías y la simulación para el cuarto caso, usando impedancia para 60 amperios

CASO 4 (60 A)		Corriente hilo de guarda	Impedancia de secuencia cero
Simulación ATP		16,4 %	0,4628+j1,5748
Metodología 1	Valor	16,42 %	0,4654+j1,5692
	Error	0,12 %	0,28 %
Metodología 2	Valor	15,52 %	0,4655+j1,5697
	Error	5,37 %	0,25 %

En este último caso, los dos métodos llegan a una respuesta con mínimo error comparándola con lo simulado en el software ATP. De igual manera que en el caso 3, se puede observar que donde se tiene un mayor margen de error es en el método dos que usa impedancias de secuencia cero, siendo 11,31% el error más grande. Hay que resaltar que los cálculos son similares para los conductores de acero, una vez seleccionada la impedancia a usar, en cualquiera de las dos configuraciones, ya sea que se use uno o dos hilos de guarda.

5. ANÁLISIS DE LOS CONDUCTORES DE ACERO

En esta sección se muestra el análisis del comportamiento del conductor de acero como hilo de guarda en una línea de transmisión, para esto se hace uso del simulador ATP en donde se ha manipulado de tal manera que se puede observar las formas de onda de corriente de falla y del hilo de guarda, para así compararlas y poder observar que proporción de corriente va a retornar por el cable de guarda.

Hay que destacar que se ha simulado el caso tres por ser un circuito simple que usa solamente un hilo de guarda, y para conocer las características eléctricas de este último conductor usando los datos de la figura 1, se modificó el circuito de tal manera que la corriente que circule por el hilo de guarda se encuentre dentro del rango de 1 a 60 amperios, y con esto realizar el proceso iterativo que el libro menciona como solución al problema, el cual establecerá una impedancia precisa para el conductor de acero. Este método consiste en tomar una impedancia y calcular su corriente, con esta última magnitud compararla con las curvas y encontrar la impedancia adecuada. Tomando en cuenta lo dicho anteriormente por la referencia para encontrar los valores de resistencia y de reactancia del conductor de acero, se realiza de una manera iterativa, se toma una impedancia de las curvas, como ejemplo se iniciarán con los valores que se obtienen para 1 amperio, y como resultado de la corriente de falla se tiene que es 62,68 amperios, que sobrepasa el rango, pero su valor cercano es de 60 amperios por lo que se toman estos valores de impedancia y se simula nuevamente con estos datos, dando como resultado la corriente de 31,93 amperios. Y otra vez se toman los valores de resistencia y reactancia para esta última corriente que por la forma de curva serán similares a los de 30 amperios, y la corriente resultante en la simulación será de 28,7 amperios.

Por lo tanto, para este caso, se tendrá una resistencia de 4,84 ohmios por kilómetro y un radio medio geométrico de 1,5E-12 metros, que es una reactancia 1,9624 ohmios por kilómetro.

Tabla 9. Datos de conductor de acero tipo EBB-0,9525 centímetros con corrientes simuladas para cada impedancia

Corriente	Resistencia	Reactancia propia	Corriente hilo de guarda	
A	Ω/km	Ω/km	A	%
1	2,175	0,520	62,68	15,72%
10	3,107	1,041	44,20	11,02%
20	4,350	1,736	31,61	7,88%
30	4,847	1,962	28,70	7,16%
40	4,661	1,962	29,57	7,37%
50	4,226	1,918	31,76	7,92%
60	3,729	1,705	31,93	7,96%

Se observa que la proporción de corriente del hilo de guarda no presenta mayor variación entre las impedancias dadas desde los 20 hasta los 60 amperios, así que se podría concluir que para este conductor se puede escoger una impedancia dentro del último rango mencionado, ya que tiene valores de resistencia y reactancia propia con menor porcentaje de error respecto a la impedancia que se ha escogido mediante el método iterativo.

El error para cada impedancia es calculado en la Tabla 10, un analista de falla puede escoger, dentro de rango seleccionado de esta última tabla, la impedancia para 30 amperios y considerar así un error máximo de 13% para los valores de reactancia (no se toma en cuenta el cálculo de error del radio medio geométrico ya que los datos se grafican en escala logarítmica y son muy pequeños por lo tanto no da un valor de error exacto) y en el caso de la resistencia será 23% de error.

Tabla 10. Cálculo de error de impedancia para conductor de acero tipo EBB-0,9525 centímetros respecto a los valores de resistencia y reactancia escogidos

	RESISTENCIA	REACTANCIA
% Error 1 A	55.13 %	73.45 %
% Error 10 A	35.90 %	46.91%
% Error 20 A	10.26 %	11.51 %
% Error 30 A	0.00 %	0.00 %
% Error 40 A	3.85 %	0.00 %
% Error 50 A	12.82 %	2.26 %
% Error 60 A	23.08 %	13.07 %

Para mayor comprensión del método se muestra el diagrama de flujo en la Figura 9.

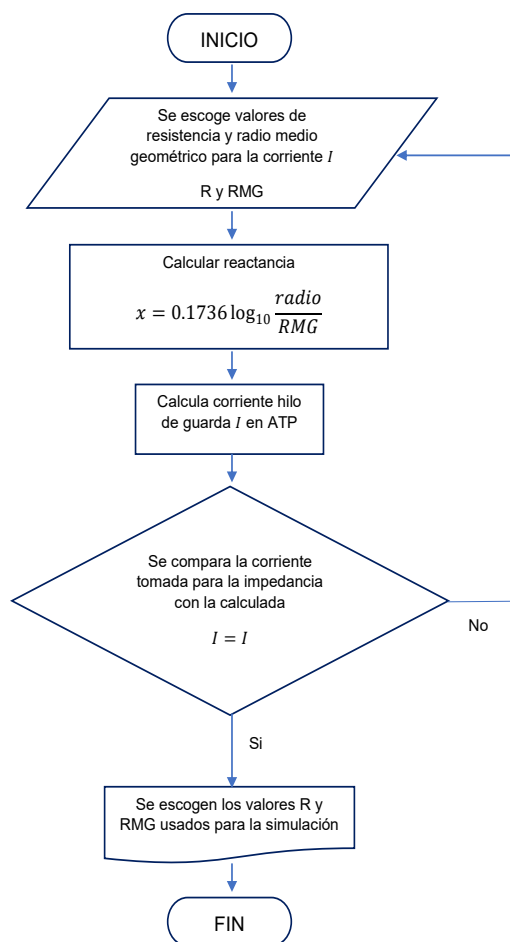


Figura 9. Diagrama de flujo para buscar la impedancia adecuada del conductor de acero

Es importante el uso del simulador ATP ya que, al ser un método iterativo, como se muestra en la Figura 9, es de gran ayuda para el cálculo de corriente para encontrar la impedancia adecuada del conductor de hilo de guarda.

6. CONCLUSIONES

Con las metodologías indicadas en el presente documento, es posible determinar las corrientes de desbalance que van a circular por el hilo de guarda, además, estas metodologías permiten analizar el comportamiento del conductor de guarda

usando conductores de material de acero con sus características eléctricas variables.

El método de impedancia de serie de línea utiliza las matrices primitivas de impedancia de la línea de transmisión, en donde se incluye el efecto de corriente de retorno a través de la tierra usando ecuaciones de Carson que calcula las impedancias mutuas y propias de la matriz primitiva, considerando que la tierra es un sólido infinito con una superficie uniforme, plana y con resistividad constante.

El método de impedancias de secuencia cero utiliza fórmulas que agrupan a todos los conductores de fase y cables de guarda respectivamente. Las impedancias de estas son propias sin considerar el efecto de retorno a tierra, en cambio la impedancia mutua depende de este efecto, y con la ayuda de estos datos se construye un circuito equivalente donde se observa la distribución de corriente de falla entre la tierra y el cable de guarda.

La resistencia y reactancia propia interna de los conductores con material magnético, como el acero, no es constante ya que presenta variación en la permeabilidad magnética al momento de incrementar la corriente en el cable.

En el caso de conductores de acero, al no conocer su impedancia con exactitud, se establece un posible procedimiento iterativo, donde usando ciertos valores de resistencia y reactancia se calcula la corriente que puede fluir por el cable, y con este valor buscar los valores de impedancia adecuados. Complementariamente, la determinación de la corriente se lo realiza en ATP permitiendo verificar, mediante simulación, los resultados encontrados con el procedimiento iterativo propuesto en este documento

El documento contiene información de varios autores que fue desarrollada y comprobada entre sí, además es de gran importancia para realizar trabajos futuros sobre este tema.

REFERENCIAS

- C. F. Wagner, R. E. (1933). *Symmetrical Components* (First Edition). New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Carson, John R. (1926). Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell System Technical Journal*, 5, 539–554.
- E. C. Walton, B. Eng. (1928). *THE ELECTRICAL PROPERTIES OF GALVANIZED STEEL CONDUCTORS FOR OVERHEAD TRANSMISSION LINES*. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 66(382), 1065-1078.
- J. Lewis Blackburn. (1993). *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- László Prikler, & Hans Kristian Hoidalén. (2009). *ATPDRAW User's Manual*.
- Paul M. Anderson. (1995). *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: Power Math Associates, Inc.
- William H. Kersting. (2002). *Distribution System Modeling and Analysis*. Las Cruces, New Mexico: CRC Press.

BIOGRAFÍAS



Daniela Jaramillo, nació el 11 de mayo de 1993 en Ibarra, Ecuador. Culmino el bachillerato en ciencias, especialidad Físico Matemático en la Unidad Educativa “Sagrado Corazón de Jesús” Hnas. Bethlemitas. Se graduó recientemente de Ingeniera Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional.



Antonio Fonseca, nació en Quito, Ecuador en 1979. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico (marzo 2003) y Magister en Ingeniería Eléctrica (julio 2009) en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) Quito–Ecuador. Actualmente, forma parte del Departamento Mantenimiento de CELEC EP – Unidad de Negocio

TRANSELECTRIC. Adicionalmente se desempeña como profesor en la carrera de Ingeniería Eléctrica y en la Maestría en Ciencias de Ingeniería Eléctrica de la EPN.



Fabián Pérez Yauli, nació en Ambato-Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador en 2004. En 2012 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina, con una beca otorgada por el Servicio Alemán de Intercambio

Académico (DAAD). Actualmente es profesor titular a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional. Su rama de investigación incluye protecciones de sistemas de potencia y procesamiento de señales.

Estimación de los Parámetros de Secuencia de un Transformador Trifásico utilizando Métodos de Optimización no Lineal

Cuasapaz, Oscar^{1*} ; Ramírez, Juan¹ ; Avilés, Fausto¹ ; Granda, Nelson¹ ; Quilumba, Franklin¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

Resumen: En este documento se presenta la estimación de los parámetros de secuencia: positiva, negativa y cero, de un transformador trifásico de 50 kVA, 6300 - 231/133 V, a partir de mediciones de eventos de fallas monofásicas a tierra y bifásicas a tierra; con ajustes de curvas simuladas y medidas utilizando métodos de optimización no lineal mediante MATLAB-Simulink. En primer lugar, se realizan pruebas en un transformador trifásico didáctico utilizando las normas internacionales para determinar los parámetros de secuencia en el laboratorio. Estos valores se constituyen en los valores iniciales a ser usados en la etapa de estimación. Posteriormente, se realizaron eventos de cortocircuitos en donde se registraron datos de corriente con la ayuda de un osciloscopio. Los datos que resultan de la medición son comparados con la parte simulada, generando dos curvas que se superponen y tienen ciertas diferencias entre sí. Con el objetivo de ajustar estas curvas simuladas con respecto a las medidas, se utilizó la herramienta "Parameter Estimation" de MATLAB-Simulink, la cual varía los parámetros del modelo hasta obtener la menor diferencia entre los valores simulados versus los medidos. Una vez probado el método se trabajó en el transformador de 50 kVA para obtener sus parámetros de secuencia generando eventos de fallas alimentando el lado de alto voltaje a 500 V debido a las condiciones físicas del laboratorio.

Palabras clave. cortocircuitos en transformadores, estimación de parámetros, optimización no lineal, parámetros del transformador, estimación de parámetros.

Sequence Impedance Parameter Estimation of a Three-Phase Transformer using Nonlinear Optimization Methods

Abstract: This document presents the estimation of the positive, negative, and zero-sequence impedances of a three-phase, 50 kVA, 6300 - 231/133 V transformer. Simulated short-circuit current measurements of single line-to-ground (SLG) and double line-to-ground (LLG) faults are fitted to their respective field measurements using non-linear optimization methods in MATLAB-Simulink. First, laboratory tests are performed on a laboratory-scale three-phase transformer using international standards to determine the sequence parameters. These values constitute the initial values to be used in the estimation stage. Subsequently, SLG and LLG short circuit events were performed where current data were recorded with the help of an oscilloscope. The recorded field data is compared against their simulated counterpart, generating two curves that overlap and have certain differences between them. To adjust the simulated curves with respect to the field measurements, the MATLAB-Simulink "Parameter Estimation" tool was used. This tool allows adjusting the sequence parameters of the model until the difference between the simulated and field values are minimized. Once the method was tested, the sequence parameters of the 50-kVA transformer were obtained following a similar procedure with the only difference that the high voltage side was fed with 500 V due to the physical conditions of the laboratory.

Keywords. short-circuits in power transformers, parameter estimation, non-linear optimization, power transformer parameters, power transformer parameter estimation.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el Sistema Nacional Interconectado del país ha tenido un crecimiento notorio debido al aumento de la población y a la necesidad de mejorar el servicio. En este progreso los transformadores juegan un papel muy importante: elevar y reducir el voltaje para transportar la energía eléctrica. Por esto, es esencial que funcionen de manera óptima (Tibanlombo & Granda, 2018). Para verificar su funcionamiento y calidad se realizan pruebas en su fábrica antes de su puesta en servicio; de igual manera este equipo

debe protegerse ante eventualidades internas y externas al sistema eléctrico, por tal motivo, se deben realizar pruebas que aseguren su protección. Para tener información y poder coordinar sus protecciones se deben realizar pruebas para obtener los parámetros que ayuden a realizar ciertos ajustes para su protección (Reyes Ruiz, 2012).

Para determinar ciertos parámetros, entre estos, los de secuencia positiva, negativa y cero, se deben realizar pruebas según los estándares internacionales ANSI, IEEE e IEC, los cuales proponen aspectos generales para tomar en cuenta

oscar.cuasapaz@epn.edu.ec

Recibido: 18/07/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/tp.vol44n2.03

durante la medición de secuencias con el fin de no exceder corrientes, voltajes o límites térmicos en el transformador (Reyes Ruiz, 2012), (IEC, 2011), (IEEE, 2015). Estos parámetros en los equipos de protección asociados a los transformadores en un sistema eléctrico requieren de modelos para su simulación, tanto del transformador como de la red eléctrica en la que está instalado. Sin embargo, si el modelo del transformador no es el adecuado, entonces la simulación no va a ser correcta y, por lo tanto, el ajuste de las protecciones tampoco va a ser adecuado.

En el modelo de las componentes simétricas desarrollado por C. L. Fortescue se establecen las condiciones para el cálculo de las fallas trifásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y monofásicas, éstas dos últimas poseen componentes de secuencia cero, por lo que su cálculo es de mucha importancia (Sorrentino & Burgos, 2012).

En los eventos de fallas monofásicas y bifásicas a tierra, el problema se da debido a la influencia de la impedancia de secuencia cero, este valor se presenta en equipos con conexión estrella principalmente, ya que estos tienen un conductor de neutro que normalmente está sólidamente aterrizado (Angela Ramos, Burgos, Moreno, & Sorrentino, 2013). También se debe a la forma y construcción del transformador, pues las paredes del tanque del transformador proporcionan un camino para una parte del flujo magnético de secuencia cero (Sorrentino & Burgos, 2012).

Sin embargo, varios transformadores en servicio, en su placa de características no incluyen datos de secuencia cero que permitan un análisis preciso de su comportamiento bajo cargas desequilibradas y fallas.

Con lo antes expuesto, las pruebas en el laboratorio siguen las metodologías de cálculo que se indican en las normas internacionales para la obtención de sus parámetros; sin embargo, existe una diferencia de valores entre lo medido y lo simulado. Para evidenciar esto, se realiza una comparación de las corrientes obtenidas en la simulación con respecto a las medidas en la parte experimental aplicando un evento de cortocircuito en los terminales del transformador (Angel Ramos & Burgos, 2017).

Si los valores de corriente resultan ser muy diferentes, significa que los parámetros del modelo del transformador no se asemejan a la realidad, una razón es debida a las limitaciones físicas para elaborar estas pruebas en laboratorio. Con esta problemática se propone un método práctico para reducir esta diferencia de corriente a la salida de los bornes de un transformador trifásico de 50 kVA en el lado de bajo voltaje, comparando la corriente del modelo estructurado en el software MATLAB-Simulink con la corriente del modelo real obtenido en las pruebas normalizadas en el laboratorio (Chiguano, Valenzuela, & Gallardo, 2018), (Chiguano, Ramírez, Quilumba, & Gallardo, 2018).

Para solucionar esta problemática, se plantea evaluar el desempeño del transformador trifásico ante un evento de cortocircuito experimentalmente en el laboratorio y su comparación con el del modelo simulado realizando el mismo

evento. La diferencia que se obtenga de las dos respuestas se reducirá utilizando los métodos de optimización para la estimación de parámetros con las que cuenta la herramienta MATLAB-Simulink.

2. PRUEBAS NORMALIZADAS PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE SECUENCIA EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

2.1 Prueba de Circuito Abierto

Esta prueba se realiza con el fin de determinar la corriente de magnetización y las pérdidas de hierro en el núcleo del transformador en función del voltaje aplicado. Generalmente se alimenta al transformador por el lado de bajo voltaje y se mantienen los terminales del lado de alto voltaje abiertos, los equipos de medida se colocan en el lado de la alimentación a voltaje nominal. Al encontrarse los terminales abiertos en una rama del transformador, la fuente genera una potencia que se disipa en el núcleo en forma de calor, por esta razón la corriente de magnetización es muy pequeña por lo que se desprecia la resistencia del devanado (IEEE, 2015).

Las mediciones que se realizan son: voltaje de alimentación, corriente de magnetización y potencias. Los métodos de ensayo a detalle se pueden encontrar en los dos estándares de (IEC, 2011), (IEEE, 2015). Los parámetros que se pueden obtener de este ensayo son la reactancia de magnetización X_M y la resistencia de magnetización del núcleo R_M .

2.2 Prueba de Cortocircuito

Esta prueba se realiza con el fin de determinar las pérdidas en los devanados, para esto, los terminales de alto voltaje se alimentan con una fuente regulable hasta que circule la corriente nominal del lado de bajo voltaje con sus terminales en cortocircuito. Las mediciones de voltaje, corriente y potencia deberán realizarse cuando estén conectados sus devanados en el tap principal. En el lado de alto voltaje, el voltaje se reduce entre el 4-10% del voltaje nominal, expresado en porcentaje (IEEE, 2015).

Las pérdidas en el núcleo del transformador son despreciables al igual que el flujo en el núcleo, esto se debe a que una fracción del voltaje nominal pasa por el lado de alto voltaje. Estas mediciones se las debe hacer de manera conjunta y mediante cálculos se puede separar valores para determinar los parámetros de los devanados de corto circuito en el lado de bajo voltaje. Los métodos de ensayo a detalle se pueden encontrar en (IEC, 2011), (IEEE, 2015).

Se deben tomar las mediciones del voltaje de cortocircuito V_{ccl} , corriente de cortocircuito I_{ccl} , potencias de cortocircuito P_{ccl} , Q_{ccl} . Los parámetros que se pueden obtener de este ensayo son: la resistencia de secuencia positiva R_1 y reactancia de secuencia positiva X_1 de ambos bobinados del transformador.

2.3 Prueba de Secuencia Cero

En los transformadores eléctricos es preciso conocer la impedancia de secuencia cero para estudios con diversos fenómenos en redes de potencia trifásica en condiciones de desequilibrio. En una red eléctrica con carga simétrica, solamente aparecen las impedancias positiva y negativa; sin embargo, ante una perturbación asimétrica, la magnitud de las corrientes de cortocircuito o sobretensiones en fallas monofásicas y bifásicas a tierra en estado estacionario está influenciada por la impedancia de secuencia cero en su gran parte (IEC, 2011).

Para el transformador u otro elemento no rotativo de la red eléctrica las impedancias positiva y negativa son iguales razón por la cual hay que poner atención a la impedancia de secuencia cero. Por otra parte, el transformador dependiendo del tipo de conexión, construcción del núcleo en cuanto a su posición de sus devanados y a su circuito magnético va a tener diferentes características de impedancia de secuencia cero (IEC, 2011).

La impedancia de secuencia cero de un transformador se expresa en ohmios/fase a la frecuencia de la red y se obtiene conectando en paralelo las 3 bobinas de un transformador en estrella (Y) y su terminal neutro (IEC, 2011).

Para que exista un valor de impedancia cero diferente de infinito en un transformador trifásico al menos uno de sus arrollamientos debe tener una conexión en estrella o zigzag. De igual manera es preciso que la red tenga neutro para que existan corrientes de secuencia cero. Los métodos de ensayo a detalle se pueden encontrar en los dos estándares de (IEC, 2011).

El cálculo de la impedancia de secuencia cero Z_0 se presenta en la Ecuación (1).

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

Donde:

V = Voltaje aplicado fase neutro.

I = Corriente de prueba del neutro.

La impedancia de secuencia cero consta de dos componentes: resistiva (R_o) y reactiva (X_o). La componente resistiva es mucho menor a su componente reactiva ($R_o \ll X_o$), debido a esto generalmente se desprecia la componente resistiva y la impedancia de secuencia cero solo queda en términos de reactancia (IEC, 2011).

Se debe tener en cuenta que el flujo de secuencia cero puede causar un calentamiento excesivo en las partes estructurales metálicas del transformador bajo prueba como el tanque, tapa y elementos de sujeción. Por este motivo la corriente de medición no debe ser superior al 30% de la corriente nominal. La inyección de corriente nominal solo se permite por un tiempo muy corto (unos pocos segundos) y el voltaje aplicado no debe exceder el voltaje de fase a neutro que se produce durante el funcionamiento normal (Carlson & Zürich, 2003).

3. METODOLOGÍA

3.1 Falla Monofásica a Tierra en los Transformadores Bajo Prueba

Para la obtención de los parámetros estimados del modelo del transformador en estudio se realizan las siguientes acciones:

- 1) Se conocen unos parámetros iniciales del transformador obtenidos a través de ensayos normalizados en el laboratorio según lo indicado en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3 de este artículo.
- 2) Se genera un cortocircuito controlado monofásico a tierra y bifásico a tierra en el laboratorio y se adquieren las señales de corriente de las fases cortocircuitadas mediante un osciloscopio para ser utilizadas digitalmente.
- 3) Se realiza en Simulink una simulación de los mismos eventos de cortocircuito del punto 2) utilizando un modelo del transformador en el que se pueden ingresar los parámetros obtenidos en el punto 1).
- 4) Se comparan los resultados de las curvas de corriente de cortocircuito medidas y simuladas y se utiliza la herramienta *Parameter Estimation* de Simulink para realizar un ajuste de las curvas, de manera que, los parámetros del modelo cambian para lograr que las curvas simuladas sean muy similares a las curvas medidas. Este es el proceso de estimación de los parámetros.
- 5) Una vez que se obtienen los nuevos parámetros en el proceso de estimación se cuantifica la diferencia de las curvas ajustadas por medio del error cuadrático medio RMSE y también se comparan los errores relativos de los parámetros iniciales y los nuevos parámetros. Combinando estos dos errores se determinan finalmente los parámetros del modelo.

3.2 Problema de optimización

La herramienta *Parameter Estimation* de Simulink formula la estimación de parámetros como un problema de optimización y la solución del problema de optimización es un conjunto de valores de los parámetros seleccionados (MathWorks, 2019).

El problema de optimización consiste de: las variables de diseño que en este problema son los parámetros del modelo y sus estados iniciales; la función objetivo, función de costo o estimación del error calcula una medida de la diferencia entre las respuestas medidas y simuladas del modelo; los límites entre los que pueden variar los parámetros del modelo; las funciones de restricción si existiesen restricciones en las variables de diseño (MathWorks, 2019a).

Al resolver el problema la herramienta estima los valores de las variables de diseño para satisfacer los objetivos y restricciones especificados. La formulación exacta del problema de optimización depende del método que se desee utilizar. Los métodos disponibles en la herramienta son: Mínimos Cuadrados No Lineales, Gradiente Descendente, Búsqueda Simple y Patrones Búsqueda; con los algoritmos de Levenberg-Marquadt, Conjunto Activo, Punto Interior,

Región de Confianza Reflexiva, Programación Cuadrática Secuencial (SQP). La utilización detallada de estos métodos puede encontrarse en (Chiguano et al., 2018).

4. CASOS DE ESTUDIO

Las pruebas se realizaron en un transformador didáctico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional para determinar las impedancias de secuencia (Z^+ , Z^- , Z_0). Para obtener las curvas de cortocircuito se realizarán dos eventos de fallas, una monofásica a tierra y una bifásica a tierra. En esta primera parte se realizan todas estas pruebas en el transformador trifásico didáctico con conexión Dyn5 debido a que el transformador de 50 kVA que se usará posteriormente tiene internamente esta conexión; para obtener los valores iniciales de sus parámetros y validar el modelo estructurado en MATLAB-Simulink. Por último, se realizará la estimación de los parámetros de secuencia.

En segundo lugar, se realiza el mismo procedimiento, pero en el transformador de 50 kVA. Se realizan las pruebas para determinar las impedancias de secuencia (Z^+ , Z^- , Z_0). En la realización de los eventos de fallas cuando se trabaja con el transformador de 50 kVA se alimenta al transformador por el lado de alto voltaje a 500 V debido a las condiciones físicas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que no dispone de un voltaje de 6300 V para alimentarle. Por último, se realizará la estimación de los parámetros de secuencia.

Debido a que las simulaciones de los cortocircuitos en Simulink requieren del valor de la resistencia de puesta a tierra, se midió la resistencia de puesta de tierra del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, utilizando el método del 62% dado por la norma IEEE 80-2013 (IEEE, 2013).

4.1 Transformador Trifásico Didáctico

El transformador tiene sus tres devanados de cada fase en un solo núcleo ferromagnético con bobinas de 120 V a 5 A. Esta máquina se encuentra en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, se le realiza una conexión Dyn5.

4.2 Transformador Trifásico de 50 kVA

El transformador en el que se aplicará la metodología para determinar los parámetros de secuencia (Z^+ , Z^- , Z_0) tiene internamente una conexión Dyn5, razón por la cual se realizó la misma conexión en el transformador didáctico. En los eventos de falla, se alimentará a un voltaje reducido de 500 V y no al voltaje que necesita de 6300 V por disposición física en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, donde se realizarán estos eventos. Los datos de placa de este equipo se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de Placa del Transformador de 50 kVA

Transformador trifásico								
Marca		Elin		Año		1965		
Tipo		OD 51/10		N° serie		1077117		
Frecuencia		60	Hz	Conexión		Dy5		
Potencia		50	kVA	Impedancia		3.95 %		
Lado de alto voltaje				Lado de bajo voltaje				
1	6300	V	4.82	A	231.13	V	125.2	A
2	6150							
3	6000							
4	5700							

4.3 Falla Monofásica a Tierra en los Transformadores Bajo Prueba

La falla monofásica a tierra es una de las fallas asimétricas (causadas por líneas que caen a tierra, por cadena de aisladores que se rompen debido a las cargas de hielo, por daños permanentes en las torres y por fallas de los apartarrays) que más ocurren en el sistema, es la falla que con más frecuencia se presenta. El 70% y 80% de las fallas ocasionadas en el sistema son fallas monofásicas a tierra (MukeshThakre & Mishra, 2013).

Una vez realizada la conexión Dyn5 y alimentado por el lado de alto voltaje con una fuente variable trifásica, se procederá a conectar en el lado de bajo voltaje una de las tres fases libres a tierra.

En el caso del transformador trifásico didáctico, para generar el evento de cortocircuito se utiliza un interruptor bipolar de 25 A – 125 V; en el cual, al momento de cerrarse generará un cortocircuito monofásico a tierra.

Para tomar la información se procede a capturar rápidamente la curva de corriente de cortocircuito con la ayuda del osciloscopio digital en la fase a tierra como se aprecia en la Figura 1a. Se coloca una resistencia de muy bajo valor entre la fase que va a tierra del lado de bajo voltaje y el interruptor bipolar para medir el valor de corriente en forma de voltaje con el osciloscopio.

Para la realización del evento de cortocircuito en el transformador trifásico de 50 kVA, se alimenta con una fuente regulable de 500 V trifásica por el lado de alto voltaje. Para su protección en el lado de alto voltaje se colocan fusibles en cada fase que soportan una corriente de hasta 5 A.

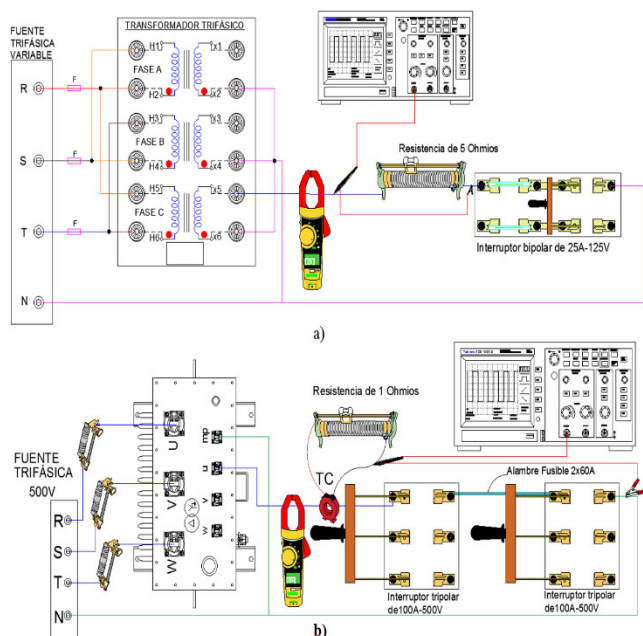


Figura 1. a) Conexión del transformador trifásico didáctico para el evento de falla monofásica a tierra. b) Conexión del transformador trifásico de 50 kVA para el evento de falla monofásica a tierra

En el lado de bajo voltaje se conecta una de las tres fases a tierra para luego tomar las mediciones de la corriente de cortocircuito. Para generar el evento de cortocircuito se utiliza un interruptor tripolar de 100 A – 500 V, al momento de cerrar las cuchillas, la medición a tomar se realiza rápidamente para no causar esfuerzos significativos al transformador y la fuente de energía; con ayuda del osciloscopio y la pinza amperimétrica como se aprecia en la Figura 1b.

Para la protección en el lado de bajo voltaje se coloca un fusible que soporta 120 A en cada fase a tierra, para esto se coloca en paralelo alambre fusible de 60 A. En cada una de las fases se coloca un transformador de corriente (TC) para reducir su valor y registrar los datos de corriente de cortocircuito en el osciloscopio.

4.4 Falla Bifásica a Tierra en los Transformadores Bajo Prueba

La falla bifásica se debe a que dos de las fases se vinculan con la tierra. Esta prueba es muy similar al del evento de falla monofásico, con la diferencia de que se conectan ahora dos fases del lado de bajo voltaje del transformador a tierra.

4.5 Modelo del Transformador Trifásico Seleccionado

En esta parte se presenta el modelo a utilizar del transformador trifásico. Se utiliza el modelo “Three-Phase Transformer (Two-Windings)” que se encuentra en la biblioteca de MATLAB-Simulink en la sección *Specialized Power Systems /Fundamental blocks/ Elements*. El modelo del transformador trifásico a utilizar cumple con los siguientes requisitos:

- Los parámetros poseen la capacidad de ajustarse a los valores calculados en las pruebas de laboratorio.

- Posee la capacidad de manejar los parámetros que se ingresan al modelo como variables para realizar la estimación de parámetros utilizados los métodos de optimización con la herramienta de Matlab *Parameter Estimation*.
- Tiene la capacidad de realizar los mismos eventos que se realizan en el laboratorio.
- Este es un modelo que tiene una sustentación teórica y que se ha venido desarrollando con normas internacionales y que aún se encuentran activas en la biblioteca de Matlab R2019a.

El bloque está constituido por tres transformadores monofásicos. Los devanados se pueden conectar con la notación estándar de bobinas, la primera letra corresponde al bobinado de alto voltaje ya sea este en estrella o delta (Y o D) y con letra minúscula en el bobinado de bajo voltaje (y o d) en estrella o delta. Si se selecciona Y con neutro en cualquiera de las bobinas, aparecerá un puerto N (MathWorks, 2019b).

Se selecciona *Three-limb core (core-type)* para trabajar con un transformador trifásico de tres ramas, tipo núcleo. Este tipo de modelo produce resultados precisos durante un evento de falla asimétrica. Durante las condiciones de voltaje asimétrico, el flujo de secuencia cero de un transformador tipo núcleo retorna por fuera del núcleo a través del aire, el acero de la estructura del transformador y de su tanque. Así, la inductancia de secuencia cero natural L_0 de un transformador de tipo núcleo es generalmente muy baja (*típicamente* $0,5 \text{ pu} < L_0 < 2 \text{ pu}$) en comparación con un transformador trifásico con tres unidades monofásicas ($L_0 > 100 \text{ pu}$) (MathWorks, 2019b).

En primera instancia se debe escoger las unidades en las que se desea trabajar, en este trabajo se utilizan los valores en por unidad para evitar que los resultados en las simulaciones se vean reflejado desde la bobina 1 o la bobina 2. La potencia que se debe trabajar será la nominal con una frecuencia de 60 Hz. Para los bobinados 1 y 2 se debe ingresar el voltaje rms, el valor de las resistencias e inductancias calculadas de las pruebas de laboratorio, tanto para el lado de alto voltaje como para el lado de bajo voltaje.

Para la parte de magnetización se debe ingresar los valores R_M y L_M , valores que son calculados de las pruebas de laboratorio. Para la inductancia L_0 solo existe esa opción ya que la resistencia de secuencia cero es muy pequeña comparada a su parte inductiva y este valor se obtiene de las pruebas de laboratorio.

4.6 Estimación de Parámetros

Se desarrolla en MATLAB una rutina donde se ingresan los valores de los parámetros iniciales que se obtienen después de realizar las pruebas de laboratorio en los transformadores. Adicionalmente, reconoce la información que se registra en el osciloscopio de los eventos de las fallas monofásicas y bifásicas a tierra en formato de Excel donde se puede generar las curvas de corriente de cortocircuito.

En Simulink se estructura mediante bloques la simulación de un transformador trifásico con la conexión deseada, donde

también se puede realizar los eventos de cortocircuitos monofásicos y bifásicos a tierra. Este archivo también reconoce los valores de corriente de cortocircuito que fueron registrados de la parte experimental en el osciloscopio con el objetivo de superponer las curvas reales y simuladas. Este modelo se aprecia en la Figura 2.

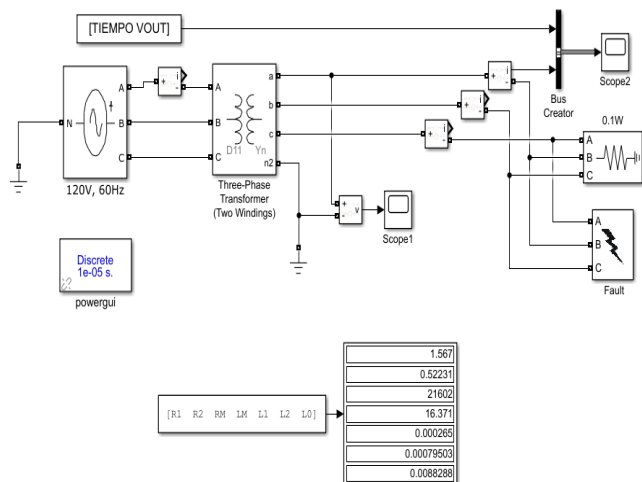


Figura 2. Estructuración del programa para la optimización de parámetros de secuencia en un transformador trifásico

Al correr este programa se generarán dos curvas; la simulada y la real medida en el laboratorio. Para la estimación de los parámetros de secuencia se utilizarán métodos de optimización no lineal de los que dispone la herramienta como son: Levenberg-Marquadt, Gradiente Descendente, Región de Confianza Reflexiva, Conjunto Activo, Punto Interior, Programación Cuadrática Secuencial (SQP), Patrón de Búsqueda y Búsqueda Simple.

La utilización de estos algoritmos se realiza con la herramienta *Parameter Estimation* de Simulink que hace que los parámetros del modelo varíen hasta un valor donde las curvas reales y simuladas de corrientes de cortocircuitos queden lo más parecidas posibles.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Parámetros de Secuencia

En la Tabla 2 se presentan de los valores iniciales de los parámetros calculados con las pruebas de laboratorio para trabajar en las simulaciones de MATLAB-Simulink.

Tabla 2. Valores Iniciales en p.u. de los Parámetros de Secuencia de los Dos Transformadores en Estudio

Valores en p.u. para trabajar en el modelo		
Parámetros	Transformador Didáctico	Transformador de 50 kVA
R_1	0,065243	0,011174
R_2	0,065243	0,011174
R_M	299,75	499,007
L_M	85,637	47,1318
L_1	0,012449	0,016175
L_2	0,012449	0,016175
L_0	0,000123	0,041204

5.2 Resultados de los Cortocircuitos en los Transformadores Trifásicos Didáctico y de 50 kVA con Conexión Dyn5

Una vez realizado el cortocircuito cuando se cierran las cuchillas del interruptor bipolar, el osciloscopio registra los datos de la forma de onda en archivos .CSV que luego son tratados en Excel.

5.3 Estimación de Parámetros

5.3.1 Transformador Didáctico

En el transcurso de las simulaciones en los transformadores bajo prueba, se determinó que el método “Gradiente Descendente” con el algoritmo “Región de Confianza reflexiva” y el método “Patrón de Búsqueda” no convergen en ninguna circunstancia debido a que estos no respetan los límites inferiores y no encuentran el punto óptimo para ir iterando para mejorar su función objetivo. Con estos dos métodos la herramienta de MATLAB-Simulink para optimizar indica un aviso de alerta de que no puede converger.

En el proceso de la estimación de parámetros en el transformador didáctico se utilizaron todos los métodos de optimización Levenberg-Marquadt, Gradiente Descendente, Conjunto Activo, Punto Interior, Región de Confianza Reflexiva, Programación Cuadrática Secuencial (SQP), Patrón de Búsqueda y Búsqueda Simple.

Para este proceso se comparan las formas de onda de corriente de cortocircuito del lado de bajo voltaje del transformador trifásico bajo prueba con la curva de corriente que resulta del modelo estructurado en MATLAB-Simulink. Los tiempos donde inicia el cortocircuito deben ser iguales tanto del modelo en MATLAB como de la parte medida en el laboratorio.

Posteriormente la estimación logra que la curva del modelo se asemeje a la curva real variando los parámetros del modelo. Al realizar las iteraciones e ir ajustando las dos formas de onda, la función objetivo que utiliza este método se va reduciendo hasta un valor que sea el óptimo durante todo el proceso. Una vez que se comprueba con el transformador didáctico que la estimación de parámetros es posible y exitosa se procede de manejar similar con el transformador de interés de 50 kVA.

5.3.2 Transformador Trifásico de 50 kVA

En la Figura 3 se presenta un ejemplo de la corriente de cortocircuito monofásico en la fase A. Una curva es el resultado de la simulación del modelo utilizado en Simulink y la otra es la medida en el laboratorio. Se parecía la diferencia entre las dos debido a que los parámetros del transformador no corresponden precisamente a la realidad. En la Figura 4 se presentan las mismas curvas luego de haber realizado un proceso de estimación de parámetros y se puede apreciar que la corriente simulada se aproxima de mejor manera a la corriente medida.

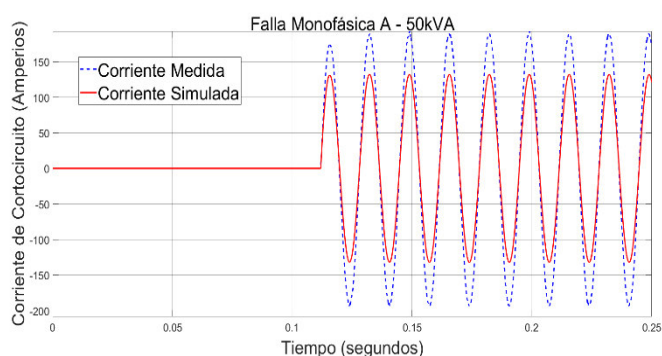


Figura 3. Curvas de corriente de falla monofásica en la fase A. Roja: del modelo de Simulink. Azul: medida. Antes del proceso de estimación de parámetros.

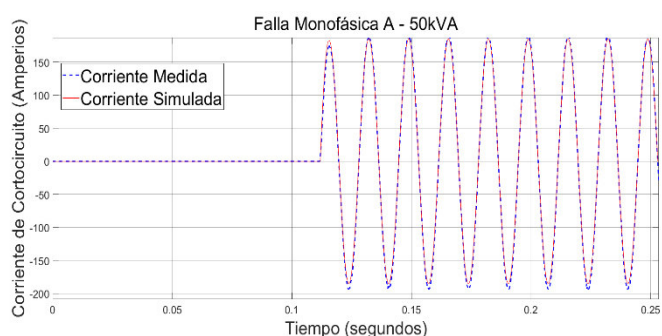


Figura 4. Curvas de corriente de falla monofásica en la fase A. Roja: del modelo de Simulink. Azul: medida. Luego del proceso de estimación de parámetros.

Tabla 3. Errores RMSE Antes y Después de la Estimación con los Métodos Utilizados

Método:	Error RMSE antes de la estimación		Error RMSE después de la estimación	
	Falla Monofásica a tierra fase A	Falla Bifásica a tierra fases AB	Falla Monofásica a tierra fase A	Falla Bifásica a tierra fases AB
	A	AB	A	AB
Levenberg-Marquadt	2,496	3,645	0,721	0,9310
Región de Confianza	2,496	3,597	0,721	0,9306
Reflexiva	2,496	3,597	0,721	0,9306
Conjunto Activo	2,495	3,551	0,721	0,9306
Punto Interior	2,807	3,614	0,721	0,9306
Programación Cuadrática	2,812	3,654	0,721	0,9306
Secuencial	2,761	3,554	0,721	0,9306
Búsqueda Simple	2,761	3,554	0,721	0,9306

En la Tabla 3 se observan los errores RMSE antes y después de la estimación utilizando todos los métodos de optimización dando como resultado valores menores lo que indica que las curvas están muy cerca entre sí.

Luego se calculó el promedio de los parámetros resultantes de los diferentes métodos de optimización, se determina un valor promedio total de todas las fallas y se presentan los parámetros finales en la Tabla 4 donde el error relativo entre los parámetros iniciales y estimados presenta la diferencia que se ajustó con este procedimiento.

Tabla 4. Resultados Promedios de los Parámetros de Secuencia del Transformador de 50 kVA

Parámetro	Promedio	Valor inicial	Error relativo %
R_1	0,009984977	0,011174	10,64
R_2	0,011512888	0,011174	3,03
R_M	502,5718512	499,007	0,71
L_M	45,92161765	47,1318	2,57
L_2	0,015803562	0,016175	2,30
L_1	0,016909791	0,016175	4,54
L_0	0,054105219	0,041204	31,31

El mejor método de estimación fue *Levenberg-Marquadt*. Con el método de punto interior, los parámetros R_M y L_M se elevan demasiado con respecto a los valores iniciales y los únicos que no varían tanto son R_1 y L_1 , es decir los de secuencia positiva, por lo que no se recomienda utilizar este método.

Para una mejor comprobación del modelo, se ha realizado en el programa computacional PowerFactory una simulación de un transformador trifásico de 50 kVA de las mismas características y efectuando los mismos eventos de fallas, monofásicas a tierra y bifásicas a tierra.

Los parámetros ingresados en este transformador son los que resultaron de las estimaciones de parámetros en MATLAB de la Tabla 4, y resultan curvas muy parecidas a la del modelo de Simulink y a la corriente medida como se presenta en la Figura 5.

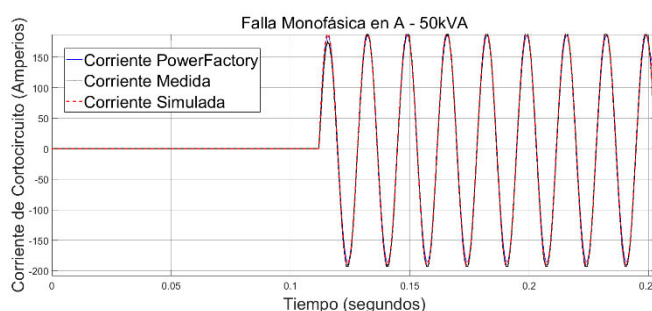


Figura 5. Curvas de corriente de falla monofásica en la fase A. Roja: del modelo de Simulink. Azul: modelo de PowerFactory. Negra: medida. Luego del proceso de estimación de parámetros.

No hay mayor diferencia entre las curvas de la Figura 5, lo que significa que bajo las mismas condiciones de falla e iguales características del transformador trifásico de 50 kVA el modelo se asemeja mucho a la realidad. En la Tabla 5 se presentan los errores RMSE entre las curvas de la Figura 5.

Tabla 5. Errores RMSE entre las Curvas Simuladas y la Medida.

Curvas comparadas			RMSE
Corriente medida	vs.	Corriente simulada en Simulink	2.8773
Corriente medida	vs.	Corriente simulada en PowerFactory	4.453
Corriente simulada en PowerFactory	vs.	Corriente simulada en Simulink	2.515

Como resultado final se obtiene la validación de los parámetros dados en la Tabla 5 como los valores de los parámetros aceptables para el transformador de 50 kVA en estudio dentro del margen de error de la estimación.

6. CONCLUSIONES

Se realizó la estimación de los parámetros de secuencia de un transformador trifásico mediante la utilización de la herramienta *Parameter Estimation* de MATLAB-Simulink. Esta herramienta contiene diferentes métodos de optimización no lineal con lo cual se logra ajustar las curvas producidas por los eventos de fallas en el transformador trifásico de 50 kVA simuladas con respecto a las medidas.

En los resultados analizados se observa que todos los métodos reducen el error RMSE, pero este valor no es el único que se impone para decidir cuál es el mejor método para estimar los parámetros. En las tablas de resultados también se analiza el error relativo y en algunos métodos puede ser muy grande; esto significa que muchos parámetros diferentes pueden producir la misma curva y por esta razón no necesariamente son los valores reales. Debido a esto se requiere analizar tanto el error RMSE y el error relativo.

El modelo presentado puede tomar medidas de un transitorio de corriente de un transformador trifásico y estimar sus parámetros sin conocer los parámetros iniciales; sin embargo, en este proyecto sí se conocen estos valores y con ello se puede correr varias simulaciones y permite determinar cuál es el mejor de los métodos.

Para escoger el mejor método hay que combinar el que realice el ajuste lo mejor posible por medio del menor RMSE y por medio del menor error relativo de los parámetros de partida el cual fue en este proyecto el de *Levenberg-Marquadt*.

REFERENCIAS

- Carlson, Å., & Zürich, A. B. B. (2003). *Testing of power transformers: Routine tests, type tests and special tests*. Pro Print.
- Chiguano, B., Ramírez, J., Quilumba, F., & Gallardo, C. (2018). Estimación de los Parámetros Eléctricos de un Generador Sincrónico basada en Mediciones de Laboratorio usando Métodos de Optimización No Lineal. *Revista Técnica Energía*, (15).
- Chiguano, B., Valenzuela, A., & Gallardo, C. (2018). Estimación de parámetros eléctricos de la máquina sincrónica utilizando Matlab-Simulink. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- IEC. (2011). IEC 60076-1:2011 Power transformers - Part 1: General. Recuperado de <https://webstore.iec.ch/publication/588>
- IEEE. (2013). IEEE 80-2013 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Recuperado de <https://standards.ieee.org/standard/80-2013.html>
- IEEE. (2015). IEEE C57.12.90-2015—IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. Recuperado de https://standards.ieee.org/standard/C57_12_90-2015.html
- MathWorks. (2019a). How the Software Formulates Parameter Estimation as an Optimization Problem—MATLAB & Simulink—MathWorks América Latina. Recuperado el 18 de junio de 2019, de <https://la.mathworks.com/help/sldo/ug/optimization-problem-formulation-for-parameter-estimation.html#d117e4545>
- MathWorks. (2019b). Implement three-phase transformer with configurable winding connections—Simulink—MathWorks América Latina. Recuperado el 18 de junio de 2019, de <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformertwowindings.html>
- MathWorks. (2019). Parameter Estimation—MATLAB & Simulink—MathWorks América Latina. Recuperado el 18 de junio de 2019, de <https://la.mathworks.com/help/sldo/parameter-estimation.html>
- MukeshThakre, S. K. G., & Mishra, M. K. (2013). Distribution System faults Classification and Location Based on Wavelet Transform. *International Journal on Advanced Computer Theory and Engineering (IJACTE) ISSN (Print)*, 2319-2526.
- Ramos, Angel, & Burgos, J. C. (2017). Influence of tertiary stabilizing windings on zero-sequence performance of three-phase three-legged YNyn transformers. Part I: Equivalent circuit models. *Electric Power Systems Research*, 144, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.065>
- Ramos, Angela, Burgos, J. C. V., Moreno, A., & Sorrentino, E. (2013). Determination of Parameters of Zero-Sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YNyn Transformers Based on Onsite Low-Voltage Tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, 1618-1625. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2013.2259184>
- Reyes Ruiz, E. (2012). *Determinación de la impedancia homopolar de transformadores de potencia*. Universidad Carlos III De Madrid, Madrid, España.
- Sorrentino, E., & Burgos, J. C. (2012). Comparison of methods for measuring zero sequence impedances in 3-phase core-type transformers. *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2012.6398626>
- Tibanlombo, V., & Granda, N. (2018). *Estudio de la respuesta en frecuencia mediante pruebas de impulso para la evaluación del estado del aislamiento en transformadores*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

BIOGRAFÍAS



Oscar Fernando Cuasapaz Bejarano, nació el 20 de julio de 1986 en Ibarra provincia de Imbabura, Ecuador. Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el 2019. Sus áreas de interés son los Sistemas Eléctricos de Potencia y Construcción de Redes de Distribución.



Juan D. Ramírez Guasgua, se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el 2015. Actualmente está realizando sus estudios de posgrado en Administración de Empresas de los Sectores Estratégicos en la Escuela Politécnica Nacional. Se ha desempeñado como especialista técnico en la construcción de líneas de transmisión de electricidad en CELEC EP TRANSELECTRIC y en la actualidad trabaja como Profesor Ocasional en el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés incluyen: teorías de sistemas y control aplicadas al sistema eléctrico de potencia, modelación y simulación de sistemas eléctricos, ingeniería de alto voltaje, y operaciones comerciales del sector eléctrico.



Fausto Guillermo Avilés Merino, Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia, de la Escuela Politécnica Nacional de Quito 1978. Título de PROFESOR de la Escuela Politécnica Nacional 2003, Magister en Ingeniería Industrial y Productividad MSc. 2007. Coordinador de la carrera de Ingeniería Eléctrica 2001-2013, Profesor de la EPN hasta el 2014. Actualmente Profesor Honorario a tiempo parcial.



Nelson V. Granda, obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2006 y de Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan (Argentina), en el año 2015. Se ha desempeñado como Ingeniero Eléctrico en varias instituciones del sector eléctrico y petrolero como son el

Operador Nacional de Electricidad (CENACE), Petroamazonas EP y CELEC-EP TRANSELECTRIC.

Actualmente se desempeña como parte del staff docente del Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son análisis y control de sistemas eléctricos de potencia en tiempo real y aplicaciones de Sistemas de Medición de Área extendida (WAMS) basados en unidades de medición sincrofasorial (PMU).



Franklin L. Quilumba, obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador, en el 2008. Realizó sus estudios de posgrado en la Universidad de Texas Arlington, en Arlington, Estados Unidos de América, donde obtuvo el grado de Master of Science y el título de Doctor of Philosophy Ph.D., en Ingeniería Eléctrica,

en el 2014. Entre 2014 y 2018 fue docente titular en el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. En la actualidad se desempeña como ingeniero de protecciones de sistemas de transmisión de la compañía Oncor Electric Delivery, Fort Worth, TX, USA. Sus áreas de interés son estabilidad, protección y control de sistemas eléctricos de potencia.

Evaluación de OPS para la Reducción de la PAPR en un Sistema OFDM con Canal Multitrayecto

Peñaherrera, María¹ ; Reinoso, Diego^{1*} 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

Resumen: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una tecnología de comunicación inalámbrica que tiene ventajas como alta eficiencia espectral, alta tasa de transmisión y es robusta a la propagación por multitrayecto. Sin embargo, su principal desventaja es que tiene alta PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). Este artículo presenta la evaluación de la técnica OPS (Orthogonal Pilot Sequence) para la reducción de la PAPR en un sistema OFDM con canal multitrayecto. Para la evaluación se consideran dos tipos de canales multitrayecto selectivos en frecuencia, con y sin línea de vista. Se evalúa la técnica OPS obteniendo la gráfica del BER (Bit Error Rate) vs Eb/No (energy per bit to noise power spectral density ratio) y la gráfica de la CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function) para distintos parámetros. Los resultados muestran una reducción de la PAPR cuando se utiliza la técnica OPS y una mejora en el BER.

Palabras clave. OPS, PAPR, OFDM, Canal multitrayecto.

Evaluation of OPS for PAPR Reduction in an OFDM System with Multipath Channel

Abstract: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a wireless communication technology that has advantages such as high spectral efficiency, high transmission rate, and robustness to multipath propagation. However, its main disadvantage is the high PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). This article presents the evaluation of OPS (Orthogonal Pilot Sequence) for PAPR reduction in an OFDM system with multipath channel. For the evaluation, two types of frequency selective multipath channels, with and without line of sight, are considered. OPS is evaluated obtaining the BER (Bit Error Rate) vs Eb/No (energy per bit to noise power spectral density ratio) graph and the CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function). The results show a reduction in the PAPR when using the OPS technique and an improvement in the BER.

Keywords. OPS, PAPR, OFDM, Multipath channel.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las comunicaciones inalámbricas se han convertido en parte fundamental de la vida diaria de las personas a nivel mundial, debido a que permiten mantener una comunicación sin la necesidad de estar conectados directamente a un enlace físico. Varios estándares para las comunicaciones inalámbricas utilizan la técnica de modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) por sus grandes ventajas, tales como alta tasa de transmisión, alta eficiencia espectral y robustez a la propagación por multitrayectoria. No obstante, OFDM también cuenta con desventajas como la alta PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) que esta posee, la misma que tiene una gran probabilidad de suceder en el transmisor. La alta PAPR puede ocasionar que el HPA (High Power Amplifier) provoque distorsiones no lineales y radiación fuera de banda en los símbolos OFDM que a su vez también influye en el BER (Bit Error Rate) (Toapanta, 2017). En la práctica todos los transmisores OFDM utilizan un HPA por lo que la reducción de la PAPR es un proceso muy importante.

La reducción de la PAPR puede ser posible mediante diversas técnicas dentro de las cuales se involucra la distorsión y la no distorsión de las señales. Entre las técnicas con distorsión se tienen: CAF (Clipping and Filtering), PW (Peak Windowing), CTs (Companding Transforms). Cada una de estas técnicas introducen radiación dentro y fuera de banda lo que como consecuencia degrada la tasa de error de bit. Entre las técnicas sin distorsión se tienen: SLM (SeLected Mapping), PTS (Partial Transmit Sequences), TR (Tone Reservation), TI (Tone Injection), Codificación (Coding), que son técnicas que podrían ocasionar reducción en la tasa de transmisión de datos además de no realizar un control de los datos que son transportados (Paredes, 2014).

También se tiene técnicas que no necesitan de información adicional, tales como: CS (Constellation Shapping) que busca la reducción de los picos de PAPR mediante esquemas que realizan modificaciones en los puntos de la constelación en el dominio de la frecuencia, a pesar de no afectar la tasa de transmisión de datos, esta técnica puede ocasionar un incremento considerable de la energía de bit por símbolo. La

diego.reinoso@epn.edu.ec

Recibido: 05/08/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/tp.vol44n2.04

técnica OPS (Orthogonal Pilot Sequence) usa una rejilla 2D-PSAM (Two-Dimensional Pilot-Symbol Assisted Modulation) que generalmente se usa en la estimación de canales OFDM coherentes, las secuencias de pilotos son utilizadas tanto para estimar el canal como para la reducción de los picos de las señales y no requiere la transmisión de información secundaria (Fernandez-Getino et al., 2006).

Este artículo presenta la simulación de un sistema OFDM que usa la técnica OPS para reducir la PAPR. Para analizar el efecto del número de pilotos en la técnica OPS, se prueban dos casos con pilotos cada 4 y cada 8 subportadoras, respectivamente. El canal de comunicaciones utilizado se modela con un desvanecimiento selectivo en frecuencia que sigue una distribución de Nakagami y con ruido blanco AWGN (Additive White Gaussian Noise). Los resultados se presentan con gráficas del BER y la CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function).

El resto del artículo es organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta una breve descripción de OFDM, el problema de la PAPR y el amplificador de potencia. La sección 3 presenta una descripción del canal inalámbrico y las principales distribuciones para modelar el mismo. Luego, la sección 4 explica la técnica OPS. La sección 5 presenta los resultados obtenidos en la simulación. Finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones a las que se llegó con este trabajo.

2. SISTEMA OFDM

Los sistemas OFDM también son conocidos como sistemas MCM (Multicarrier Modulation) y son un método de modulación digital que utiliza múltiples portadoras ortogonales de banda estrecha en lugar de utilizar una sola banda que ocupe todo el ancho de banda, con el fin de evitar tener muchos moduladores y filtros en el transmisor. Es un sistema que soporta diferentes tasas binarias, es robusto frente al ruido, lo que lo hace un sistema adecuado para comunicación inalámbrica.

En un sistema OFDM se establece el número de subportadoras (N) en base al ancho de banda que tiene el canal, la velocidad con la que se transmiten los datos y el tiempo que dura el símbolo útil, el inverso de la duración de este tiempo útil ($N=1/T$) denota la separación a la que se encuentran las portadoras. El número de portadoras se encuentra relacionado con la cantidad de puntos complejos que son procesados por la FFT (Fast Fourier Transform) y el rango de subportadoras que se pueden emplear puede ser de varias decenas o hasta varios miles. De acuerdo con la aplicación, se puede reducir o aumentar la velocidad que tienen los datos y el valor del intervalo de guarda (Jiménez et al.).

La ortogonalidad es considerada como una de las principales diferencias entre los sistemas OFDM y otros procedimientos de multiplexación basados en frecuencia, esta característica hace que entre portadoras pueda existir una separación óptima y evitar la necesidad de una banda de guarda entre subportadoras.

A) PAPR

La PAPR es definida como la relación entre la potencia pico y la potencia media de una señal. Se puede representar la PAPR matemáticamente mediante N_m muestras de una señal, $x[n]$ con $0 \leq n \leq N_m-1$, las ecuaciones (1) y (2) representan la potencia pico y la potencia media, respectivamente.

$$P_{max} = \max |x[n]|^2 \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N_m} \sum_{n=0}^{N_m-1} |x[n]|^2. \quad (2)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones (1) y (2), la PAPR está dada por

$$PAPR = \frac{P_{max}}{\bar{P}} = \frac{\max |x[n]|^2}{\frac{1}{N_m} \sum_{n=0}^{N_m-1} |x[n]|^2} \quad (3)$$

B) Amplificador de potencia

El HPA es un amplificador de potencia que se encuentra en la última etapa de los transmisores, es el encargado de amplificar la potencia de la señal con el fin de entregar a la antena una potencia con la máxima eficiencia (Toapanta, 2017). Para la utilización del HPA se debe considerar el parámetro back-off o también conocido como punto de operación para calcular la eficiencia de HPA utilizado, este punto se basa en otros dos puntos importantes el IBO (Input Back-Off) y OBO (Out Back-Off) (Paredes, 2014).

El HPA está constituido de una zona lineal y una zona de saturación. Para mejorar la eficiencia del HPA se desea que opere lo más próximo a la región de saturación para una potencia promedio dada de la señal. Debido a los picos de potencia de la señal OFDM, en ciertos instantes la señal entraría en la zona de saturación causando distorsión dentro y fuera de banda. Una solución es mover el punto de operación del amplificador a la zona lineal realizando un “back-off” lo cual mejora el problema de la distorsión, pero aumenta el rango dinámico del amplificador y en consecuencia aumenta su costo. El parámetro IBO representa cuánto tiene que moverse el punto de operación en términos de la potencia de entrada. Si la PAPR supera el valor de IBO del amplificador la señal también sufrirá de distorsión dentro y fuera de banda (Paredes, 2014). Por este problema se hace indispensable el uso de una técnica para reducir la PAPR de la señal OFDM.

3. CANAL INALÁMBRICO

El canal inalámbrico es el medio no guiado por el cual viajan las señales en una comunicación inalámbrica. Este medio se encuentra expuesto a efectos y alteraciones causadas por las distancias a las que tienen lugar las comunicaciones, por las condiciones ambientales, por objetos presentes en la línea de vista entre transmisor y receptor, entre otros (Acuña y Terán, 2017).

Para modelar un canal inalámbrico comúnmente se considera únicamente el ruido blanco AWGN por facilidad. El ruido blanco indica la degradación a la que está sometida la señal

esperada debido a la presencia del ruido térmico en el canal de comunicación y en los diferentes circuitos de conforman el sistema de transmisión y recepción, sin embargo, el uso del canal AWGN no es suficiente para transmisiones inalámbricas terrestres, principalmente por la movilidad y el desvanecimiento.

El desvanecimiento a pequeña escala es otro de los fenómenos que afecta a un canal de comunicaciones. Este fenómeno presenta variaciones rápidas que se pueden modelar por variables aleatorias que siguen diferentes funciones de distribución de probabilidad. Las principales funciones de distribución consideradas en canales de comunicaciones inalámbricas son (Ramírez, 2015):

A) Rayleigh

Se utiliza este modelo cuando entre el transmisor y receptor no existe línea de vista, se usa generalmente en los lugares donde existe un gran número de elementos reflectores entre el transmisor y el receptor.

B) Rician

Se utiliza esta distribución cuando por parte de la señal dominante existe línea de vista entre el transmisor y receptor. La distribución de Rician generalmente se describe en base a un factor K , que representa la relación entre la potencia de la señal dominante y la potencia de las señales reflejadas y se encuentra definido por la ecuación (4):

$$K = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \text{ (dB)} \quad (4)$$

donde A es la amplitud pico de la señal dominante y σ^2 es la potencia de la señal reflejada.

En la distribución de Rayleigh la potencia de la señal dominante es casi nula por lo que el factor K es muy grande, pero en la distribución de Rician con una señal dominante fuerte el factor K está en el orden de unidades o decenas.

C) Nakagami

Permite caracterizar señales terrestres móviles, ambientales interiores (indoor) y radio enlaces ionosféricos. De acuerdo con el factor m , la distribución de Nakagami se aproxima a las distribuciones de Rayleigh, Rician y Media Gaussiana. La función de densidad de probabilidad que describe a esta distribución se representa como

$$p(r) = \frac{2}{\tau(m)} \left(\frac{m}{\bar{P}_r}\right)^m r^{2m-1} e^{-m\left(\frac{r^2}{\bar{P}_r}\right)} \quad (5)$$

donde, $\bar{P}_r$ es el promedio de la potencia recibida, τ es la función Gamma, y m es la figura de desvanecimiento (fading figure) cuyo valor debe ser mayor o igual a r^2 . La potencia instantánea de la señal recibida es $\frac{1}{2}$, y satisface la distribución Gamma.

Si se presentan valores reducidos del parámetro m en la distribución de Nakagami se pueden tener desvanecimientos severos en el canal. Por el contrario, en el caso de cuando m tiende al infinito, el canal converge a un canal ideal sin desvanecimiento o AWGN (Acuña y Terán, 2017).

Para cuando se utiliza la distribución de Rayleigh en el canal Nakagami el valor del parámetro m es 1, mientras que cuando se utiliza la distribución de Rician la constante k asignada a esta distribución genera el valor m y se obtiene mediante

$$m = \frac{(k+1)^2}{(2*k)+1} \quad (6)$$

A pesar de ser un modelo poco conocido, la distribución de Nakagami es igual o más útil que los modelos de Rayleigh y Rician para modelar desvanecimiento para las comunicaciones inalámbricas (Acuña y Terán, 2017).

4. TÉCNICA OPS

En los sistemas OFDM inalámbricos coherentes, los símbolos piloto se insertan usualmente en la rejilla 2D tiempo-frecuencia para la estimación del canal. La técnica OPS propone el uso de un conjunto predefinido de M secuencias piloto ortogonales, cada una de longitud N_p ($M \leq N_p$). Para cada símbolo OFDM, se selecciona la secuencia piloto que al combinarse con los datos proporcione la PAPR más baja del conjunto disponible. Este esquema subóptimo reduce la complejidad si se compara con el uso de valores de pilotos óptimos. Además, evita la transmisión de información adicional hacia el receptor, ya que es posible una detección ciega debido a las condiciones de ortogonalidad de las secuencias piloto. Para el símbolo OFDM, la secuencia $\tilde{p} = [\tilde{p}(0), \dots, \tilde{p}(N-1)]$ recoge los símbolos piloto en el dominio de la frecuencia en las correspondientes posiciones de los símbolos piloto, mientras que las demás posiciones se ponen en cero (Fernandez-Getino et al., 2006), según

$$\tilde{p}(k) = \begin{cases} \tilde{p}(k), & k \in \gamma \\ 0, & k \notin \gamma \end{cases} \quad (7)$$

donde $\tilde{p}(k)$ representa los símbolos piloto, k y γ representan el índice de subportadoras en el dominio de la frecuencia y un subconjunto de subportadoras, respectivamente (Paredes, 2014).

OPS cuenta con un conjunto finito de M secuencias piloto, $\tilde{p}_m$ con $m \in \{1, \dots, M\}$, es decir $\{\tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_M\}$ (Paredes, 2014). Estas secuencias piloto son ortogonales entre sí, por lo que deben cumplir con la condición de ortogonalidad

$$\langle \tilde{p}_m, \tilde{p}_n \rangle = 0, \quad m \neq n \quad m, n = \{1, \dots, M\} \quad (8)$$

siendo $\langle \tilde{p}_m, \tilde{p}_n \rangle$ el producto escalar. Exclusivamente, si se emplean las secuencias Walsh-Hadamard para los símbolos piloto, entonces $\tilde{p}(k) \in \{1, -1\}$, y por tanto $\langle \tilde{p}_m, \tilde{p}_n \rangle =$

$N_p \delta[m - n]$, $m, n = \{1, \dots, M\}$, donde $\delta[\cdot]$ denota la función delta de Kronecker (Paredes, 2014).

En la técnica OPS se usan las secuencias piloto del conjunto disponible $\tilde{p}_m, m = \{1, \dots, M\}$ para formar M símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia $\tilde{x}_m(k)$ $k = \{0, \dots, N - 1\}$, después se obtienen los M símbolos OFDM en el dominio del tiempo a través de la operación IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Luego se selecciona el m -ésimo símbolo OFDM, que proporcione la PAPR menor del conjunto disponible. Por lo tanto, el algoritmo OPS lleva a cabo M operaciones IFFT por cada símbolo OFDM.

5. RESULTADOS

Se implementó en Matlab un transmisor y receptor OFDM sin corrección de errores. En el transmisor, los datos primero son modulados con QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) o 64QAM. Luego, a estos datos se añaden los símbolos piloto y subportadoras null, y se realiza la conversión serie-paralelo. A continuación, se realiza la IFFT y se vuelven a convertir los datos a serie. Finalmente, se añade el prefijo cíclico y se pasa la señal por el HPA. Para el HPA se usó el modelo de Rapp que se utiliza para modelar un SSPA (Solid State Power Amplifier) (Mohan, 2013).

A la señal transmitida se le añade ruido AWGN y se pasa por un canal inalámbrico con distribución de Rayleigh o Rician, que son casos especiales de la distribución de Nakagami. Para el receptor se considera una sincronización perfecta y conocimiento del estado del canal. En el receptor primero se remueve el prefijo cíclico y se convierte la señal de serie a paralelo. Luego, se aplica la FFT y se vuelve a convertir la señal a serie. A continuación, se realiza la ecualización y se demodula la señal para obtener los datos recibidos.

El sistema OFDM simulado utilizará diferentes valores de subportadoras pilotos (N_{pilotos}), diferentes IBO para el HPA, diferentes tipos distribuciones en el canal (Dis) y diferentes tipos de modulaciones (QPSK, 16QAM y 64QAM); estos valores se indican en el análisis de cada figura. La técnica OPS para la reducción de la PAPR se aplica a la señal luego de aplicar el prefijo cíclico y antes de que pase por el HPA. Para comparación, se presentan los resultados cuando se utiliza la técnica CEPOCS (Constellation Extension Projection Onto Convex Sets) (Toapanta, 2017). Se utiliza la técnica CEPOCS ya que obtiene una buena reducción de la PAPR con un costo computacional medio por lo que es un buen punto de comparación.

A. Análisis de las Técnicas de Reducción en términos de BER vs Eb/No

El análisis de los resultados de BER vs Eb/No obtenidos al aplicar las técnicas de reducción OPS y CEPOCS se presentarán de forma gráfica. Se realizaron cien mil iteraciones para obtener estos resultados.

• Canal con Distribución de Rayleigh

Para el análisis de resultados con distribución de Rayleigh se utiliza un PDP (Power Delay Profile), donde a todos los rayos se aplica una distribución de Rayleigh. Este PDP es obtenido de la recomendación ITU-R M.1225 (M.1225, 1997), y se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. PDP DEL CANAL RAYLEIGH

# de Rayos	Retraso relativo (ns)	retraso relativo /50ns	Potencia Promedio (dB)
1	0	0	0
2	100	2	-3.6
3	200	4	-7.2
4	300	6	-10.8
5	500	10	-18.0
6	700	14	-25.2

En la Figura 1 se presenta el BER para un sistema con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB, Dis=1(Rayleigh) y modulación QPSK. En verde se presenta el BER de la señal OFDM sin aplicar ninguna técnica de reducción de PAPR, en azul se presenta el resultado cuando se aplica la técnica CEPOCS y en verde se presenta el BER con la técnica OPS. En la gráfica se puede observar que las curvas están casi sobrepuestas. En este caso se puede determinar que utilizando cualquiera de las dos técnicas no se obtiene una mejora en el BER.

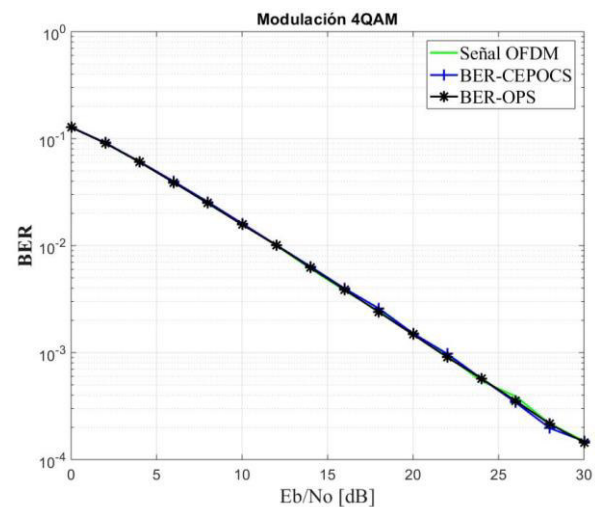


Figura 1. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB, Dis=1(Rayleigh) y modulación QPSK.

La Figura 2 presenta el resultado con modulación QPSK, pero con $N_{\text{pilotos}}=12$. Como se puede observar el comportamiento es similar al de la Figura 1 a pesar de tener más subportadoras piloto.

La Figura 3 muestra el BER de un sistema OFDM para la modulación 16QAM con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=12 dB, Dis=1(Rayleigh). En este caso se puede observar que la técnica OPS es la que mejor BER obtiene. De forma similar la Figura 4 muestra el BER con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=12 dB, Dis=1(Rayleigh). Se puede observar que en este caso también la técnica OPS es la que mejor BER obtiene. Además, se puede concluir que al aumentar el número de subportadoras piloto la técnica OPS logra mayor reducción de la PAPR y por ende la mejora en el BER es más representativa.

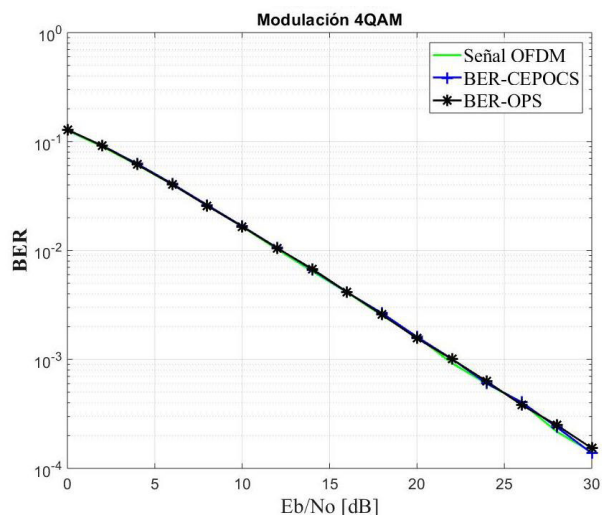


Figura 2. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$ dB, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh) y modulación QPSK.

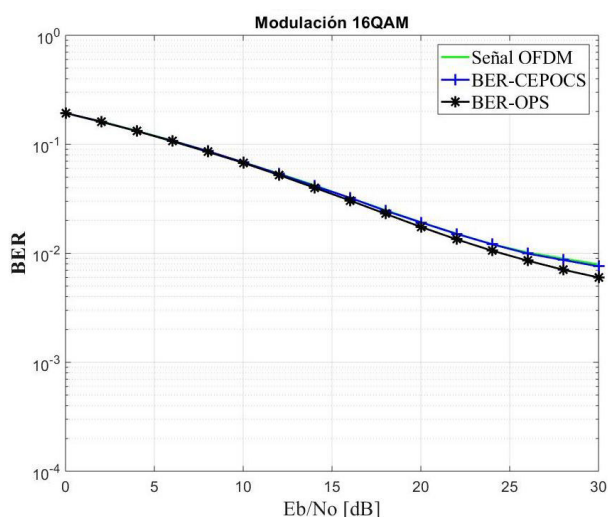


Figura 3. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=12$, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh) y modulación 16QAM.

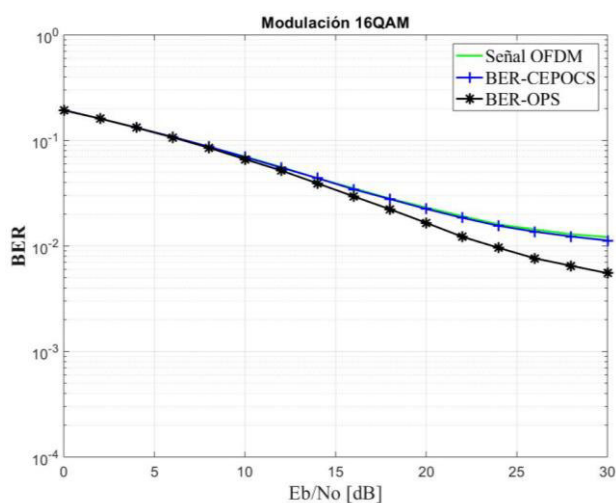


Figura 4. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=12$ dB, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh) y modulación 16QAM.

- Canal con Distribución de Rician

Para el análisis de resultados con distribución de Rician se crea un PDP, donde el primer rayo es LOS (Line of Sight) por lo que se le aplica distribución de Rician y los restantes son NLOS (Non Light of Sight) y se les aplica distribución de Rayleigh. Este PDP se obtiene de la recomendación ITU-R M.1225 (M.1225, 1997), como se indica en la Tabla 2. El factor de Rice (K) que se considera para la trayectoria LOS es de 3 dB. El canal consiste en 5 trayectorias con los retardos y potencias promedio que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. PDP DEL CANAL RICIAN

# de Rayo	Retraso Relativo (ns)	Retraso relativo /50ns	Potencia Promedio (dB)	Factor Rice k(dB)
1	0	0	0	3
2	60	1	-17.0	-
3	100	2	-18.3	-
4	130	3	-19.1	-
5	250	5	-22.1	-

En la Figura 5 se presenta el BER de un sistema OFDM con modulación QPSK, $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$ dB, $\text{Dis}=2$ (Rician). Lo que primero se puede observar es que el BER es mejor cuando se usa un canal Rician comparado con el canal Rayleigh. Esto se da porque el desvanecimiento de tipo Rician es menos severo que el de tipo Rayleigh. El otro resultado que se puede observar es que el BER de las tres curvas mostradas dan un BER similar.

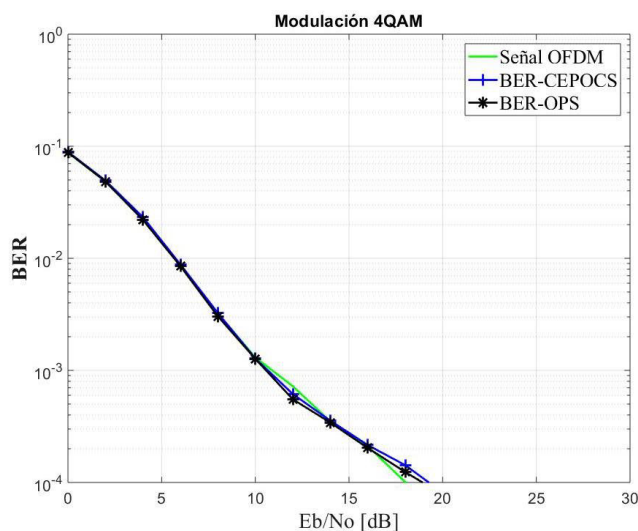


Figura 5. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$ dB, $\text{Dis}=2$ (Rician) y modulación QPSK.

La Figura 6 presenta los resultados cuando el número de pilotos es 12. El comportamiento que se puede observar es similar al de la Figura 5. Se puede concluir que cuando se usa modulación QPSK no se tiene mejora en el BER a pesar de utilizar las técnicas de reducción de la PAPR.

La Figura 7 muestra el BER de un sistema OFDM para la modulación 16QAM con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=12$ dB, $\text{Dis}=2$ (Rician). En esta figura se puede observar que usando la técnica OPS con 4 pilotos y modulación 16QAM se consigue una pequeña mejora en el BER comparada con la técnica CEPOCS. Un resultado similar se presenta en la Figura 8 usando 12 pilotos para la técnica OPS. En esta figura se

observa una mejora más importante en el BER comparado con la técnica CEPOCS.

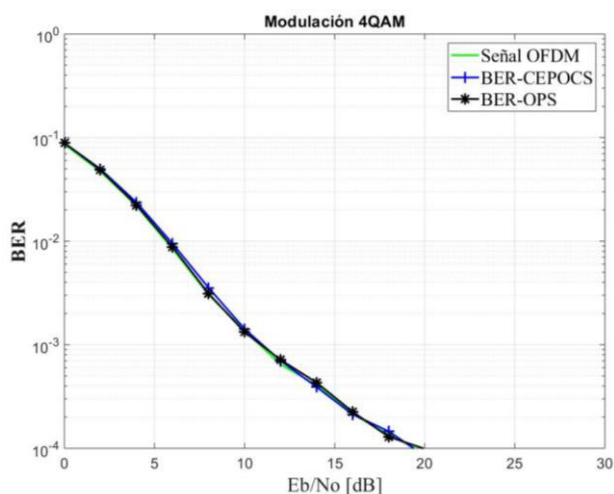


Figura 6. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=8 dB, Dis=2(Rician) y modulación QPSK.

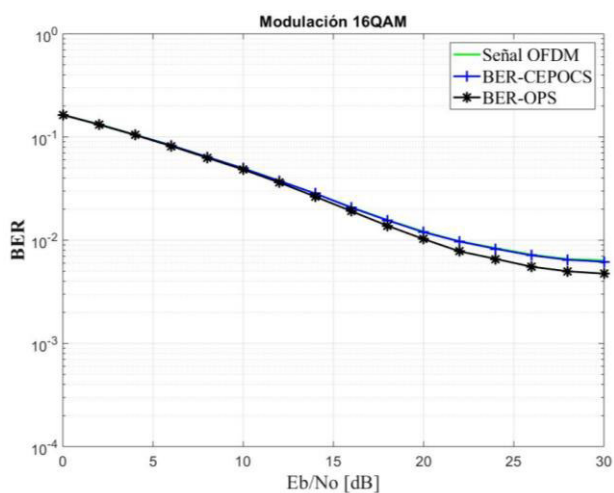


Figura 7. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=12 dB, Dis=2(Rician) y modulación 16QAM.

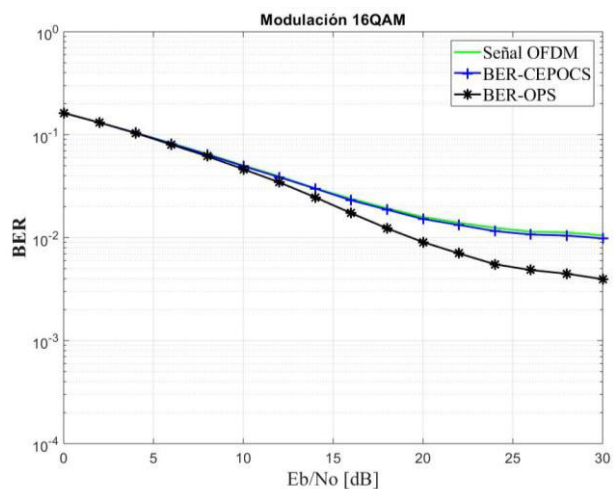


Figura 8. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=12 dB, Dis=2(Rician) y modulación 16QAM.

De los resultados de esta sección se puede concluir que la técnica OPS obtiene mejores resultados en el BER para la

modulación 16QAM. Otro resultado que se puede obtener es que, a mayor número de pilotos utilizados, la técnica OPS obtiene un mejor resultado en el BER. Por otro lado, se pudo observar que en el caso de la modulación QPSK, ninguna de las dos técnicas de reducción de la PAPR pudo obtener una mejora en el BER. Este resultado se da por la mayor robustez que tiene la modulación QPSK ante el ruido e interferencia.

B. Análisis de las Técnicas de Reducción en términos de CCDF

La comparación de los resultados obtenidos del cálculo de la CCDF se presenta mediante una curva que represente los valores de PAPR del símbolo OFDM sin aplicar ninguna técnica de reducción en línea continua (con asteriscos) color cian mientras que las curvas en las que se aplicó las técnicas OPS y CEPOCS se presentarán en línea continua (con cruces) color magenta y rojo, respectivamente.

Debido a que el análisis de CCDF se realiza antes de la aplicación del HPA, no influye el valor del IBO ni el tipo de distribución utilizada en la simulación. Por esta razón se realiza únicamente el análisis para la distribución de Rayleigh y para un solo valor de IBO=8 dB.

La Figura 9 presenta las curvas de CCDF para la modulación QPSK con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8, Dis=1(Rayleigh). Se puede observar que ambas técnicas reducen la PAPR comparada con la señal original. En este caso, la técnica CEPOCS (color rojo) es la que mejor reducción de la PAPR obtiene mientras la reducción usando la técnica OPS es menor.

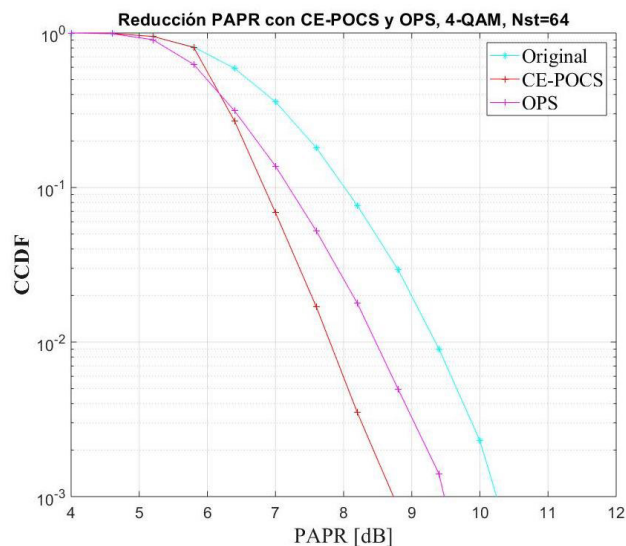


Figura 9. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB y modulación QPSK.

La Figura 10 presenta las curvas de CCDF para la modulación QPSK con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=8, Dis=1(Rayleigh). Se puede observar que ambas técnicas reducen la PAPR comparada con la señal original. Sin embargo, el resultado es inverso comparado con la figura anterior. Cuando se tienen 12 pilotos, la técnica OPS (magenta) es la que mejor reducción de la PAPR obtiene. Este resultado se da porque al tener más subportadoras piloto, la técnica tiene más combinaciones de pilotos que pueden dar una mejor reducción de la PAPR.

La Figura 11 y Figura 12 presentan las curvas de CCDF de un sistema para la modulación 16QAM con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh) y $N_{\text{pilotos}}=12$, respectivamente. Se puede observar que en ambas figuras la reducción de la PAPR obtenida por la técnica CEPOCS es pequeña. Este resultado se da porque la técnica CEPOCS no es muy eficiente cuando se utiliza las modulaciones 16QAM y 64QAM. Por otro lado, se puede observar que cuando se usan 4 pilotos la técnica OPS obtiene una mediana reducción de la PAPR. Para el caso cuando se utilizan 12 pilotos, la técnica obtiene una muy buena reducción de la PAPR.

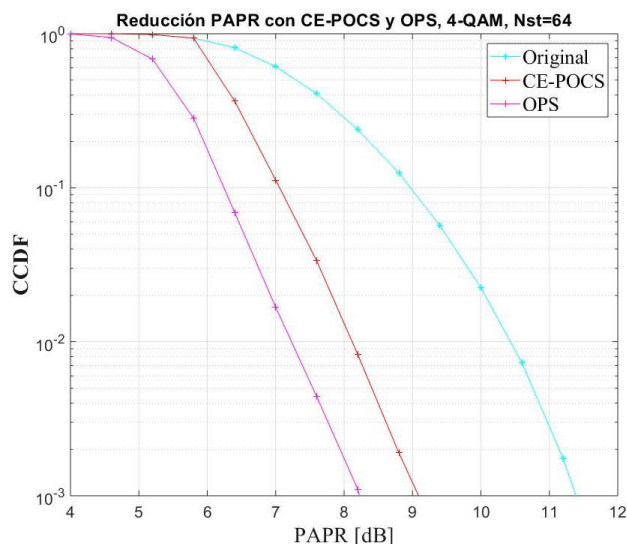


Figura 10. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación QPSK.

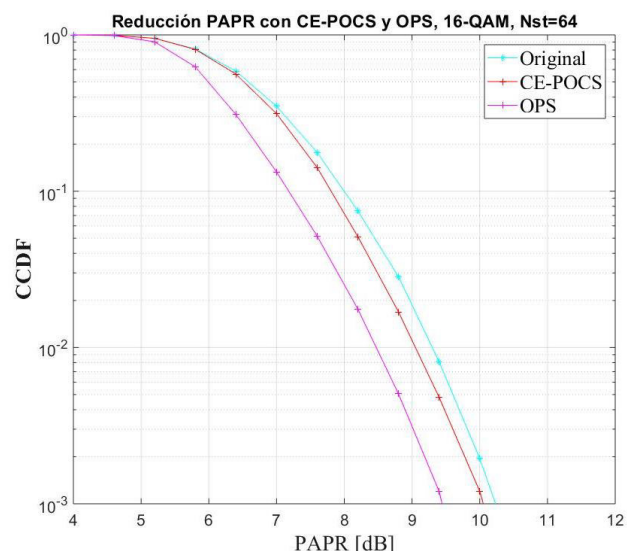


Figura 11. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación 16QAM.

Analizando todas las gráficas de la CCDF se concluye que solo en el primer caso con la modulación QPSK la técnica CEPOCS tiene más reducción de PAPR que la técnica OPS. En el resto de las modulaciones siempre se tiene mejores resultados aplicando la técnica OPS, siendo mayor la reducción de PAPR cuando se tiene 12 subportadoras piloto.

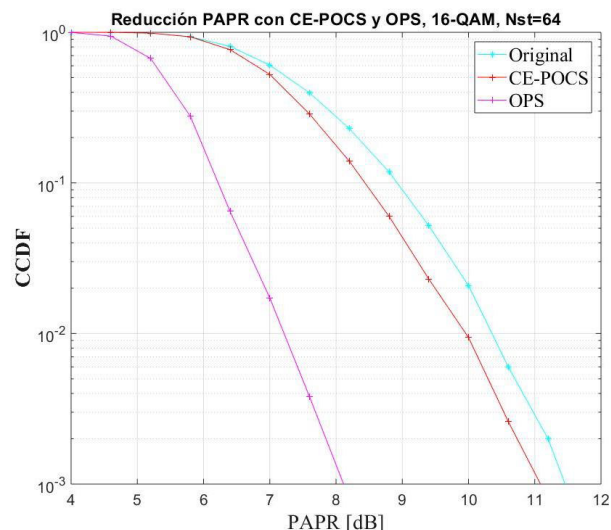


Figura 12. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación 16QAM.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los resultados de la simulación de un sistema OFDM utilizando la técnica OPS para la reducción de la PAPR usando un canal con distribución de Nakagami. De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que a medida que el número de pilotos en un sistema OFDM aumenta se tienen mejores resultados de reducción de la PAPR usando la técnica OPS. Sin embargo, hay que considerar que a mayor número de pilotos la eficiencia espectral del sistema OFDM disminuye. Por esta razón es muy importante seleccionar adecuadamente el número de pilotos para obtener una reducción en la PAPR sin perjudicar substancialmente la eficiencia espectral. Otra conclusión que se pudo obtener es que el uso de la técnica OPS mejora la BER cuando se utilizan las modulaciones 16QAM y 64QAM, independientemente del número de pilotos que se consideren.

Utilizando la técnica CEPOCS se tienen mejores resultados de reducción de la PAPR en términos de CCDF para sistemas con modulación QPSK. Para sistemas con modulaciones más altas, 16QAM y 64QAM, la reducción es mínima. Esto debido a que los puntos de la constelación de QPSK tiene mayor posibilidad de estar dentro de las restricciones de la técnica, mientras que en las otras modulaciones gran parte de los puntos están fuera del límite permitido.

De las simulaciones del BER vs E_b/N_0 se pudo apreciar que el BER es mejor cuando se utiliza un canal de Rician ya que este desvanecimiento es menos severo comparado con uno de tipo Rayleigh. Ambos tipos de desvanecimiento fueron obtenidos a partir de una distribución de Nakagami lo que demuestra la versatilidad de utilizar esta distribución para una simulación de un canal inalámbrico.

REFERENCIAS

Jenny E. Acuña Molina, M. José Terán Jaramillo. (2017). *Simulación en Matlab de los métodos de acceso OFDMA y SC-FDMA para la tecnología LTE sobre un canal inalámbrico AWGN y un canal multitrayectoria con*

- distribución Nakagami. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17385>
- M. J. Fernandez-Getino Garcia, O. Edfors and J. M. Paez-Borralló. (Jan, 2006). Peak power reduction for OFDM systems with orthogonal pilot sequences. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, 47-51.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2006.1576525>
- Leonardo Jiménez, Joaquin Parrado, Carlos Quiza, Carlos Suárez. (s.f.). *Modulación multiportadora ortogonal*. Obtenido de <file:///C:/Users/DELL/Downloads/Dialnet-ModulacionMultiportadoraOFDM-4797263.pdf>
- M.1225, R. I.-R. (1997). GUIDELINES FOR EVALUATION OF RADIO TRANSMISSION TECHNOLOGIES FOR IMT-2000.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-I!!PDF-E.pdf
- Mohan Seshadri, Yasir. Rahmatallah. (Fourth Quarter 2013). Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey and Taxonomy. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 4, 1567–1592.
<https://doi.org/10.1109/SURV.2013.021313.00164>
- Paredes, D. M. (2014). *Algoritmos para la reducción de picos de potencia en los sistemas OFDM*. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20549/tesis_martha_cecilia_paredes_paredes_2014.pdf. Madrid, España
- Ramírez, G. L. (2015). *Análisis de un sistema MB-OFDM-UWB en canales Nakagami-m con modulación adaptativa M-PSK siguiendo la propuesta IEEE 802.15.3a*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/12335>. Valencia, España
- Toapanta, L. A. (2017). *Simulación de la técnica Constellation Extension de reducción de la PAPR de los sistemas OFDM*. Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17071>

BIOGRAFÍAS



María Mercedes Peñaherrera Murillo, nació en La Maná-Cotopaxi el 24 de septiembre de 1993, sus estudios secundarios fueron realizados en el Instituto Tecnológico Superior La Maná donde obtuvo el título de bachiller en Físico-Matemático. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional en la carrera de ingeniería en Electrónica y

Telecomunicaciones.



Diego Javier Reinoso Chisaguano, recibió el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional en 2009. Realizó sus estudios de postgrado en Japón, en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Nara (NAIST) a través de una beca del Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón (MEXT). Recibió el Título de Máster en Ingeniería y Doctor en

Ingeniería en los años 2013 y 2016, respectivamente. Desde septiembre de 2017 es Profesor Titular a Tiempo Completo en la Escuela Politécnica Nacional. Sus campos de investigación incluyen: sistemas OFDM, televisión digital, estimación de canales inalámbricos y procesamiento digital de señales.

Agricultura de Precisión: Preprocesamiento y Segmentación de Imágenes para Obtención de una Ruta de Navegación Autónoma Terrestre

Moreano, Gabriel^{1*} ; Cajamarca, Julio¹ ; Tenicota, Alex¹ 

¹*Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ingeniería Mecánica, GIMAN, Riobamba, Ecuador*

Resumen: La agricultura de precisión busca aumentar la productividad de las actividades agrícolas a nivel mundial, en este marco de desarrollo la navegación autónoma es un pilar fundamental ya que la mayoría de actividades agrícolas implican desplazamientos extensos de personas o vehículos; la navegación autónoma terrestre sobre parcelas de cultivos tiene ciertas complicaciones como el deslizamiento de los vehículos sobre los terrenos lo que complica implementar sistemas de odometría, otra complicación es la dificultad de implementar marcas de navegación para usar sistemas de localización. Este trabajo presenta un sistema de visión por computador donde se pretende usar a las hileras de cultivo como marca de navegación para un vehículo agrícola, emulando el comportamiento de un robot seguidor de línea. Una cámara de resolución media toma 30 fotogramas por segundo para que posteriormente un algoritmo procese las imágenes eliminando problemas de perspectiva, luz ambiental y obstáculos en el cultivo para identificar eficientemente la hilera de cultivo que se encuentra precisamente debajo del vehículo. Obtenida la marca de navegación y realizando una aproximación de las dimensiones longitudinales de la realidad con las dimensiones longitudinales en píxeles de las imágenes, se puede obtener un estado estimado del vehículo respecto a la marca antes identificada.

Palabras clave. *visión por computador, segmentación, OpenCV, agricultura de precisión, C++.*

Precision Agriculture: Preprocessing and Segmentation of Images to Obtain an Autonomous Land Navigation Route

Abstract: Precision agriculture seeks to increase the productivity of agricultural activities worldwide, autonomous navigation is a fundamental objective in this development framework because most agricultural activities involve extensive displacement of people or vehicles; Autonomous land navigation on crop plots has certain complications such as the sliding of vehicles on the land, which complicates the implementation of odometry systems, another complication is the difficulty of implementing navigation marks to use location systems. This work presents a computer vision system that intends to use the crop rows as a navigation mark for an agricultural vehicle emulating the behavior of a line follower robot. A camera takes 30 frames per second that will be processed by an algorithm that will eliminate problems of perspective, ambient light and obstacles in the crop to efficiently identify the crop row that is just below the vehicle. With the navigation mark and making an approximation of the longitudinal dimensions of reality with the longitudinal dimensions in pixels of the images, an estimated state of the vehicle can be obtained with respect to the previously identified mark.

Keywords. *computer vision, segmentation, OpenCV, precision agriculture, C++.*

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad existente en suelos y cultivos ha sido reconocida como uno de los grandes problemas de la agricultura, esta no heterogeneidad en suelos y plantas produce pérdidas en todas las etapas de una producción agrícola. La tecnología conocida como agricultura de precisión trata de aumentar la productividad agrícola aumentando la eficiencia en ciertos procedimientos como también busca reducir el impacto ambiental generado por un proceso siembra-cosecha.

La definición más simple de agricultura de precisión la establece como un grupo de tecnologías que permiten la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, semillas, pesticidas, fungicidas, etc, en forma variable dentro de una parcela de terreno, de acuerdo con los requerimientos o potencial productivo de varios sectores homogéneos. (Ortega & Flores, 1999)

La agricultura de precisión surge en los años 80 en Estados Unidos como una opción para ahorrar recursos al momento de

gabriel.moreano.epn@gmail.com

Recibido: 20/07/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/rp.vol44n2.05

aplicar insumos o pesticidas a los cultivos valorando la variabilidad de su desarrollo, en (Godwin et al., 2002) se puede encontrar una reseña de la evolución de la agricultura de precisión en Estados Unidos hasta el año 2002, en el caso de Latinoamérica la aplicación de tecnologías para incrementar la productividad agrícola da sus primeros pasos en el año 2006 en el cono sur del continente con la vinculación de países como Uruguay, Argentina, Chile y Bolivia en investigación agrícola, tal como se muestra en (Bongiovanni, Mantovani, Best, & Roel, 2006), esta referencia es un libro que recoge la información más relevante para la agricultura de precisión, como la forma de obtención de información relevante en suelos y plantas, el mapeo de suelos, el geo posicionamiento y como dosificar la aplicación de insumos mediante las tecnologías.

La agricultura de precisión se basaba en tres etapas marcadas, la adquisición de información, el análisis de la información y la aplicación de insumos, hasta hace unos 5 años. Actualmente la agricultura de precisión se ha expandido a todas las áreas de la producción agrícola como: el análisis de suelos mediante sistemas de información geográfica (SIG), mapas de aplicación, labrado selectivo, siembra automatizada, fumigación y fertilización selectiva y la cosecha asistida (Moreano & Ribeiro, 2017). Información adicional sobre los conceptos, objetivos, antecedentes y avances de la agricultura de precisión se puede encontrar en las referencias (MAG, 2019), (Leiva, F. R., 2003) y (Marote, M. L., 2010).

La mayoría de las tareas de agricultura de precisión implican desplazamientos grandes por parte de los actores del trabajo en parcelas extensas de terreno y en ocasiones zonas peligrosas; esto influye para que un campo importante de investigación para el desarrollo de estas tecnologías sea la navegación autónoma. Actualmente la navegación aérea ha sido el método más abordado por investigadores y desarrolladores dentro de la agricultura de precisión debido a la popularidad que se ha generado alrededor de los drones, estos dispositivos aéreos tienen facilidad para moverse sobre las parcelas de terreno utilizando sistemas de geo-posicionamiento para obtener información de desgastes de suelos, detección de plagas mediante redes de sensores, etc. Algunas aplicaciones específicas de los drones se muestran en (Lago González et al., 2011). En (Meneses, Téllez, & Velasquez, 2015) se muestra un estudio de uso de drones para la toma de muestras de suelos a fin de identificar la variabilidad y aplicar fertilizantes y abonos de manera selectiva, reduciendo la inversión en estos insumos.

La navegación terrestre por su parte es un área de estudio con un grado mayor de complejidad debido a la dificultad que tienen los vehículos para movilizarse sobre terrenos agrícolas, esto porque se encuentran con percances como deslizamientos, obstáculos, huecos, desniveles, variación de tierras, etc. Estas dificultades proporcionan un campo amplio de investigación donde investigadores han probado varias técnicas de navegación como en (Tereshkov, 2015) donde el autor muestra los resultados de pruebas de navegación con acelerómetros, giroscopios y brújulas (odometría), para intentar controlar la trayectoria de navegación. Otras opciones son los sistemas de

control predictivos como el filtro de Kalman mostrado en (Bevly & Parkinson, 2007) o las fusiones sensoriales donde se combinan las técnicas de control predictivo y la odometría, un ejemplo se puede ver en (Zhou Jun Ji, 2002).

Dentro de este campo de estudio el grupo de investigación GIMAN de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ha suscrito un convenio institucional con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) mediante el cual se busca dar soluciones efectivas al funcionamiento de 133 motocultores donados por el gobierno ecuatoriano a comunidades organizadas en la provincia de Chimborazo (ver Figura 1). El proyecto incluye las siguientes etapas: diagnóstico técnico del estado de los motocultores, mantenimiento correctivo de los mismos y mantenimiento mejorativo y automatización.



Figura 1. Motocultores donados por el gobierno ecuatoriano. (MAG, 2019)

Del MAG (MAG, 2019) se conoce que de los 133 motocultores donados en la provincia de Chimborazo al 1 de Julio de 2018 se tienen 58 motocultores en buen estado, 22 en estado regular y 9 motocultores en mal estado, además se desconoce el estado de 44 motocultores (ver Figura 2).

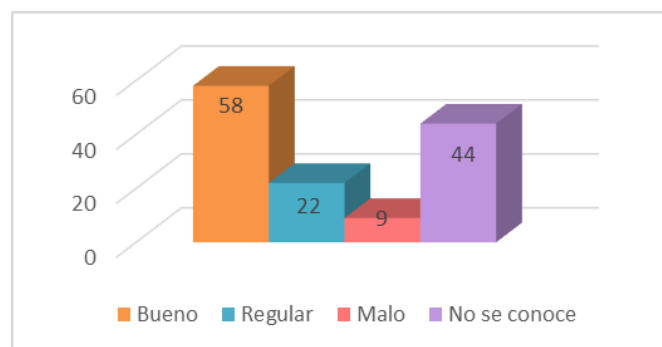


Figura 2. Estado de los motocultores al 1 de Julio de 2018.

De la misma cartera de estado se conoce que son muy pocas las comunidades que hacen uso efectivo de estos elementos, las causas son: el desconocimiento sobre: el funcionamiento y el mantenimiento de los motocultores. El problema detectado de mayor importancia fue el tiempo que demora una persona en arrancar o prender el motocultor, sin la capacitación adecuada esta tarea toma no menos a 15 minutos lo cual se traduce en una pérdida innecesaria de tiempo y producción, por esta razón las comunidades han abandonado el uso de estas herramientas teniendo al 1 de Julio de 2018 las siguientes estadísticas: 14 motocultores están en uso continuo, 11 se usan eventualmente, 32 no se usan y no se ha conseguido información de 76 motocultores (ver Figura 3).

El grupo de investigación GIMAN ha intervenido en varios motocultores de la provincia de Chimborazo reparando un total de 10 motocultores hasta la presente fecha y capacitando a la misma cantidad de comunidades.

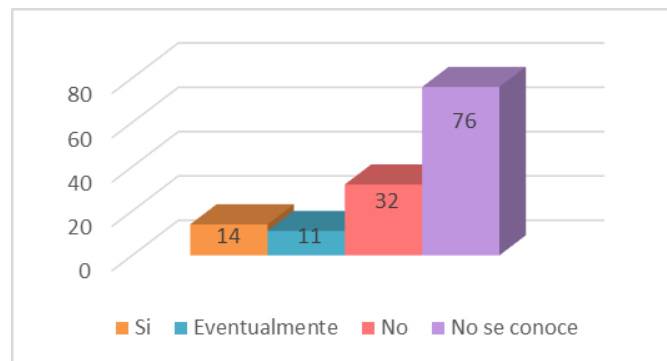


Figura 3. Uso de los motocultores al 1 de Julio de 2018.

Dentro de la última etapa de la intervención y colaboración se tiene la etapa de mantenimiento mejorativo que trata principalmente de aportar nuevas tecnologías a un proceso para hacerlo más eficiente y menos demandante para un operador humano. En este caso específico se analiza e investiga la factibilidad de dotar de cierta autonomía a los motocultores para evitar tareas repetitivas y desgastantes a los agricultores, para ello se inició el proyecto con la fase de navegación autónoma y más concretamente con la forma de medir y localizar el vehículo en una parcela de terreno.

El método de estudio seleccionado fue usar una fusión sensorial entre la navegación autónoma por medio de percepción artificial y la geolocalización. El sistema de percepción artificial intentará identificar hileras de cultivo de manera efectiva y eficiente de tal forma que se usen estas hileras de cultivo como marcas de navegación para los vehículos automatizados y el sistema de geolocalización se usará como sistema de respaldo para identificar que el motocultor no pierda su rumbo y si este está en algún punto donde no existe una hilera de cultivo, es decir, en las horillas de los terrenos donde el vehículo debe girar y regresar por una nueva hilera.

Las ventajas que presta este sistema es que no es necesario conocer el terreno donde va a moverse el motocultor, es un sistema de navegación por marcas y por ende no necesita ningún sistema de mapeo que consumiría una cantidad muy superior de recursos computacionales. En (Lía García, 2005) la autora nos muestra una reseña completa de la evolución y las técnicas de percepción artificial utilizadas para la navegación autónoma en agricultura de precisión.

La segmentación de imágenes si bien es la técnica más antigua y básica de la percepción artificial tiene ciertos beneficios como el bajo coste computacional, el procesamiento primitivo de las imágenes sin utilización de descriptores o ayudas computacionales, esto favorece en caso de imágenes de gran tamaño. Si bien el trabajo de segmentar una imagen desde el preprocesamiento de la misma hasta la detección de objetos es más complejo, puede arrojar mejores resultados que

algoritmos ya implementados como el descriptor Canny.

2. DESARROLLO DEL ALGORITMO

Como se mencionó en la introducción el objetivo del proyecto macro es dotar de cierta autonomía a un motocultor, estos vehículos tienen ciertas ventajas a la hora de intentar automatizarlos entre ellas: que solo disponen de una marcha o velocidad para avance frontal y no se apaga a bajas velocidades. Obviamente presentan también ciertas dificultades, la más importante es el problema en el control de dirección ya que no se dispone de un volante. En la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques que se desea implementar en el motocultor.

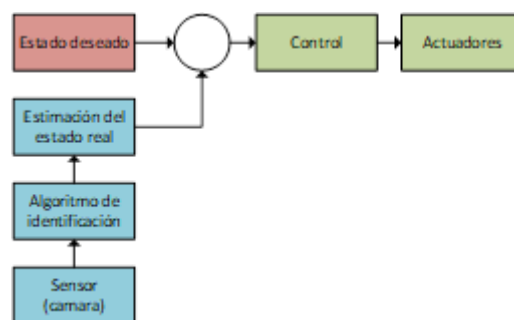


Figura 4. Diagrama de bloques automatización motocultor.

Como se aprecia en la Figura 4 el algoritmo de identificación de hileras de cultivo recibirá imágenes directamente de un sensor, una cámara en este caso, procesará estas imágenes y estimará un estado real del motocultor. Esta estimación de estado se realizará en posición y orientación dependiendo la desviación que tenga el vehículo respecto a la marca de navegación. Un motocultor puede estar alineado perfectamente, con error de posición o con error de orientación respecto a la marca de navegación (hilera de cultivo) como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Estados posibles para el motocultor respecto a las marcas de navegación. a) Alineado. b) Con error de posición. c) Con error de orientación.

Las imágenes a procesar se obtienen de una cámara configurada a una resolución de 2595x1728 píxeles, intentando equilibrar la calidad de la imagen con el coste computacional, obteniendo y procesando 5 fotogramas cada segundo. La cámara se ha ubicado en el centro del motocultor a una altura de 1,20 metros con una inclinación de 25° respecto de la vertical como se intenta ilustrar en la Figura 6. Esta configuración es la que mejores condiciones de imagen ha presentado.



Figura 6. Posición de la cámara en el motocultor.

Con la configuración de cámara antes indicada se obtienen imágenes como la mostrada en la Figura 7.



Figura 7. Imagen obtenida con la cámara montada en el motocultor.

El objetivo principal del algoritmo es identificar de manera efectiva las hileras de cultivo, para esto se debe eliminar problemas que se puedan generar en las imágenes como sombras, ramas sobre los cultivos, pérdida de cultivos, maleza, entre otros inconvenientes. Para cumplir este objetivo el algoritmo desarrollado atraviesa las siguientes etapas:

A. Eliminación de la perspectiva

Debido al ángulo de inclinación de la cámara las imágenes adquiridas tienen una perspectiva de la realidad y en su parte superior se aprecia que los objetos se van juntando, este efecto genera un problema en la identificación de cultivos a grandes distancias, para eliminar este inconveniente el primer paso del algoritmo es eliminar un tercio de la zona superior de la imagen, se puede observar el tamaño de este corte en la Figura 8.

B. Segmentación

La etapa de segmentación propiamente abarca todo el procesamiento de la imagen para identificar el cultivo. Una vez establecida la región de interés de análisis, se intenta diferenciar la capa vegetal de todo el resto de componentes del terreno, para ello lo primero es realizar una conversión de la imagen en escala de grises y posteriormente una umbralización; realizados estos pasos se obtiene una imagen de 2 bits como la que se muestra en la Figura 8; esta imagen indica de color blanco lo que puede considerarse capa vegetal y con color negro lo que puede considerarse terreno y otros objetos.

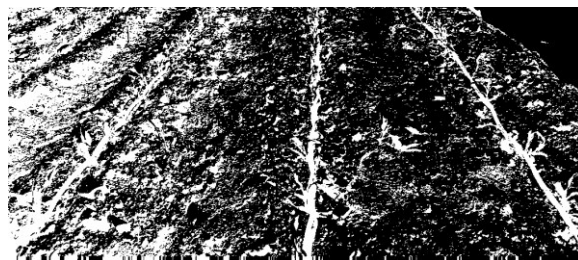


Figura 8. Imagen 7 recortada y umbralizada.

Si bien la imagen de la Figura 8 detecta la capa vegetal la imagen contiene demasiado ruido para realizar una identificación eficiente del estado del vehículo. Para mejorar la respuesta se corrige la imagen obtenida realizando la capa de coloración verde en la imagen en escala de grises, esto se logra dando un mayor peso a la componente verde de la imagen según la Ecuación 1.

$$Img_2 = f_r G_{roja} + f_v G_{verde} + f_a G_{azul} \quad (1)$$

Donde:

Img_2 es la nueva imagen con realce de coloración verde
 f_r, f_v, f_a son factores de multiplicación
 $G_{roja}, G_{verde}, G_{azul}$ son las componentes RGB de la imagen

Mediante un análisis de prueba y error se ha concluido que los valores $f_r = 0,884$, $f_v = 1,262$ y $f_a = 0,311$, entregan una respuesta muy adecuada para la combinación de colores que se tienen en una imagen de terreno. En la Figura 9 se puede observar la imagen resultante con este método de realce.

Mediante un análisis de prueba y error se ha concluido que los valores $f_r = 0,884$, $f_v = 1,262$ y $f_a = 0,311$, entregan una respuesta muy adecuada para la combinación de colores que se tienen en una imagen de terreno. En la Figura 9 se puede observar la imagen resultante con este método de realce.



Figura 9. Imagen en escala de grises con realce de coloración verde.

En la Figura 9 se observa que la imagen oscurece de manera más acertada los pixeles con mayor contenido verdoso y aclara casi a blanco puro colores que no tengan demasiado componente verde. Si se umbraliza esta imagen se obtendrá una respuesta de calidad mucho mejor que la mostrada en la Figura 8. Al momento de realizar pruebas de funcionamiento se obtuvo un problema al umbralizar una imagen con un valor fijo de umbralización, ya que las imágenes se obtienen en exteriores y existe variabilidad de luz solar, de coloración de la tierra, del cultivo, etc. Para suprimir este inconveniente se

utilizó un sistema de umbralización automático que elimine la ambigüedad existente en la iluminación ambiental. El valor de umbralización se obtiene como promedio de las intensidades de gris de cada pixel de una imagen adquirida según la Ecuación 2.

$$\forall i \in \text{filas}_{\text{imagen}} \wedge \forall j \in \text{columnas}_{\text{imagen}}:$$

$$\text{valor_umbral} = \frac{\sum \text{nivel_gris}(i,j)}{\text{filas} * \text{columnas}} \quad (2)$$

Aplicando el método de realce y la umbralización automática se obtiene una imagen similar a la mostrada en la Figura 10.

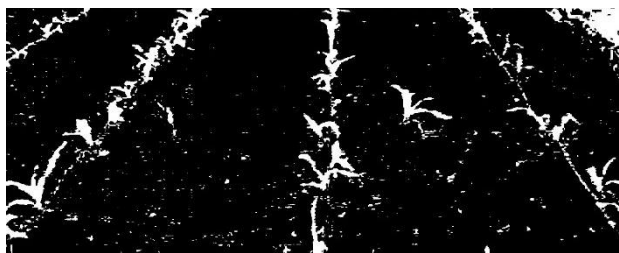


Figura 10. Imagen con realce verde y umbral automático.

En la Figura 10 ya se puede diferenciar claramente que zona de la imagen es vegetación y que zona no lo es, eliminando la ambigüedad que existía en la Figura 8. El siguiente paso se realiza para mejorar la imagen y poder obtener la marca de navegación.

C. Eliminación de pixeles aislados

El siguiente procedimiento del algoritmo busca solventar dos problemas existentes en la imagen, primero: eliminar grupos de pixeles blancos en zonas de terreno y segundo: eliminar pixeles negros dentro de zonas de vegetación. Se ejecutan entonces dos operaciones morfológicas. Primero una erosión para eliminar los pixeles negros dentro de los pixeles de cultivo y posteriormente una dilatación para eliminar los pixeles blancos en zonas de terreno. Ambos procedimientos se ejecutan con un mismo elemento estructural pero la dilatación tiene un mayor rango de acción.

Estas acciones generan una imagen donde se elimina por completo el ruido de la imagen, disponiendo únicamente de información de cultivo como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Imagen procesada por operaciones morfológicas.

En este punto es bastante probable identificar la hilera de cultivo central que actuaría como marca de navegación, pero persiste un inconveniente de confusión con las hileras de

cultivo aledañas a la central y con malezas que se encuentren cerca de la hilera de cultivo central, para esto se busca eliminar todos los pixeles blancos de la imagen que no correspondan a la línea central de cultivo. La parte elemental de este algoritmo busca eliminar todos los pixeles blancos que no pertenezcan a la hilera central de cultivo.

El algoritmo realizará una búsqueda de pixeles blancos a la izquierda y a la derecha de la columna central de cultivo y se eliminarán los pixeles que se encuentren a una distancia grande de la columna central, para este procedimiento existe un problema y es que debido a perspectiva de la imagen no se puede medir la misma distancia en la parte inferior de la imagen o en la parte superior.

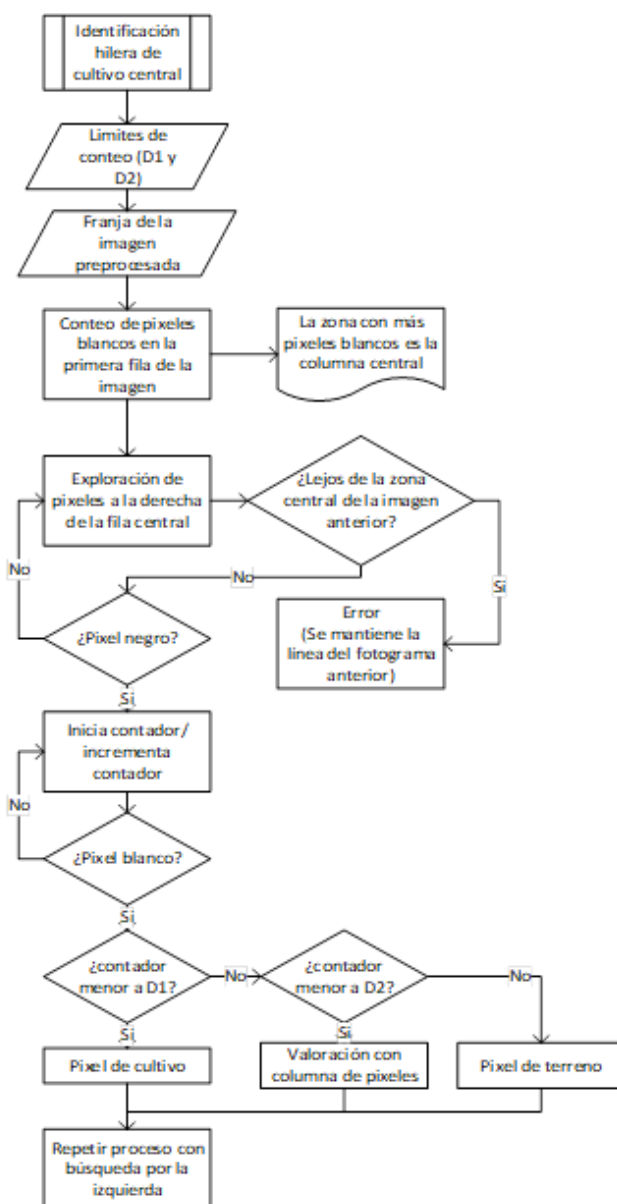


Figura 12. Diagrama de flujo para identificación de hilera de cultivo central.

Para eliminar el problema de la perspectiva se utiliza el mismo método del primer paso del algoritmo y es dividir la imagen en franjas horizontales, pero en esta ocasión no eliminará una zona de la imagen, sino que se utilizarán todas para un análisis individual. Como ejemplo se dividirá la imagen en 3 franjas

horizontales y se ejecuta el análisis del algoritmo para cada franja de la imagen según el diagrama de flujo de la Figura 12.

Realizada la búsqueda de la hilera de cultivo central se obtiene una imagen similar a lo observada en la Figura 13.



Figura 13. Hilera de cultivo central identificada

D. Bloques de cultivos

El siguiente paso para obtener la marca de navegación será construir bloques de píxeles blancos sobre los píxeles de la columna central de cultivo, esto se realiza como último paso del algoritmo mostrado en la Figura 12. Se dispone entonces de tantos bloques blancos como número de franjas se haya dividido la imagen inicial. De cada bloque de píxeles blancos se obtiene su centroide para poder identificar posteriormente la marca de navegación. En la Figura 14 se muestra una imagen con los bloques de píxeles blancos y los centroides detectados.

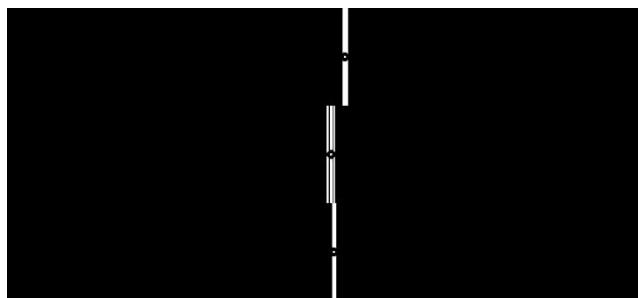


Figura 14. Bloques de píxeles y centroides

E. Obtención de la línea de navegación

Finalmente aplicando el método de aproximación por mínimos cuadrados con las ubicaciones de los centroides geométricos se obtiene los puntos superior e inferior de la línea recta que coincidiría con la hilera central de cultivo en la imagen. Si se detectan menos de dos centroides geométricos, el algoritmo devolverá un error y el sistema entregará como respuesta el estado obtenido en el frame anterior.

Los puntos superior e inferior obtenidos son las coordenadas de la marca de navegación obtenida por el algoritmo, estas coordenadas se encuentran en píxeles sobre la imagen, el paso final es entonces unir estos puntos de coordenadas para obtener una línea recta, si el algoritmo se ejecutó de manera correcta y efectiva esta línea deberá coincidir con la hilera central de cultivo de la imagen obtenida por la cámara fotográfica.

3. RESULTADOS

A. Pruebas en la obtención de la marca de navegación

Para comprobar la funcionalidad del algoritmo presentado se han tomado varias imágenes de prueba con el motocultor en funcionamiento manual y sobre varios tipos de terrenos con distintos tipos de plantaciones. Específicamente para un total de 6000 imágenes se ha tenido una eficiencia del 96%, esto quiere decir que se ha tenido problemas en 240 imágenes del total. Estas imágenes no han sido consecutivas lo cual favorece a que el algoritmo no falle en una ruta definida.

En la Figura 15 se puede observar una imagen real con la marca de navegación obtenida resultado del procesamiento de la imagen.

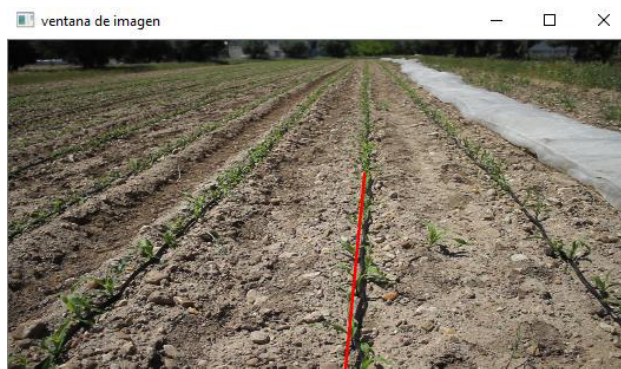


Figura 15. Marca de navegación identificada

B. Estimación del estado real del vehículo

La posición del vehículo se determinará tomando en consideración la última fila de píxeles de la imagen, donde se contabilizará el número de píxeles existentes entre el centro de la imagen, que representa el centro del vehículo, y el punto inicial de la línea de navegación. De acuerdo a la cantidad de terreno que se observa en la imagen se puede realizar una equivalencia entre píxeles y centímetros, si las imágenes de la cámara se toman con una resolución de 2592 x 1728 píxeles y se supone que la imagen en la base abarca un terreno de 1,60 metros se puede calcular entonces un factor de conversión como se ve en la Ecuación 3.

$$coef_{pixel_{cm}} = \frac{estimación_{terreno}}{ancho_{resolución}} = \frac{160cm}{1728píxeles} \quad (3)$$

$$coef_{pixel_{cm}} = 0,098cm/píxel$$

Al valor del coeficiente calculado se le dará una fiabilidad del 85% por la perspectiva horizontal de la imagen, redondeando el valor en 0,08 cm/píxel, este factor se multiplicará por la distancia medida en píxeles y se obtendrá el resultado final en centímetros.

Para poder determinar una señal de error fiable de la posición y de la orientación hay que tener en consideración a qué lado de la línea de navegación se encuentra el vehículo.

De acuerdo a la Figura 16 el vehículo está a una distancia positiva de la línea de navegación cuando se encuentra a la

izquierda de la misma, y a una distancia d negativa cuando se encuentra la derecha de la línea de navegación.

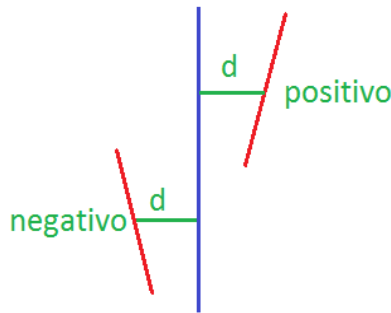


Figura 16. Identificación del signo de la distancia (d).

La orientación del vehículo se define por el ángulo que forma la línea de navegación respecto de la vertical, este valor es sencillo de calcular gracias a que se conocen los puntos de inicio y fin de la línea de navegación. El valor del ángulo se determinará por las distancias en píxeles de los lados del triángulo rectángulo que forman la línea de navegación y su tangente vertical. En la Figura 17 se observan dos triángulos formados por dos líneas de navegación que coinciden en un mismo punto inicial, a modo de ejemplo para mostrar los ángulos de orientación que se deben encontrar.

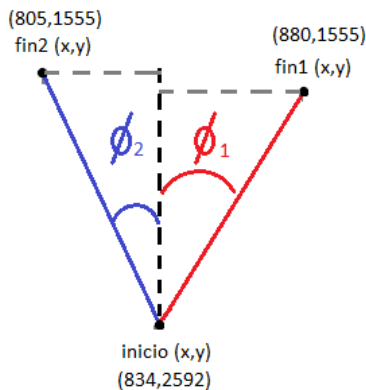


Figura 17. Ejemplo de dos ángulos de orientación del vehículo.

Conociendo los valores en píxeles de la línea de navegación es fácil determinar los ángulos de orientación de acuerdo a la Ecuación 3.6.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{fin_x - inicio_x}{inicio_y - fin_y} \right) \quad (4)$$

Para los casos mostrados en la Figura 17 se tiene:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{880 - 834}{2592 - 1555} \right) = 0,044 \text{ rad} = 2,54^\circ$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{805 - 834}{2592 - 1555} \right) = -0,027 \text{ rad} = -1,6^\circ$$

Los valores de los ángulos calculados definen la diferencia existente entre la línea de navegación y el eje longitudinal del vehículo. De acuerdo a los valores obtenidos para ϕ_1 y ϕ_2 , el valor de ángulo de orientación del vehículo será positivo cuando la inclinación de la línea de navegación sea a la derecha de la horizontal y será negativo si la inclinación es a su

izquierda, exactamente igual a lo que sucedía con la distancia de posición.

En la Figura 18 a y b se muestran resultados obtenidos con el algoritmo de identificación con una segunda marca que simula el eje de coordenadas longitudinal del vehículo.

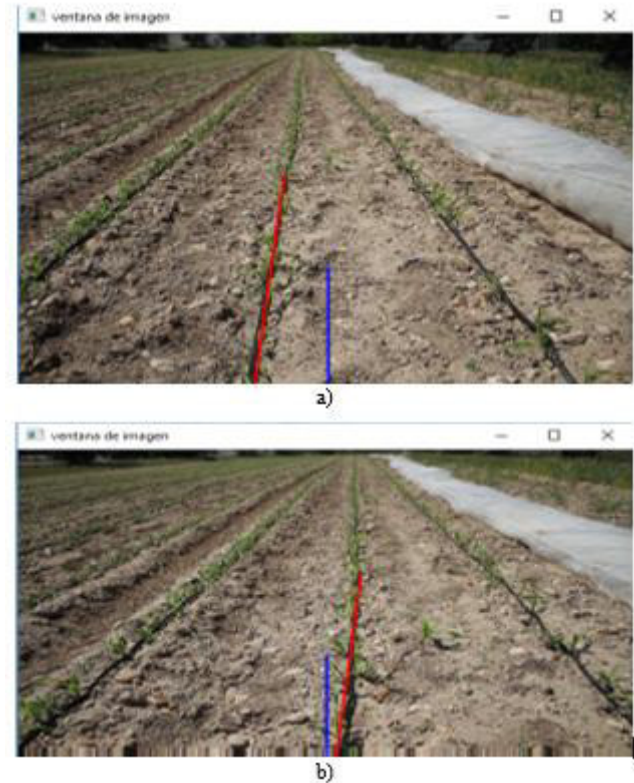


Figura 18. a) Resultado cultivo 1 ($d = 15,2 \text{ cm}$, $\phi = 1,22^\circ$). b) Resultado cultivo 2 ($d = -1,48$, $\phi = 5,49^\circ$).

4. CONCLUSIONES

Se ha podido implementar un algoritmo de identificación de hileras de cultivo lo suficientemente robusto, capaz de trabajar con imágenes obtenidas en tiempo real en exteriores; la capacidad de obtener 4 capturas por segundo se estima suficientemente sostenible para poder automatizar el movimiento frontal de un motocultor a una velocidad de avance de entre 5 y 10 Km/h.

Una cámara de 5 megapíxeles podría ser suficiente para que el algoritmo funcione de manera óptima, el incrementar la resolución de la cámara provocaría un incremento también en el coste computacional, debido a que el procesamiento se hace a nivel primitivo se considera factible incrementar la resolución de las imágenes hasta 16 megapíxeles que es el máximo tamaño que se ha probado, considerando que se deben cambiar los valores de centímetros por píxel de las imágenes.

Se puede concluir a manera global entonces de que se puede implementar este algoritmo en un sistema real como primer paso de automatización, identificando firmemente los trabajos futuros que son la implementación de actuadores, modelado del sistema, sintonización de controladores y pruebas de funcionamiento.

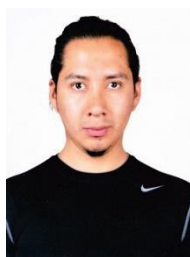
REFERENCIAS

- Bevly, D. M., & Parkinson, B. (2007). Cascaded Kalman Filters for Accurate Estimation of Multiple Biases, Dead-Reckoning Navigation, and Full State Feedback Control of Ground Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(2), 199–208. <https://doi.org/10.1109/TCST.2006.883311>
- Bongiovanni, R., Mantovani, E. C., Best, S., & Roel, Á. (2006). *AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable* (1st ed.). Montevideo. Retrieved from www.iica.int.
- Godwin, J., Earl, R., Taylor, J., Wood, G., Bradley, R., Welsh, J., ... Carver, M. J. (2002). 'PRECISION FARMING' OF CEREAL CROPS: A FIVE-YEAR EXPERIMENT TO DEVELOP MANAGEMENT GUIDELINES. Retrieved from <https://cereals.ahdb.org.uk/media/288142/pr267-final-project-report.pdf>
- Lago González, C., Sepúlveda Peña, J. C., Barroso Abreu, R., Fernández Peña, F. Ó., Maciá Pérez, F., & Lorenzo, J. (2011). Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la agricultura de precisión. *Idesia (Arica)*, 29(1), 59–69. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292011000100009>
- Leiva, F. R. (2003). *LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN: UNA PRODUCCIÓN MÁS SOSTENIBLE Y COMPETITIVA CON VISIÓN FUTURISTA*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Fabio_Leiva/publication/228425520_La_agricultura_de_precision_una_produccion_mas_sostenible_y_competitiva_con_vision_futurista/links/555ce20508ae8c0cab2a6901/La-agricultura-de-precision-una-produccion-mas-sostenible-y-
- Lia García. (2005). *NAVEGACION AUTÓNOMA DE ROBOTS EN AGRICULTURA: UN MODELO DE AGENTES*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. Retrieved from <http://eprints.ucm.es/5277/1/T27198.pdf>
- MAG. (2019). Ministerio de Agricultura y Ganadería. Retrieved July 18, 2019, from <https://www.agricultura.gob.ec/>
- Marote, M. L. (2010). *Agricultura de Precisión*. Retrieved from https://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2012/cyt/numero10/10N_ISE_U_CyT10.pdf
- Meneses, V. A. B., Téllez, J. M., & Velasquez, D. F. A. (2015). USO DE DRONES PARA EL ANALISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN. *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1), 28-40. <https://doi.org/10.24054/16927125.v1.n1.2015.1647>
- Moreano, G., & Ribeiro, A. (2017). *MODELADO Y VIRTUALIZACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTÓNOMO DE INSPECCIÓN DE CULTIVOS MARZO 2017*. UPM. Retrieved from http://oa.upm.es/46131/1/TFM_GABRIEL_MOREANO_SANCHEZ.pdf
- Ortega, R., & Flores, L. (1999). *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico*. Retrieved from [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/42C40288498C96B78525799C0058ED51/\\$FILE/AgricPrecisionOrtega.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/42C40288498C96B78525799C0058ED51/$FILE/AgricPrecisionOrtega.pdf)
- Tereshkov, V. M. (2015). A Simple Observer for Gyro and Accelerometer Biases in Land Navigation Systems. *Journal of Navigation*, 68(4), 635–645. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000016>
- Zhou Jun Ji. (2002). Multi-sensor Fusion in Navigation of Autonomous Vehicle. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 212. Retrieved from http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-NYJX200205034.htm

BIOGRAFÍAS



Moreano S. Gabriel, nació el 13 de octubre de 1988 en Cuenca – Ecuador, realizó su formación básica en la Unidad Educativa “San Felipe Neri” en la ciudad de Riobamba, graduado como Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2015, obtuvo un Máster en Automática y Robótica en la Universidad Politécnica de Madrid (España) en 2017 y un Máster en Diseño y Gestión de Proyectos Tecnológicos en 2018 por la Universidad Internacional de La Rioja (España), actualmente realiza su tesis doctoral en Ingeniería de Sistemas de Control en la UNED (España).



Cajamarca V. Julio, nació el 15 de abril de 1985 en Cuenca – Ecuador, realizó su formación básica en la Unidad Educativa “San Jose de La Salle”, su bachillerato en el “Instituto Técnico Superior Salesiano” como bachiller técnico industrial en electricidad, graduado de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana en Cuenca en 2012, obtuvo un Masterado en Electromecánica con Itinerancia en Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Madrid (España) en 2016.



Tenicota G. Alex, nació en Ambato, el 6 de febrero de 1987, cursó sus estudios de Ingeniero de Mantenimiento en la ESPOCH, Riobamba – Ecuador en el 2012. Luego concluyó la Maestría en Gestión del Mantenimiento Industrial en la ESPOCH, Riobamba – Ecuador en el 2015. Él ingeniero tiene tres años de docente investigador en la carrera de Mantenimiento Industrial desde el 2016 en la ESPOCH, y ha publicado más de siete otras de relevancia entre ponencias y artículos, en diferentes áreas como la inspección técnica visual, simulación, gestión del mantenimiento y seguridad ocupacional.

Combined Circuit Model for a Four Quadrant Operating Luo-Converter

Vallejo, Jefferson^{1*} ; Benavides, Vanessa¹ ; Pozo, Marcelo¹ 

¹*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador*

Abstract: This work presents a combined circuit, as a new methodology, for a four-quadrant operation converter using LUO's configuration based on the model proposed by Luo and Hong Ye. The combination conjugates two different circuits, each one works for controlling two of the four quadrants or modes respectively. Additionally, this paper presents simulation results for the proposed system in order to verify its characteristics and functionality.

Keywords: Luo DC/DC converter, four quadrant operation, open loop speed control for a DC motor.

Modelo de Circuito Combinado Para Operación en Cuatro Cuadrantes, Convertidor de Luo

Resumen: Este trabajo presenta un circuito combinado, como una nueva metodología para uso de convertidores para operación en cuatro cuadrantes que utilizan la configuración de LUO, basado en el modelo propuesto por Luo y Hong Ye. La combinación combina dos circuitos diferentes, cada uno funciona para controlar dos de los cuatro cuadrantes o modos, respectivamente. Además, este documento presenta resultados de simulación para el sistema propuesto con el fin de verificar sus características y funcionalidad.

Palabras clave: Convertidor DC / DC de Luo, operación en cuatro cuadrantes, control de velocidad en circuito abierto para un motor DC.

1. INTRODUCTION

DC/DC converters have been used in many industrial applications which in general perform single quadrant operation. Traditional models like buck, boost and buck-boost converters (Pasha, Jayakumar, & Thiruvonasundari, 2017) have some applications oriented, mostly, to *electrical power generations, photovoltaic and renewable energy sources* (Chilambarasan, Ramesh, & Sujatha, 2014) (Saradha, Mrudhulaa, Priyadharshini, Seyezhai, & Mrdula, 2018) (Prasanna, Kirubakaran, Rahul Kumar, & Rudhran, 2015) (Elavarasu & Christofer, 2018), *power regulation* (Jayachandran, Krishnaxwamy, Anbazhagan, & Dhandapani, 2015) and *energy storage systems* (Manikandan & Vadivel, 2013) (Sanjeevikumar & Rajambal, 2008).

However, the development of circuits capable of operating in four quadrants has become a necessity, especially in applications with smart grids, where it is necessary to control the charge and discharge of batteries or in the case of electric vehicles, where it is necessary to control the direction of the rotor axis in acceleration or braking state of a DC motor. Luo-converters are an example of DC-DC power conversion circuits developed to perform positive to positive DC-DC voltage increasing conversion with high efficiency and near-zero output voltage and current ripples (Luo F. L., 1997).

The proposed LUO circuit depends on two semiconductors used as switches which are driven by a type of PWM signals with constant switching frequency controlled independently. A 4-pole double state switch (4PDS) is used for changing from forward and reverse states.

Each mode is controlled by one switch. Each state determines the output current path (Sujatha, Chilambarasan, & Ramesh, 2015), and to determine the direction of the rotor axis in acceleration or braking state. Multiple motor characteristics have been considered in the simulation tests, in order that the future implementation will be more reliable.

Free quadrant change is available, but it is necessary to consider events like overcurrent in the entrance circuit loop and polarity change in the capacitor. Thus, it is important to determine safe conduction duty ranges to ensure system stability and integrity of the circuit elements, all depends on the characteristics of the loads. In this project, test results are presented for a DC motor load.

The difference between this work and the original proposed by Luo and Hong Ye in (Luo & Ye, Chapter 7 - Multiple quadrant operating Luo-Converters, 2003) is that it presents simulation results for the combined theoretical circuit named by them as

jefferson.vallejo@epn.edu.ec

Recibido: 05/08/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/rp.vol44n2.06

“Circuit 3” with a little correction discussed in the next section.

2. COMBINED LUO-CONVERTER MODEL

This section describes the combined circuit proposed by Luo and Hong Ye in (Luo & Ye, Chapter 7 - Multiple quadrant operating Luo-Converters, 2003) for four quadrant operation with a small variation, instead from using a three-pole double state switch (3PDS) for the commutation, as proposed in (Luo & Ye, Chapter 7 - Multiple quadrant operating Luo-Converters, 2003) (Luo, Ye, & Rashid, Four quadrant operating Luo-Converters, 2000), to a four-pole double state switch (4PDS) will be used as shown in Figure 1 otherwise, the proper circuit configurations will not be achieved.

The 4PDS switch defines 4 poles (A, B, C & D) and two states for each pole, it means that each pole has a common pin named A, B, C or D and each one of them has two pins, one for a first state (A1, B1, C1 or D1) and another one for a second state (A2, B2, C2 or D2).

$V1$ is the input voltage source, $S1$ and $S2$ are switches that control acceleration and braking modes, $D1$ and $D2$ are diodes, $L1$ is the entrance loop inductance, R is a resistance, C is a capacitor, $V2$ is the voltage load which represents the Electromotive Force (EMF) of a DC motor or the voltage value of a Battery in the case of a battery charge application, I_{L1} and I_{L2} are the currents which flow through inductors $L1$ and $L2$ respectively, δ is the duty cycle.

Figure 2 and Figure 3 show how the 4PDS works to switch from circuit 1 to circuit 2 in order to reach the Luo-converter circuit topology for operation in *Quadrants I, II and III, IV* respectively.

The circuit can work in four modes or quadrants as follows:

1. Mode A (Quadrant I): Forward acceleration.
2. Mode B (Quadrant II): Brake in forward operation.
3. Mode C (Quadrant III): Reverse acceleration.
4. Mode D (Quadrant IV): Brake in reverse operation.

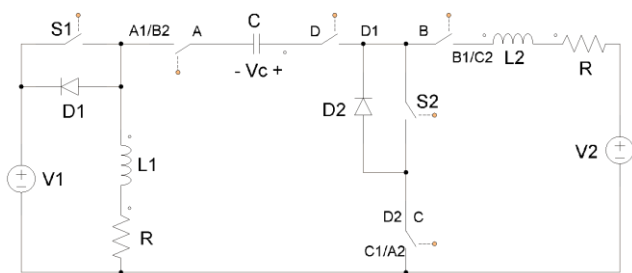


Figure 1. Combined Luo-converter circuit topology with a 4PDS switch.

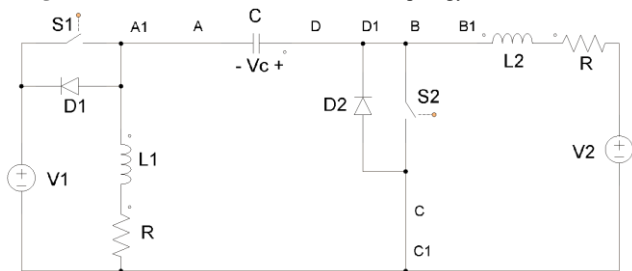


Figure 2. Luo-converter circuit topology for Quadrants I and II

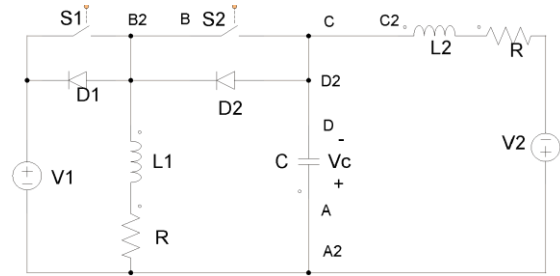


Figure 3. Luo-converter circuit topology for Quadrants III and IV

For a comprehensive review of the functionality of these circuits, as explained by Luo and Hong Ye, refer to (Luo & Ye, Chapter 7 - Multiple quadrant operating Luo-Converters, 2003) (Luo, Ye, & Rashid, Four quadrant operating Luo-Converters, 2000).

Table 1 shows the operation mode of the circuit depending on the 4PDS and the states of switches $S1$ and $S2$.

The considered parameters for the circuit based on calculations in (Luo & Ye, Chapter 7 - Multiple quadrant operating Luo-Converters, 2003) (Luo, Ye, & Rashid, Four quadrant operating Luo-Converters, 2000) are: $V1 = 42 [V]$, $V2 = \pm 14 [V]$, $R = 0,05 [\Omega]$, $L1 = L2 = 0,5 [mH]$, $C = 20 [\mu F]$ and $f = 50 [kHz]$. Polarity of $V2$ depends on the mode of operation (+) for Modes A & B and (-) for Modes C & D.

Table 1. Modes of operation

Mode	S1	S2	4PDS
A (Quadrant I)	PWM switching	Off	Pin A connected to pin A1 Pin B connected to pin B1 Pin C connected to pin C1 Pin D connected to pin D1
B (Quadrant II)	Off	PWM switching	Pin A connected to pin A1 Pin B connected to pin B1 Pin C connected to pin C1 Pin D connected to pin D1
C (Quadrant III)	PWM switching	Off	Pin A connected to pin A2 Pin B connected to pin B2 Pin C connected to pin C2 Pin D connected to pin D2
D (Quadrant IV)	Off	PWM switching	Pin A connected to pin A2 Pin B connected to pin B2 Pin C connected to pin C2 Pin D connected to pin D2

3. SIMULATION RESULTS

3.1 Current behaviour for a $\pm V2$ load.

If $V2$ is positive and current I_{L2} is increased positively, it means that the circuit is trying to get the acceleration state. Furthermore, if $V2$ is positive and the current I_{L2} is increased negatively, then it determines a positive braking mode.

For negative acceleration state, $V2$ is negative and also the current I_{L2} is increased negatively and negative braking state is determined by a negative $V2$ with positively increasing of I_{L2} .

3.2 Current behaviour for a DC motor load.

As shown in Figure 4, a DC motor is implemented as a load in the output where V_e represents the separately excitation

voltage for the motor. Table 2 shows the motor parameters considered in the implementation.

^a Where, R_a is the Armature resistance, L_a is the Armature inductance, R_f is the field resistance, L_f is the field inductance, V_t is the Nominal voltage, I_a is the nominal current, n is the nominal speed.

Figure 5 shows the motor speed and the current in the output I_{L2} in acceleration and braking modes with a DC motor load. In purple it shown the motor speed that defines positive acceleration in Figure 5a, brakes positively as shown in Figure 5b, accelerates negatively as shown in Figure 5c and brakes negatively as shown in Figure 5d. Braking is started in $t=0.4$ because it depends on acceleration state.

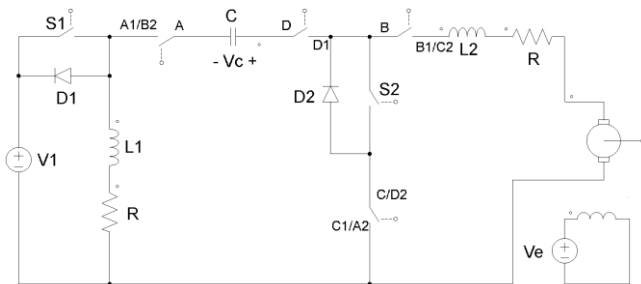


Figure 4. Combined Luo-converter circuit with a separately excited DC motor load

Table 2. DC Motor parameters

Parameter	Value
R_a	0,7 [Ω]
L_a	10 [mH]
R_f	75 [Ω]
L_f	20 [mH]
Moment Inertia	0,7 [kgm ²]
V_t	120 [V]
I_a	10 [A]
n	500 [rpm]
I_f	1,6 [A]
V_e	120 [V]

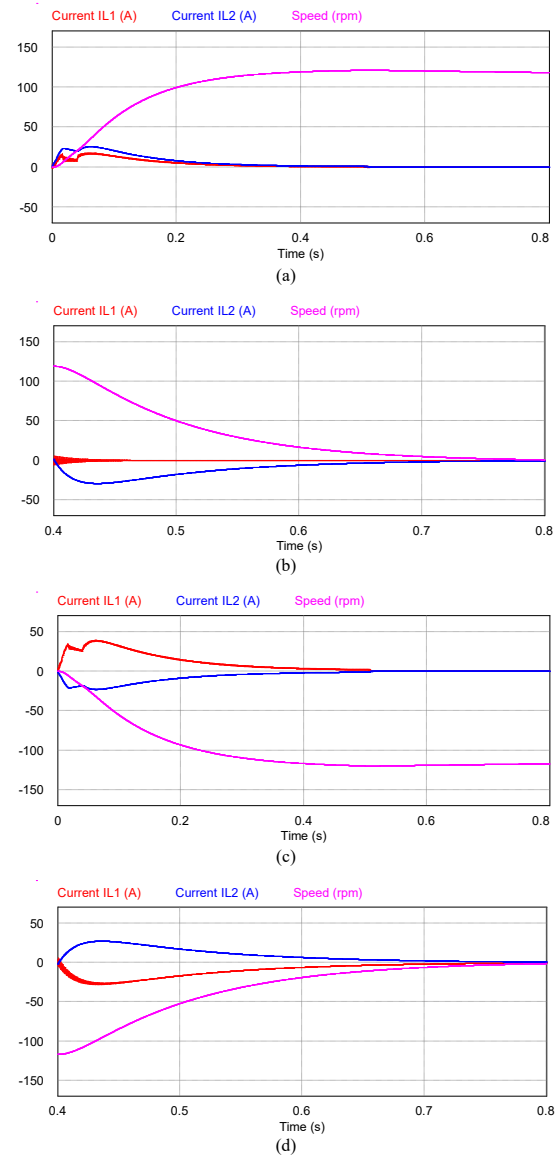


Figure 5. Speed output for a (a) motor load with $\delta = 0,40$ (Mode A), (b) motor load with $\delta = 0,99$ (Mode B) at $t=0,4$, (c) motor load with $\delta = 0,40$ (Mode C), (d) motor load with $\delta = 0,99$ (Mode D) at $t=0,4$ (Powersim, 2016).

Duty cycle values were tested in the experimentation in order to obtain safe operation ranges. It was necessary because overcurrent values could damage the circuit and small values can make the circuit to respond extremely slow, then, the safe duty cycle range was between, $0,30 < \delta < 0,50$ for acceleration modes and $0,80 < \delta < 0,99$ for braking modes.

4. CONCLUSIONS

The proposed combined circuit model for a four-quadrant operation Luo-converter seems to be reliable for controlling a DC motor load in acceleration and braking modes. This is possible due to EMF, as a generating part of the output current increase positively or negatively depending on the operation mode.

The considered parameters for a DC motor make the circuit more reliable for a future implementation considering safe duty cycle ranges in order to protect the circuit integrity and

stability. These ranges are, $0,30 < \delta < 0,50$ for acceleration modes and $0,80 < \delta < 0,99$ for braking modes.

It is important to consider maximum current values when suddenly changing quadrants, as these could damage circuit elements, e.g. a change from I quadrant to III quadrant over increases the input loop current.

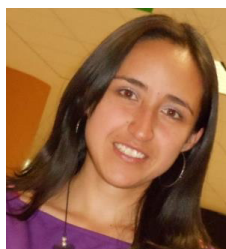
REFERENCES

- Chilambarasan, M., Ramesh, M., & Sujatha, R. (2014). Design and simulation of LUO converter topologies for photovoltaic applications. *International Journal of Applied Engineering Research*, IX(23), 2-8.
- Elavarasu, R., & Christober, A. (2018). DC-DC LUO converter based smart street lighting using arduino UNO. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)*, X(1), 1-4.
- Jayachandran, D., Krishnawamy, V., Anbazhagan, L., & Dhandapani, K. (2015). Modelling and analysis of voltage mode controlled LUO converter. *American Journal of Applied Sciences*, 1-9.
- Luo, F. L. (1997). En *Luo-Converters, a series of new DC-DC step-up (boost) conversion circuits* (Vol. 2, págs. 882-888). Singapore.
- Luo, F., & Ye, H. (2003). Chapter 7 - Multiple quadrant operating Luo-Converters. En *Advanced DC-DC Converters* (págs. 391-421). United States of America: CRC Press LLC.
- Luo, F., Ye, H., & Rashid, M. (2000). Four quadrant operating Luo-Converters. *IEEE*, 1-6.
- Manikandan, A., & Vadivel, N. (2013). Design and implementation of LUO converter for electric vehicle applications. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, IV(10), 1-4.
- Pasha, A., Jayakumar, N., & Thiruvonasundari, D. (2017). Performance Analysis of Dc-Dc Converters and Comparative study of buck-boost with SLLB converter by using SPV based INC MPPT technique. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, IV(8), 1-6.
- Powersim. (2016). *PSIM User's Guide*. USA: Powersim.
- Prasanna, K., Kirubakaran, D., Rahulkumar, J., & Rudhran, A. (2015). Implementation of positive output super lift LUO converter for photovoltaic system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, II(3), 1-5.
- Sanjeevikumar, P., & Rajambal, K. (2008). Extra-High-Voltage DC-DC Boost converters topology with simple control strategy. *Hindawi Publishing Corporation Modeling and Simulation in Engineering*, 2008, 1-7.
- Saradha, R., Mrudhula, P., Priyadarshini, K., Seyezhai, R., & Mrdula, V. (2018). Development of solar dc home system using modified LUO converter. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, VIII(1), 1-7.
- Sujatha, R., Chilambarasan, M., & Ramesh, M. (2015). Design and simulation of fused LUO converter. *Asian Research Publishing Network (ARPN)*, 10(8), 2-5.

BIOGRAFÍAS



Jefferson Vallejo, was born on November 30, 1989 in Quito-Ecuador. He completed his secondary studies at "Sebastián de Benalcázar" high school in 2008. Between 2017-2019 he participated in many conferences in the National Polytechnic School (EPN) as expositor, including the "XXIX Jornadas de ingeniería Eléctrica y Electrónica" in November 2019. He currently develops his degree work at the EPN in the Electronics and Control career.



Vanessa Benavides, was born in Quito, Ecuador. Her higher studies were completed in 2011 at National Polytechnic School, obtaining the Electronics and Control Engineer degree. She served as Assistant to the Process Control Laboratory of the Department of Automation and Industrial Control (DACI) of the Faculty of Electrical and Electronic Engineering of the EPN from 2009 to 2011. Between 2011 and 2013 she dedicated herself to work in the industry. Her master's degree was held between 2013-2014, in Brazil at the Federal University of Pernambuco in Production Engineering with a mention in Operations Research. She currently works as a Full Time Professor at the National Polytechnic School (DACI).



Marcelo Pozo, was born in Quito-Ecuador. He graduated from the National Polytechnic School as an Electronics and Control Engineer in 1999. Thanks to a scholarship from the German Academic Exchange Service (DAAD) he studied his Master's Degree at the Technical University of Dresden-Germany obtaining the M.Sc.EE degree in September 2002. Between 2003 and 2009 he dedicated himself to work in the industry. As of September 2009, he serves as a full-time Principal Professor in the Department of Automation and Industrial Control (DACI) of the Faculty of Electrical and Electronic Engineering of the National Polytechnic School in Quito, Ecuador. Between the end of 2010 and the beginning of 2015 he completed his PhD project in Engineering at the University of Siegen, Germany, specializing in Power Electronics and Electronic Control of Electrical Machines.

Preparación de Artículos para la Revista Politécnica Utilizar Mayúsculas en cada Palabra en el Caso del Título

Apellido, Nombre¹; Apellido, Nombre²; Apellido, Nombre³

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Industrial, Guayaquil, Ecuador

³Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Exactas, Cuenca, Ecuador

Resumen: Las siguientes instrucciones establecen las pautas para la preparación de artículos para la Revista Politécnica. Los artículos pueden ser escritos en español o en inglés, pero tendrán un resumen de máximo 250 palabras en los dos idiomas. Los autores pueden hacer uso de este documento como una plantilla para componer su artículo si están utilizando Microsoft Word 2013 o superior. Caso contrario, este documento puede ser utilizado como una guía de instrucciones. El número mínimo de páginas será 6 y el máximo 15. Para el envío de los artículos, los autores deben seguir las instrucciones colocadas en el sistema de recepción de artículos del sitio web de la Revista Politécnica (<https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/>). En caso de que su artículo sea en inglés colocar el título y el resumen en los dos idiomas.

Palabras clave: Incluir una lista de 3 a 6 palabras.

Title of Manuscript

Abstract: These instructions give you guidelines for preparing papers for EPN Journal. Papers can be written in Spanish or English; however, an abstract of maximum 250 words and written in both languages is required. Use this document as a template to compose your paper if you are using Microsoft Word2013 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The minimum number of pages will be 6 and the maximum will be 15. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system from the EPN Journal website (<https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/>).

Keywords: Include a list of 3 to 6 words.

1. SECCIÓN I

Este documento es una plantilla para versiones Microsoft Word 2013 o posteriores. Si está leyendo una versión impresa de este documento, por favor descargue el archivo desde <https://url.epn.edu.ec/FormatoRPWord>. En caso de que el autor desee enviar el artículo en formato LaTeX por favor descargue desde <https://url.epn.edu.ec/FormatoRPLatex>. *Por favor, no coloque numeración ni pie de página en el documento presentado.*

No cambie los tamaños de fuente o espaciado de renglones para ajustar el texto a un número limitado de páginas. Utilice cursiva o negrita para dar énfasis a un texto, no subrayado.

2. SECCIÓN II

Para las pautas de presentación, siga las instrucciones emitidas por el sistema del sitio web de la revista de la EPN.

La presentación inicial debe tomar en cuenta todas las indicaciones que se presentan en la plantilla, para de esta manera tener una buena estimación de la longitud del artículo a publicarse. Además, de esta manera el esfuerzo necesario para la presentación final del manuscrito será mínimo.

Como sugerencia, es importante tomar en cuenta que, el primer autor es el investigador que hizo la mayor parte del trabajo, mientras que el último autor suele ser el profesor quien es el líder intelectual y, a menudo edita y presenta el borrador final del documento.

La Revista Politécnica pondrá en marcha un sistema de transferencia electrónica de derechos de autor en su momento. Por favor, "no" enviar formularios de derecho de autor por correo o fax. A continuación se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta para la presentación final del artículo.

3. SECCIÓN III

Colocar el correo electrónico del autor de correspondencia.

3.1 Figuras, tablas y márgenes

Todas las figuras deben ser incorporadas en el documento. Al incluir la imagen, asegúrese de insertar la actual en lugar de un enlace a su equipo local. Los archivos de: figuras, dibujos, fotografías, etc., deberán enviarse en formato bmp o jpg, con al menos 1200 puntos (resolución) en uno de sus ejes, con leyendas legibles y de tamaño adecuado. El artículo debe contener entre tablas y figuras un máximo de 10.

Las etiquetas de los ejes de las figuras son a menudo una fuente de confusión. Utilice las palabras en lugar de símbolos. Por ejemplo, escriba la cantidad "Magnetización," o "Magnetización M" no sólo "M".

Las figuras y tablas deben estar en la parte superior e inferior de las columnas. Evite colocarlas en medio de ellas. Las figuras y tablas grandes pueden extenderse a lo largo de ambas columnas. Las leyendas de las figuras deben estar centradas debajo de las figuras, los títulos de las tablas deben estar centrados sobre ellas. Evite colocar figuras y tablas antes de su primera mención en el texto. Para la mención de figuras, tablas o ecuaciones utilice las palabras completas con la primera letra en mayúscula, por ejemplo "Figura 1".

Coloque las unidades entre paréntesis. No etiquete los ejes sólo con unidades. Por ejemplo, escriba "Magnetización (A/m)" o "Magnetización (Am⁻¹)", no sólo "Magnetización A/m." No etiquete los ejes con una relación de cantidades y unidades. Por ejemplo, escriba "Temperatura (K)", no "Temperatura K".

Los multiplicadores pueden ser especialmente confusos. Escriba "Magnetización (kA/m)" o "Magnetización (103A/m)". No escriba "Magnetización (A/m) x 1000" porque el lector no sabrá si la etiqueta del eje de arriba significa 16000 A/m o 0,016 A/m. Las etiquetas de las figuras deben ser legibles, con un valor de 8 y sin espacio de separación con la figura.

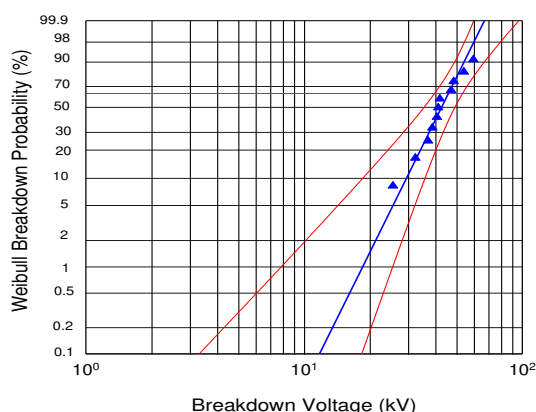


Figura 1. Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura. $\alpha = 45,9$ kV $\text{pico}\beta = 5,08$. Intervalo de Confidencia 95%

Los autores deben trabajar activamente con los márgenes solicitados. Los documentos de la revista serán marcados con los datos del registro de la revista y paginados para su inclusión en la edición final. Si la sangría de los márgenes en su manuscrito no es correcta, se le pedirá que lo vuelva a

presentar y esto, podría retrasar la preparación final durante el proceso de edición.

Por favor, no modificar los márgenes de esta plantilla. Si está creando un documento por su cuenta, considere los márgenes que se enumeran en la Tabla 1. Todas las medidas están en **centímetros**.

Tabla 1. Márgenes de página

Página	Superior	Inferior	Izquierda/ Derecha
Primera	2,0	2,5	1,5
Resto	2,0	2,5	1,5

3.2 Ecuaciones

Si está usando MSWord, sugerimos utilizar el *Editor de ecuaciones de Microsoft* o el *MathType* add-on para las ecuaciones en su documento (*Insertar/Objeto/Crear Nuevo/Microsoft Ecuación o Ecuación MathType*). La opción "flotar sobre el texto" no se debe elegir.

Enumere las ecuaciones consecutivamente con los números de la ecuación en paréntesis contra el margen derecho, como en (1). Utilice el editor de ecuaciones para crear la ecuación y esta debe estar localizada en el margen derecho, como se muestra en el ejemplo siguiente:

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos en su ecuación han sido definidos antes de que aparezcan en la ecuación o inmediatamente después. Ponga en cursiva los símbolos (T podría referirse a la temperatura, pero T es la unidad tesla). Para referirse a la ecuación se escribe por ejemplo "Ecuación (1)".

3.3 Unidades

Utilice el SI como unidades primarias. Otras unidades pueden ser utilizadas como unidades secundarias (en paréntesis). Por ejemplo, escriba "15 Gb/cm² (100 Gb/in²)". Evite combinar las unidades del SI y CGS, como la corriente en amperios y el campo magnético en oersteds. Esto a menudo lleva a confusión porque las ecuaciones no cuadran dimensionalmente. Si tiene que usar unidades mixtas, aclare las unidades para cada cantidad en una ecuación.

Por ejemplo, en el SI la unidad de fuerza de campo magnético es A/m. Sin embargo, si desea utilizar unidades de T, o bien se refiere a la densidad de flujo magnético B o la fuerza del campo magnético simbolizadas como $\mu_0 H$. Use un punto en el centro para separar las unidades compuestas, por ejemplo, "A·m²".

3.4 Abreviaturas y Siglas

Defina las abreviaciones y acrónimos la primera vez que se utilizan en el texto, incluso después de que ya han sido

definidos en el resumen. No utilice abreviaturas en el título a menos que sea inevitable.

3.5 Otras recomendaciones

- Para expresar valores decimales se usarán comas, por ejemplo 3,45. Use un cero antes del decimal.
- Se incluirá un espacio entre números para indicar los valores de miles, por ejemplo 463 690.
- Utilice notación científica para expresar números con más de 3 cifras hacia la derecha o izquierda, es decir, mayores a 2,50E+05 o menores a 4,8E-03.
- Finalmente, de ser necesario y de manera opcional, se pueden incluir conclusiones, recomendaciones y agradecimiento.

REFERENCIAS

La lista de **referencias debe estar en Formato APA ordenada alfabéticamente** de acuerdo con el apellido del primer autor del artículo. El agregado et al no debe ir en cursiva. Por favor nótese que todas las referencias listadas aquí deben estar directamente citadas en el cuerpo del texto usando (Apellido, año). Las notas al pie deben evitarse en la medida de lo posible.

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

Seguir el formato indicado a continuación de acuerdo al tipo de referencia a:

Formato básico para referenciar libros:

Apellido, Inicial Nombre. (Año). *Título del libro*. Ciudad, País: Editorial.

• Libros con un autor:

En las referencias:

King, M. (2000). *Wrestling with the angel: A life of Janet Frame*. Auckland, New Zealand: Viking.

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

• Libros con dos autores:

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

• Libros con dos o más autores:

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

• Artículos en revistas:

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

• Artículos con DOI

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran-Ellis, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

• Artículos sin DOI

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos Academic Research Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

• Artículos en línea

En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

INFORMACIÓN ADICIONAL

Sistema de Arbitraje:

Todos los artículos cumplen con una revisión por pares, la cual consiste en:

- Selección de dos o tres árbitros, actualmente la Revista Politécnica cuenta con revisores internos, externos e internacionales, quienes envían al editor su [evaluación](#) del artículo y sus sugerencias acerca de cómo mejorarlo.
- El editor reúne los comentarios y los envía al autor
- Con base en los comentarios de los árbitros, el editor decide si se publica el *manuscrito*.
- Cuando un artículo recibe al mismo tiempo evaluaciones tanto muy positivas como muy negativas, para romper un empate, el editor puede solicitar evaluaciones adicionales, obviamente a otros árbitros.
- Toda la evaluación se realiza en un proceso doble ciego, es decir los autores no conocen quienes son sus revisores, ni los revisores conocen los autores del artículo.

Instructivo para publicar un Artículo

1. Crear un usuario y contraseña para acceder al portal web de la Revista Politécnica, para mayor información está el correo epnjournal@epn.edu.ec
 2. Ingresar al portal web e iniciar el proceso de envío
 3. Comenzar el envío
 4. Colocar requisitos de envío
- Lista de comprobación de preparación de envíos

Como parte del proceso de envío, se les requiere a los autores que indiquen que su envío cumpla con todos los siguientes elementos, y que acepten que envíos que no cumplan con estas indicaciones pueden ser devueltos al autor.

- La petición no ha sido publicada previamente, ni se ha presentado a otra revista (o se ha proporcionado una explicación en Comentarios al Editor).
- El fichero enviado está en formato OpenOffice, Microsoft Word, RTF, o WordPerfect.
- Se han añadido direcciones web para las referencias donde ha sido posible.
- El texto tiene interlineado simple; el tamaño de fuente es 10 puntos; se usa cursiva en vez de subrayado (exceptuando las direcciones URL); y todas las ilustraciones, figuras y tablas están dentro del texto en el sitio que les corresponde y no al final del todo.
- El texto cumple con los requisitos bibliográficos y de estilo indicados en las Normas para autoras/es, que se pueden encontrar en "Acerca de la Revista".

- Nota de copyright

Los autores que publican en esta revista están de acuerdo con los siguientes términos:

- Los autores conservan los derechos de autor y garantizan a la revista el derecho de ser la primera publicación del trabajo al igual que licenciado bajo una Creative Commons Attribution License que permite a otros compartir el trabajo con un reconocimiento de la autoría del trabajo y la publicación inicial en esta revista.
- Los autores pueden establecer por separado acuerdos adicionales para la distribución no exclusiva de la versión de la obra publicada en la revista (por ejemplo, situarlo en un repositorio institucional o publicarlo en un libro), con un reconocimiento de su publicación inicial en esta revista.
- Se permite y se anima a los autores a difundir sus trabajos electrónicamente (por ejemplo, en repositorios institucionales o en su propio sitio web) antes y durante el proceso de envío, ya que puede dar lugar a intercambios productivos, así como a una citación más temprana y mayor de los trabajos publicados (Véase The Effect of Open Access) (en inglés).

- Declaración de privacidad

- Los nombres y direcciones de correo-e introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines declarados por esta revista y no estarán disponibles para ningún otro propósito u otra persona.

5. Subir el envío
6. Introducir metadatos
7. Subir ficheros adicionales
8. Confirmar el envío

INDEXACIONES

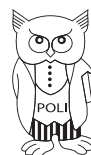


revistapolitecnica.epn.edu.ec





ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec

150
ANIVERSARIO



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec