

Desarrollo de un Algoritmo para el Dimensionamiento de Barras Colectoras de acuerdo a la IEC 60865 y contrastado con FEM



An IEC 60865–Based Algorithm for Busbar Sizing: Validation via Finite Element Modeling (FEM)

Fabrizio A. Millan-Montalvo  ORCID, Piero Stephano Prado-Zuta ORCID, Higgmer S. Presentación-Quispe ORCID, Julio Enrique Lostaunau-Martínez ORCID y Vilma Tarrillo-Vargas ORCID

Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Perú

Recibido: 01/04/2025

Revisado: 25/07/2025

Aceptado: 20/08/2025

Publicado: 30/12/2025

RESUMEN

El presente artículo pretende presentar un algoritmo para el diseño inicial de las barras colectoras bajo un método iterativo, válido para tableros eléctricos de baja tensión en cualquier tipo de orientación para las barras pudiendo dimensionar también a diseños de barras con más de un conductor por fase para configuraciones de acuerdo a la IEC 60865. Los resultados de las fuerzas electrodinámicas y dimensiones propuestas en el algoritmo se hacen también en el software FEM ANSYS Maxwell 2D para ver qué tan confiables son las aproximaciones que se realizan de acuerdo a la norma. El algoritmo resulta ser una solución automatizada y confiable para diseños de una barra y dos barras por fase.

PALABRAS CLAVES: FEM; busbars; fuerzas electrodinámicas; EIPB.

ABSTRACT

This article aims to present an algorithm for the initial design of busbars under an iterative method, it is valid for low voltage electrical panels in any type of orientation for the bars and also being able to size to bar designs with more than one conductor per phase for configurations according to IEC 60865. The results of the electrodynamic forces and dimensions proposed in the algorithm are also made in FEM ANSYS Maxwell 2D software to see how reliable the approximations made according to the estándar are. The algorithm proves to be an automated and reliable solution for single-bus and double-bus per phase designs.

KEY WORDS: FEM; busbars; electrodynamic forces; EIPB.

INTRODUCCION

En los sistemas eléctricos de utilización, el cortocircuito es una amenaza que compromete la vida humana y los dispositivos de aparamenta como interruptores, aisladores, envolventes y principalmente barras colectoras. Para el análisis de estos aparatos se utilizan pruebas de laboratorio o simulaciones. Dentro de las simulaciones existen las realizadas por FEM (Método de los Elementos Finitos) que básicamente dividen el área continua de un cuerpo en un conjunto finito de nodos para resolver ecuaciones diferenciales sobre estos [1]. Para resolver las ecuaciones del FEM en barras colectoras se usan principalmente los softwares COMSOL [2] y ANSYS [3], aunque recientemente se hallan planteado enfoques más rápidos con el uso de FFT (Transformada Rápida de Fourier) y la teoría de la convolución [4]. Las ecuaciones que se resuelven están relacionadas con esfuerzos producidos por inducción magnética (electrodinámicos) [5], esfuerzos térmicos [6] y de distribución de la temperatura. Al ser el cortocircuito trifásico el fenómeno usualmente más nocivo dentro de una aparamenta de baja tensión, se toma a esta condición para analizar la estabilidad dinámica y térmica del sistema de barras colectoras a través de un análisis multifísico. Esta condición se modela, aunque los arreglos tengan dos barras por fase [2], no tengan sección transversal rectangular si no irregular [7], estén muy cercanas dentro de un recinto metálico cerrado [8] o presenten longitudes mayores de 5 m [9]. Antes de realizar el FEM se requiere del diseño inicial del sistema de barras colectoras, algo de lo que la mayoría de artículos omite, por este motivo en la presente investigación se realizará un algoritmo que usará cálculos analíticos, que han probado ser precisos con una barra por fase [10] y con más de una barra por fase [11] en secciones rectangulares. Sin embargo, al tener los cálculos factores no lineales dependientes de la forma (factor de Dwight), se realizarán ciertas simplificaciones en la iteración inicial. El algoritmo requerirá de condiciones de cortocircuitos estandarizadas [12] y también cumplirá los requerimientos de esfuerzos permisibles de acuerdo a la normativa IEC [13].

1. Diseño por Criterio Mecánico

Según los parámetros y excepciones dadas en [12] y los ejemplos de cálculos de los efectos excepcionales de corto circuitos tanto térmicos y mecánicos mediante el método simplificado vistos en [13], se plantea una metodología capaz de calcular parámetros mínimos para la elección de barras rectangulares con disposiciones tanto horizontales o verticales y con una o más barras por fase. El parámetro calculado será un área con un módulo de sección adecuado por conductor o subconductor, cabe resaltar que estos dos últimos criterios están por debajo del criterio eléctrico que consiste en la selección por capacidad de corriente.

Los algoritmos de cálculo para el diseño mecánico han sido separados para el caso de una barra por fase y más de una barra por fase. Para las fórmulas y datos obtenidos se usarán unidades de longitud en milímetros, de corriente eléctrica en kA y para las demás magnitudes sólo el SI.

1.1. Diseño por criterio mecánico con una barra por fase.

2.1.1. Prueba de efectos mecánicos con una barra por fase

Se presenta un algoritmo para el cálculo de los efectos mecánicos según el método simplificado visto en la Fig.1, que será útil para posteriores cálculos de diseño. Primero se deberán introducir las propiedades mecánicas necesarias de la barra, que dependen del material y del tipo de tratamiento térmico realizado sobre la barra. La masa por unidad lineal del conductor principal (m'_m) se encuentra fácilmente en catálogos de fabricante mediante el área transversal de cada barra. Se recomienda consultar todas las propiedades mecánicas con el fabricante de la barra, en caso de que no esté disponible esta información, se pueden recurrir para los límites elásticos y módulos de elasticidad a la Tabla 2 en [14] si se trata de cobre de tipo C10200 y C12200.

El límite elástico (f_y) se obtiene de “pruebas al 0.2%” para cobre y aluminio que se encuentran en los requisitos de propiedades mecánicas según normativas. Si se trata de barras fabricadas bajo normativa americana el límite elástico se encuentra mediante la designación del temple de la barra, y para la europea por la condición del material. En el primer grupo de normativas se tiene para el cobre de temple ligeramente recocido un valor de límite elástico de 55 N/mm² según la Tabla 2 de la ASTM B187 y para todas las variedades de temple de las barras de aluminio se tienen los valores en la Tabla 1 de ASTM B236. Para las barras fabricadas bajo normativas europeas se tienen los límites elásticos para el cobre en la Tabla 3 de EN 13601 y para las barras de aluminio o aleación de aluminio en la EN 755-2.

Para las propiedades eléctricas de la barra, se necesitará determinar la intensidad de corriente pico (i_p) por lo que se necesitará de la corriente de cortocircuito trifásica simétrica inicial RMS (I_k'') y el factor

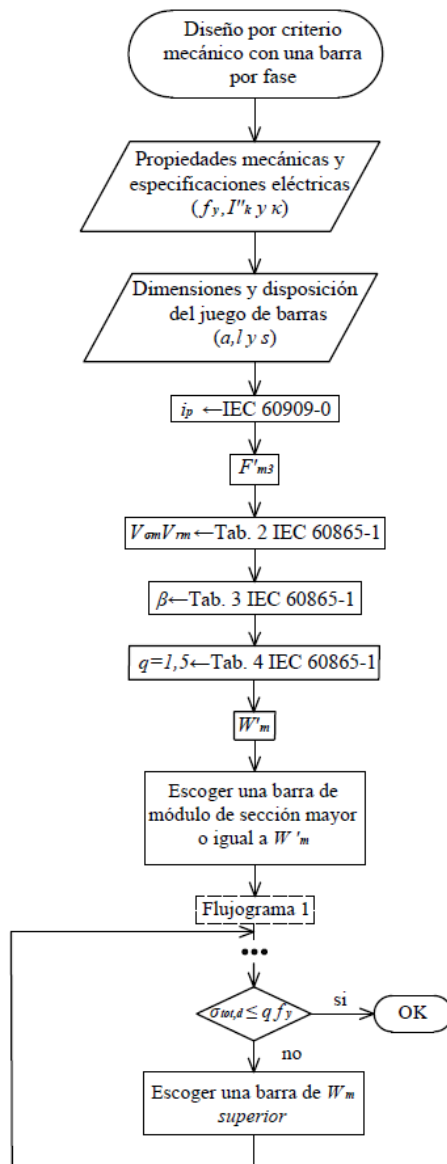


Figura 1. Flujograma para la prueba de efectos mecánicos con una barra por fase

Fuente: Los Autores.

para el cálculo de la corriente pico (κ), que dependen de las características eléctricas de la red aguas arriba de la barra y se calcularán acuerdo a normativas internacionales [12] antes de entrar al algoritmo. Luego se deben introducir las dimensiones del arreglo de barras según la denominación hecha en [13], que es el vano (l), la distancia entre el centro de los ejes de la barra (a) que debe respetar las distancias mínimas entre fases de la Tabla 2 de la IEC 61936-1, la dimensión de la barra que es perpendicular a la fuerza de cortocircuito (b_m), la dimensión que es paralela (c_m) y además el número de vanos (s). Después sigue el cálculo del valor característico de la carga muerta de la barra ($F_{str,k}$) y el módulo de sección con

respecto a la dirección de la carga muerta ($W_{st,m}$), que se calcula respecto al eje neutro de la barra con respecto al peso de la barra, y con esos dos últimos valores calcular el esfuerzo de flexión causado por la carga muerta ($\sigma_{st,m,k}$), con excepción al módulo de sección que puede cambiar si se trata de un arreglo con barras horizontales. Luego i_p se calculará de acuerdo a la sección 8 de [12] teniendo en cuenta las excepciones que se den, por ejemplo, en la presencia de máquinas síncronas o múltiples fuentes de potencia.

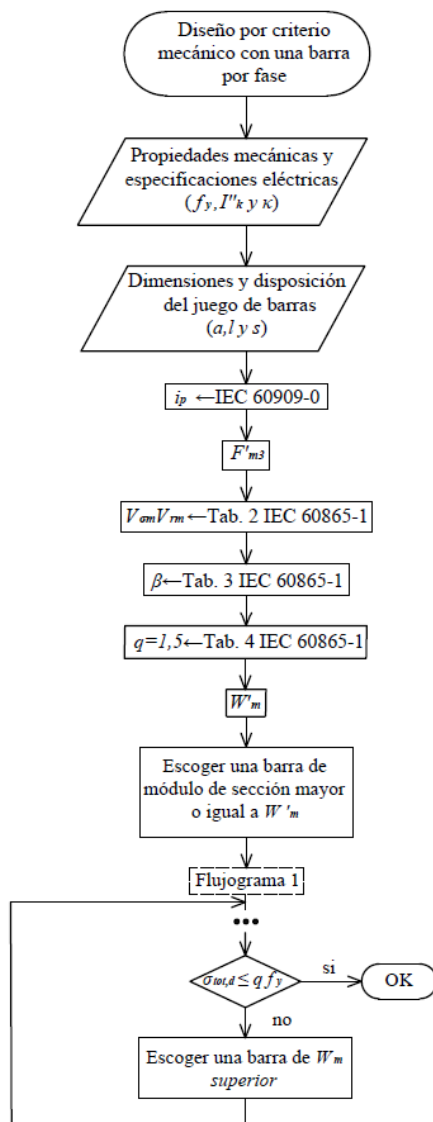


Figura 2. Flujograma para el diseño por criterio mecánico con una barra por fase.

Fuente: Los Autores.

El siguiente paso consiste en el cálculo de la distancia equivalente entre los conductores principales (a_m) que depende del factor de distancia efectiva (k_{12}), este último se obtiene de la Figura 1 o del Anexo A.2 de [13]. Se calculará la fuerza máxima en un corto circuito trifásico balanceado (F_{m3}) de acuerdo a la ecuación (2) de [13] con las dimensiones anteriormente mencionadas y calculadas, pero para emplear las unidades específicas del artículo se usará la ecuación (1). Los factores dinámicos para los esfuerzos de flexión ($V_{\sigma m} V_{rm}$) en el caso del método simplificado se toman de la Tabla 2 de [13] y el factor de flexión entre los conductores principales (β) depende de s y se obtiene de la Tabla 3 de [13]. Posteriormente se calcula el módulo de sección del conductor principal (W_m) con respecto al eje perpendicular de la fuerza de cortocircuito. El esfuerzo de flexión de diseño entre los conductores principales ($\sigma_{m,d}$) se calcula con la ecuación (9) de [13], el esfuerzo total ($\sigma_{tot,d}$) se obtiene de la suma de $\sigma_{m,d}$ y $\sigma_{st,m,k}$, de acuerdo a la combinación de cargas indicadas en la IEC 60949, que se debe verificar menor a $1,5f_y$ de acuerdo a una sección rectangular de la Tabla 4 de [13]. De no cumplirse las condiciones la barra no resistirá mecánicamente a la corriente de corto circuito y se deberán cambiar las dimensiones iniciales del cálculo, que son usualmente las dimensiones de la barra.

$$F_{m3} = \frac{\sqrt{3}}{10} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (1)$$

2.1.2. Diseño por criterio mecánico con una barra por fase

El algoritmo de la Fig.2 presenta el procedimiento para el diseño mecánico que proveerá de un módulo de sección mínimo para que la barra resista contra el cortocircuito trifásico balanceado. Se comienza de manera similar a la Fig.1 solo que para este método de cálculo no se necesitará de m'_m ya que no se dispondrá de dimensiones iniciales de la barra, algo que también se observa en los datos de entrada de las dimensiones. El cálculo de la i_p se hace de manera idéntica a la Fig.1. La distancia a_m con k_{12} resulta imposible de determinar con las propiedades dadas, por lo que se tomará a $k_{12}=1$ para el cálculo de la fuerza máxima de cortocircuito trifásico simplificada (F'_{m3}) en la ecuación (2). Los valores de los factores β , $V_{\sigma m} V_{rm}$ y q se obtienen como en la Fig.1

$$F'_{m3} = \frac{\sqrt{3}}{10} i_p^2 \frac{l}{a} \quad (2)$$

Luego de esto se debe hallar el módulo de sección del conductor simplificado (W'_m) de acuerdo a la ecuación (3) que viene de una modificación para el valor máximo de $\sigma_{tot,d}$ donde se desprecia el valor $\sigma_{st,m,k}$ al ser muy bajo en comparación a $\sigma_{m,d}$ para barras robustas, sin embargo, para compensar errores por despreciar los mencionados ítems se incluye un factor de seguridad de 1,05 arbitrariamente al momento del cálculo de W'_m .

$$W'_m = 1,05 \beta V_{\sigma m} V_{rm} \frac{F'_{m3} l}{8q f_y}$$

$$W'_m = 0,0875 \beta V_{\sigma m} V_{rm} \frac{F'_{m3} l}{f_y} \quad (3)$$

1.2. Diseño por criterio mecánico con más de una barra por fase.

2.2.1. Prueba de efectos mecánicos con más de una barra por fase

Se emplea el Fig.3 para representar los procedimientos de cálculo para el caso de más de una barra por fase, con un ingreso de valores similar a la Fig. 1 con ligeras diferencias de acuerdo a [13] como las propiedades mecánicas y la masa por unidad de longitud del subconductor (m'_s) y para las dimensiones de las barras, se añade la dimensión del subconductor que es perpendicular a la fuerza de cortocircuito (b_s), la dimensión que es paralela (c_s), la distancia entre elementos espaciadores (l_s) y por supuesto el número de barras por fases (n). Para el cálculo de los valores posteriores se procede de manera idéntica a la Fig. 1 que son los cálculos de carga muerta ($F_{str,k}$, $W_{st,m}$ y $\sigma_{st,m,k}$), solo que considerando los datos de los subconductores en lugar de los conductores principales. Para el caso de las distancias equivalentes se debe proceder de acuerdo a la distancia entre centros de los conductores principales como el de la Figura 2 de [13] para a_m y además se debe calcular la distancia efectiva entre centros de subconductores (a_s) de acuerdo a la ecuación (8) en [13]. Posteriormente se calcula (F_{m3}) de acuerdo a la ecuación (1) y tomando en cuenta las dimensiones del conductor principal como se da en la Figura 2 de [13], para fuerza máxima entre subconductores (F_s) se debe utilizar la ecuación (4) de [13] o la ecuación (4) mostrada a continuación.

$$F_s = \frac{\sqrt{3}}{10} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l}{a_s} \quad (4)$$

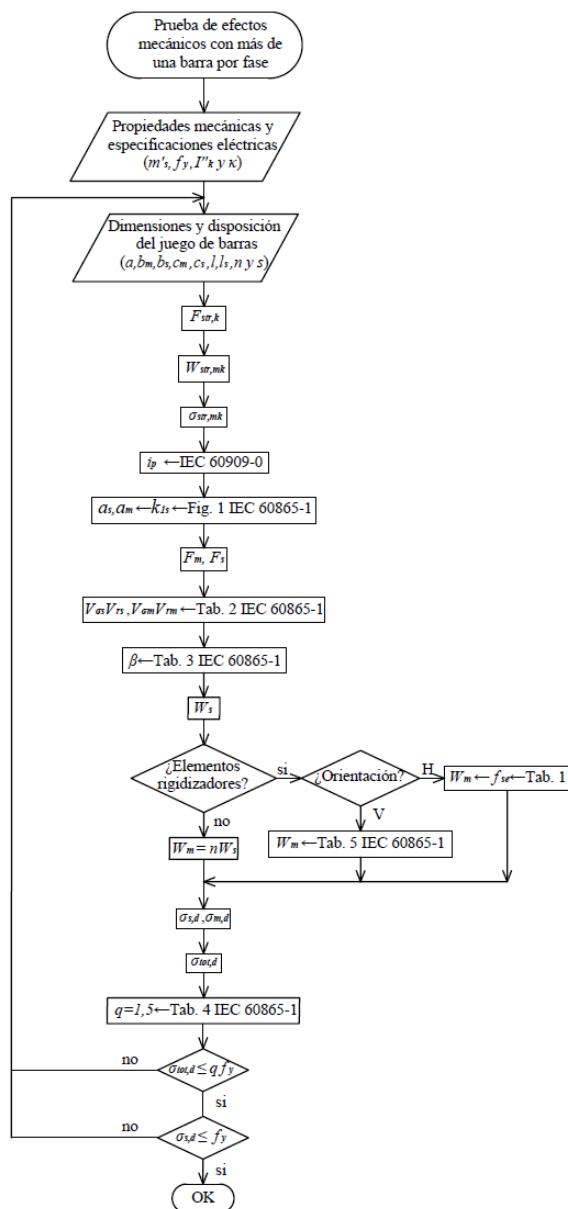


Figura 3. Flujograma para la prueba por criterio mecánico con más de una barra por fase.

Fuente: Los Autores.

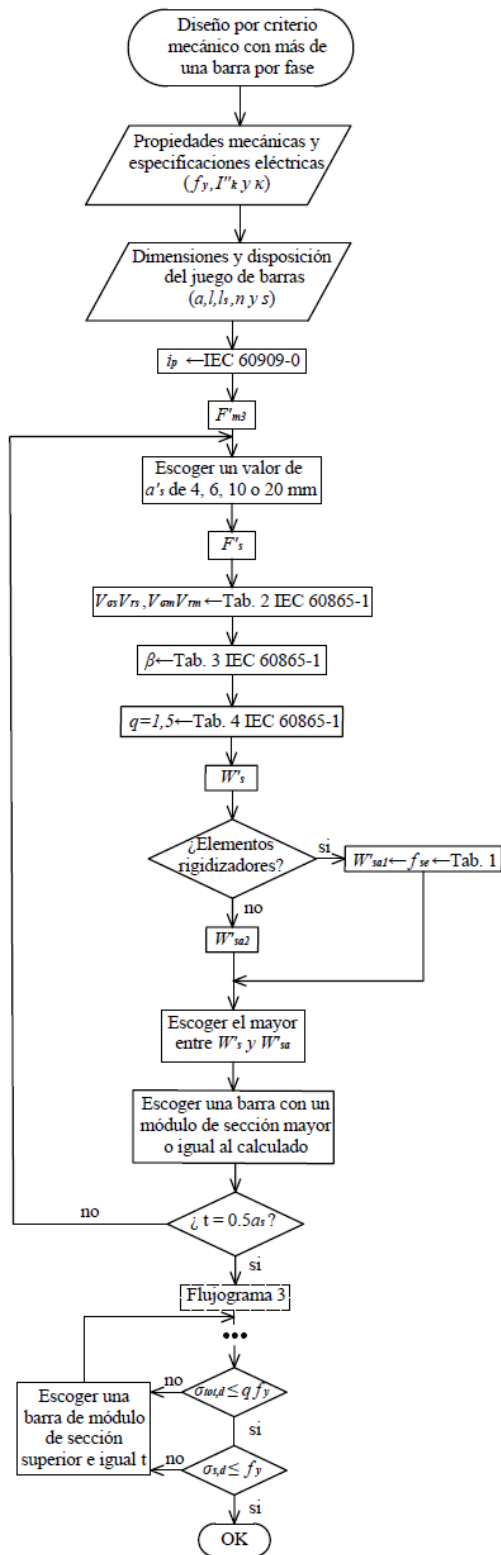


Figura 4. Flujograma para el diseño por criterio mecánico con más de una barra por fase.

Fuente: Los Autores.

Para los factores $V_{\sigma m}V_{r m}$ y $V_{\sigma s}V_{r s}$ se emplea la Tabla 2 de [13], teniendo en cuenta que para el método simplificado ambos productos son iguales para conductores principales y subconductores. El factor β se calcula como se mencionó anteriormente. Cuando se trata del cálculo de W_s se hace de manera idéntica a como se halla W_m en la Fig.1, sin embargo, para W_m de la Fig.3 se deben tener en consideración si existen elementos rigidizadores o no por cada vano. En caso de existir entonces para configuraciones con subconductores principales verticales se puede calcular mediante la Tabla 5 de [13], mientras que para configuraciones horizontales no existía una tabla en específico. Para simplificar el cálculo del W_m con elementos rigidizadores se calcularon factores para elementos rigidizadores (f_{se}) partiendo de la idea de cálculo de la Tabla 5 de [13] que consiste en calcular el módulo de sección de tres barras como si de un solo elemento se tratase y multiplicándose por 0,6. Los f_{se} se encuentran en la **Tabla 1** y se emplean según la ecuación (5). En caso de no contar con elementos rigidizadores solo se emplea la ecuación (6) para casos horizontales y verticales.

$$W_m = f_{se} W_s \quad (5)$$

$$W_m = n W_s \quad (6)$$

Tabla 1. f_{se} para distintos arreglos de barras

Configuración ¹	w x w		t x t	
	W_x	W_y	W_x	W_y
II	1.200	0.867	0.867	1.200
III	1.800	11.880	11.880	1.800
IIII	2.400	20.914	20.914	2.400
II II	2.400	10.400	10.400	2.400

¹ el número para clasificar las configuraciones se hará en orden descendente

Además de calcular los esfuerzos $\sigma_{st,m,k}$ y $\sigma_{m,d}$ se debe adicionar con el esfuerzo de flexión para los subconductores ($\sigma_{s,d}$) que se calcula con la ecuación (10) de [13] para finalmente calcular $\sigma_{tot,d}$ pero esta vez se agrega una condición recomendada para el diseño que es $\sigma_{s,d} \leq f_y$.

2.2.2. Diseño por criterio mecánico con más de una barra por fase.

El algoritmo del flujograma de la Fig.4 tampoco requiere de m'_s o de las dimensiones de la barra. Luego de calcular i_p se debe calcular F'_{m3} con la ecuación (2) al igual que en la Fig.2 para el cálculo de la fuerza máxima entre subconductores simplificada (F'_s). Faltaría hallar a_s que no contemple factores dependientes de las dimensiones de la barra (k_{1s}). Necesariamente se debe dar una estimación inicial de la distancia entre subconductores (a'_s) que es igual al doble del espesor (t) de la barra independientemente si la configuración es horizontal o vertical, por lo tanto, los valores de a'_s se reducen a 4, 6, 10 o 20 mm. Con las estimaciones realizadas para a_s ya se puede calcular F'_s de acuerdo a la ecuación (7).

$$F'_s = \frac{\sqrt{3}}{10} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a'_s} \quad (7)$$

Para los factores $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, β y q se debe proceder como en los anteriores flujogramas. El módulo de sección del subconductor simplificado (W'_s) se calculará según la ecuación (8), además de esta ecuación existe otro método para encontrar el módulo de sección del subconductor. En este último método el módulo se calcula mediante modificaciones a la fórmula de $\sigma_{tot,d}$, con la aclaración de que para el método simplificado $V_{\sigma s} V_{rs} = V_{\sigma m} V_{rm}$ y se añade un 10% al cálculo del módulo de sección para compensar la simplificación de a_s y considerar nulo al $\sigma_{st,m,k}$. Si existen elementos rigidizadores se usará la ecuación (9) para el cálculo del módulo de sección del subconductor alternativo 1 (W'_{sa1}) apoyándose del f_{se} de la **Tabla 1** y en caso contrario se calcula el módulo de sección del subconductor alternativo 2 (W'_{sa2}) con la ecuación (10).

$$W'_s = 1,1 V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F'_s l_s}{16q f_y}$$

$$W'_s = 0,0458 V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F'_s l_s}{f_y} \quad (8)$$

$$W'_{sa1} = 1,1 \frac{V_{\sigma s} V_{rs}}{8q f_y} \left(\frac{F'_s l_s}{2} + \frac{\beta F'_{m3} l}{f_{se}} \right)$$

$$W'_{sa1} = 0,0917 \frac{V_{\sigma s} V_{rs}}{f_y} \left(\frac{F'_s l_s}{2} + \frac{\beta F'_{m3} l}{f_{se}} \right) \quad (9)$$

$$W'_{sa2} = 1,1 \frac{V_{\sigma s} V_{rs}}{8q f_y} \left(\frac{F'_s l_s}{2} + \frac{\beta F'_{m3} l}{n} \right)$$

$$W'_{sa2} = 0,0917 \frac{V_{\sigma s} V_{rs}}{f_y} \left(\frac{F'_s l_s}{2} + \frac{\beta F'_{m3} l}{n} \right) \quad (10)$$

Luego de calcular W'_{sa1} o W'_{sa2} y el W'_s se debe elegir el mayor para escoger una barra que tenga un espesor igual a la mitad de a'_s , y de no ser así se debe retroceder hasta la elección de un a'_s para elegir uno mayor. Después se recurrirá al Fig.3 para comprobar la resistencia de la configuración al cortocircuito y de no ser así se deberá escoger una barra de módulo de sección mayor, pero manteniendo el mismo espesor.

2. Análisis de las barras por elementos finitos.

Para verificar que los algoritmos son confiables, se utilizará un análisis FEM 2D para contrastar el valor de las fuerzas como se hizo en [15] y también para verificar que las temperaturas de las barras no superen las temperaturas recomendadas en [13]. Los siguientes apartados explicarán las ecuaciones que se consideran en el análisis.

2.1. Modelamiento matemático de los efectos electromagnéticos.

Para modelar un sistema electromagnético en 2D no se pueden considerar directamente las ecuaciones de Maxwell si no que deben ser modificadas para ajustarse de acuerdo a la ecuación (11) [16] que se ajusta para el caso 2D en estado transitorio.

$$\begin{aligned}
\nabla \times \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} & \quad (14) \\
= \mathbf{J} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi + \nabla \times \mathbf{H} \\
+ \sigma \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A}
\end{aligned}$$

Donde $\mathbf{A}$ es el vector de potencial magnético, $\mathbf{J}$ es la densidad de la fuente de corriente, $\mu_0 \mu_r$ son la permeabilidad del material, σ la conductividad eléctrica, Φ es el potencial eléctrico escalar, $\mathbf{H}$ es el vector de campo magnético de un imán permanente y $\mathbf{v}$ es la velocidad de los cuerpos [16]. Los términos $\nabla \times \mathbf{H}$ y $\sigma \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A}$ resultan nulos porque el cobre no presenta propiedades magnéticas significativas y el análisis será cuasi estático.

2.2. Modelamiento matemático de los efectos térmicos.

Para modelar los efectos térmicos se tendrán en cuenta los efectos de la convección y la conducción durante el tiempo del corto circuito para unos elementos 2D con coordenadas cartesianas como se hace en [15]. Para la conducción del calor se utiliza la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

Donde λ es la conductividad térmica del material, T es la temperatura, S es la fuente de calor que en este caso sería la pérdida de potencia en las barras, ρ es la densidad del material y C_p es su calor específico.

Otra de las variables importantes para establecer condiciones térmicas es el coeficiente de transferencia de calor por convección natural (h) que depende del número de Nusselt (Nu) y de Rayleigh (Ra_L) de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$h_{convH} = \frac{k}{L} Nu = 0,15 \frac{k}{L} Ra_L^{1/3} \quad (12)$$

$$h_{convV} = \frac{k}{L} Nu = 0,1 \frac{k}{L} Ra_L^{1/3} \quad (13)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_s - T_\infty) L^3 \quad (14)$$

En las ecuaciones (12) y (13) se calculan coeficientes de convección tanto para barras horizontales (h_{convH}) y verticales (h_{convV}), k es la conductividad térmica del

aire, L es la distancia en dirección de la gravedad, y para la ecuación (14) se tiene que g es la aceleración de la gravedad, β es el coeficiente de expansión térmica, α la difusividad térmica y T_s y T_∞ son las temperaturas superficial y ambiental respectivamente. De manera más simplificada se puede tomar a h como $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ de acuerdo con [15] y [17].

2.3. Corrientes de cortocircuito.

La principal excitación en las simulaciones FEM son las corrientes de cortocircuito trifásico en cada fase, las cuales deben ser modeladas como funciones temporales y no como constantes iguales a valores picos (i_p) o RMS (I_k'') para tener simulaciones más realistas.

Para este propósito se utilizan la componente DC y la componente sinusoidal que se calculan de acuerdo con [12] o más directamente con las siguientes ecuaciones de acuerdo con [7] y [17].

$$i_1 = \sqrt{2} I_k'' \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sqrt{2} I_k'' e^{-t/\tau} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (15)$$

$$i_2 = \sqrt{2} I_k'' \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 2\pi/3) - \sqrt{2} I_k'' e^{-t/\tau} \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 2\pi/3) \quad (16)$$

$$i_3 = \sqrt{2} I_k'' \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 2\pi/3) - \sqrt{2} I_k'' e^{-t/\tau} \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 2\pi/3) \quad (17)$$

Donde i_1 , i_2 e i_3 son las corrientes de fase durante el cortocircuito, ω la frecuencia angular de la red, α es el ángulo de desfase del cortocircuito, φ es el ángulo de desfase provocado por la impedancia y τ es la constante de tiempo del cortocircuito.

En [17] se aclara que los valores α , φ y τ se hallan de acuerdo a las ecuaciones (18), (19) y (20).

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (18)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (19)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (20)$$

Donde R es la resistencia de la red, X la reactancia y L la inductancia.

3. Resultados.

3.1. Resultados de los algoritmos.

Se implementaron los flujogramas como programas en scripts de MATLAB tanto para el caso del diseño de una barra por fase o más de una barra por fase.

Los tipos de diseños que se implementaran son de barras w x w (donde los anchos se “miran”), tipo t x t (los espesores se “miran”) y el tipo del caso 1 de la **Tabla 1**. Los datos de entrada son los siguientes.

Tabla 2. Primeros datos de entrada

f_y (MPa)	120
a (mm)	150
l (mm)	1000
S	1
I''_k (kA)	23,09
κ	1,3794

Con los dos últimos datos se calculó i_p de acuerdo con la ecuación (21) en [12] resultando 45,0432 kA.

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (21)$$

Luego de ingresar los datos dentro del programa, los primeros parámetros de salida sin considerar los factores por reenganche automático son los siguientes para las configuraciones.

Tabla 3. Primeros datos de salida.

	F'_{m3} (N)	F'_s (N)	W'_m (mm ³)	W'_s (mm ³)	W'_{sa} (mm ³)
t x t	2404	-	876,57	-	-
w x w	2343	-	854,13	-	-
conf.1	2343	2536	-	483,97	932,07

Con los datos de W'_m y W'_{sa} , el segundo se escogió por ser mayor a W'_s , se puede escoger las dimensiones de las barras rectangulares para los dos casos. Para la disposición w x w y la conf.1 se eligieron barras de 60x10 mm ya que su módulo de sección es de 1000 mm³, mientras que para la disposición t x t se pudieron escoger hasta barras de 40x5 mm, pero como el caso en particular tiene más de 1000 A de capacidad de corriente el mínimo permisible es de 50x10 mm, estas dimensiones se vuelven a ingresar como datos de entrada y también los valores de las masas

por unidad lineal en kg/mm. En la Tabla 4, b es b_m para w x w y t x t y b_s para la conf.1, c es c_m para w x w y t x t y c_s para la conf.1.

Tabla 4. Segundos datos de entrada.

	b (mm)	c (mm)	m (kg/mm)
t x t	10	50	4,48e-3
w x w	60	10	5,38e-3
conf.1	10	50	5,38e-3

Con los segundos datos de entrada se pueden calcular los valores de las fuerzas y esfuerzos más precisamente porque ya se pueden considerar los factores de forma o de Dwight en el cálculo. En la Tabla 5 se aprecian los resultados finales donde a es a_m para t x t y w x w, mientras que es a_s para la conf.1.

Tabla 5. Datos finales de salida.

	a (mm)	F_s (N)	F_{m3} (N)	$\sigma_{s,d}$ (MPa)	$\sigma_{m,d}$ (MPa)	$\sigma_{tot,d}$ (MPa)
t x t	147,2	-	2449	-	36,73	43,3
w x w	153,7	-	2286	-	142,8	143,9
conf.1	34,4	1474	2298	46,05	71,80	119,0

3.2. Resultados de las simulaciones FEM.

Para las simulaciones se utilizó el software ANSYS Maxwell 2D con su módulo Transient Magnetic con unas fronteras tipo Ballon.

Las excitaciones son las corrientes descritas en las ec. (15)-(17) y los parámetros para calcularlas según las ec. (18)-(20), así como la relación de las impedancias se especifican en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros para las excitaciones

X/R	2,991
φ (rad)	1,248
α (rad)	0,323
τ	0,007

La simulación se llevó a cabo para un tiempo de 150 ms ya que luego de ese tiempo la corriente de cortocircuito es sinusoidal además de que los aparatos de protección actuarían. En la Figura 5 se graficaron las corrientes de fase de cortocircuito observando que i_1 llega a los 7 ms hasta a un valor de 44,12 kA tan solo 2% por debajo de i_p .

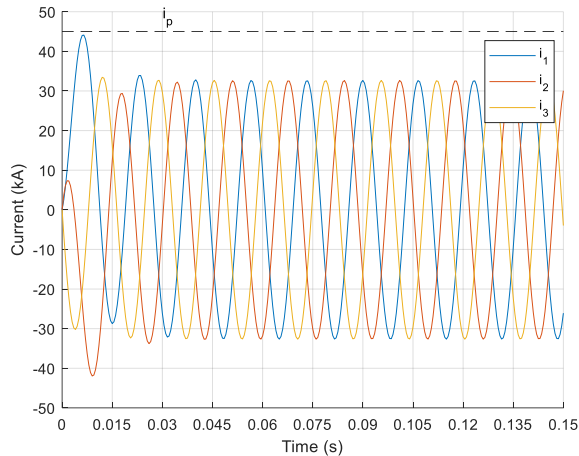


Figura 5. Corrientes de fase durante un cortocircuito trifásico.

Fuente: Los Autores.

Durante las simulaciones también se provocan interesantes gráficas del campo magnético que evidencian el efecto skin sobre la superficie de las barras concentrándose el campo magnético en los bordes de la barra y para el caso de la conf.1 el campo se forma como si solo de un conductor se tratase. El campo magnético para dicha configuración a los 7 ms se muestra en la Fig 6.

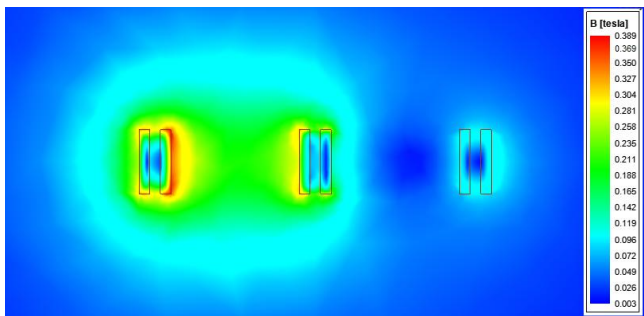


Figura 6. Magnitud del campo magnético de la conf.1 a los 7 ms.

Fuente: Los Autores.

Uno de los criterios que se dan en [13] es que la temperatura de los conductores de cobre no supere los 200°C, por lo que se hace un acoplamiento térmico para conocer la temperatura de las barras, tomando en cuenta que la temperatura en estado permanentes es de 60°C resultando el campo de temperaturas de la Fig 7.

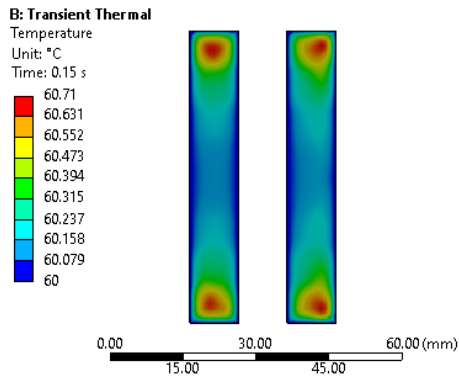


Figura 7. Temperatura en conductores de la conf.1.

Fuente: Los Autores.

El cambio de temperatura apenas supera los $0,7^{\circ}\text{C}$ en 150 ms por lo que el aumento de temperatura no es significativo.

Luego para obtener las fuerzas se asignan parámetros de fuerzas a las barras y se tomarán los valores máximos a lo largo de los 150 ms teniendo en cuenta que los resultados estarán en kN/m por tratarse de resultados 2D. Los resultados de las fuerzas para los casos $t \times t$ y $w \times w$ se dan en las Fig.8 y 9, mientras para el caso de la conf.1 se obtiene la fuerza de los subconductores aislando estos en la Fig.10 y sin aislar en la Fig.11.

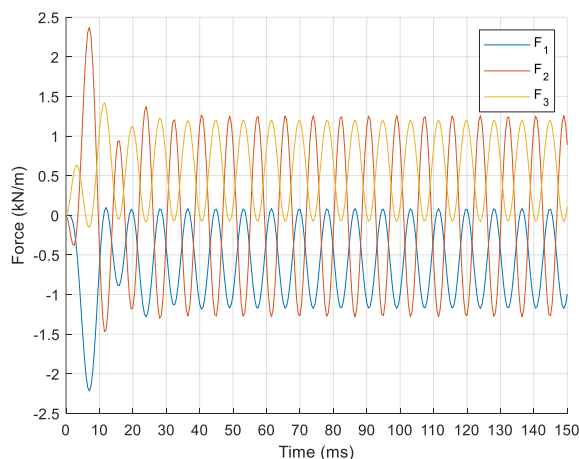


Figura 8. Fuerza sobre los conductores para el caso $t \times t$.

Fuente: Los Autores.

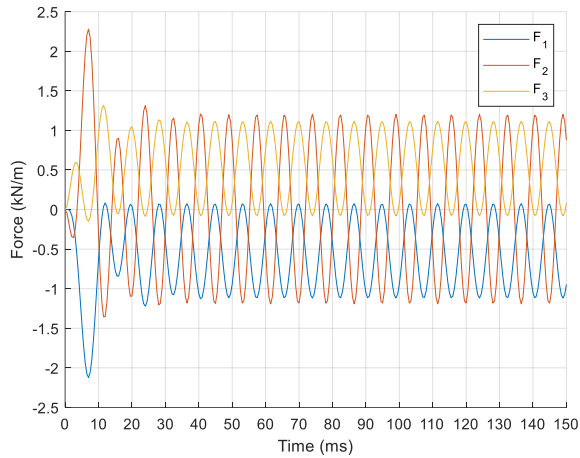


Figura 9. Fuerza sobre los conductores para el caso $w \times w$.

Fuente: Los Autores.

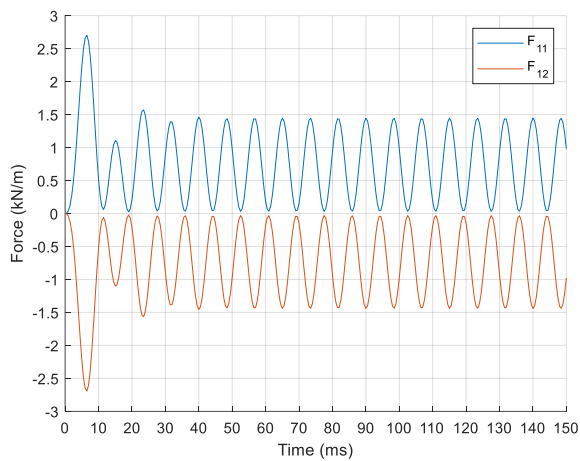


Figura 10. Fuerza sobre los subconductores del primer conductor aislados para el caso de la conf.1.

Fuente: Los Autores.

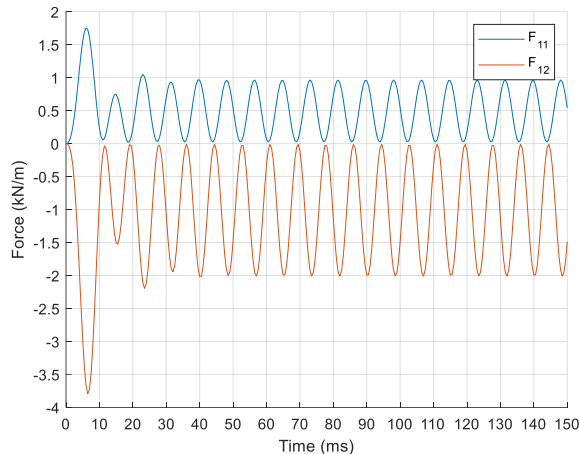


Figura 11. Fuerza sobre los subconductores del primer conductor para el caso de la conf.1.

Fuente: Los Autores.

Como l es igual a 1 m los resultados se pueden sacar directamente de las Fig.8 y 9, sin embargo, la fuerza de la Fig.10 debe ser multiplicada por 0.5 m por l_s y para la Fig. 11 se podría hacer una aproximación siendo su fuerza expresada por la ecuación (22).

$$F = F_s + \frac{1}{2} F_{m3} \quad (22)$$

A partir de las aclaraciones y los resultados presentados se puede hacer una comparativa de las fuerzas calculadas por el método analítico realizado por el algoritmo y por el FEM EN LA Tabla 7.

Tabla 7. Resultados calculados por el algoritmo vs FEM.

	F_{m3} (N)	F_{m3} [FEM] (N)	error (%)	F_s (N)	F_s [FEM] (N)	error (%)
t x t	2449	2375	3,02	-	-	-
w x w	2286	2280	0,26	-	-	-
conf.1	2298	2182	5,05	1474	1351	8,34

4. Conclusiones

Este trabajo de investigación muestra una nueva metodología más automatizada para poder empezar con el diseño de barras solo con los datos iniciales de la red de alimentación y otros pocos datos dimensionales que se podrían ajustar a dimensiones de una envolvente de tableros eléctricos convencionales.

Los resultados de las fuerzas máximas con un solo conductor coinciden con menos del 5% de error con respecto a las mediciones realizadas por elementos finitos y también por exceso lo que nos indica que las aproximaciones sobredimensionan de manera ligera las barras lo que no resultaría perjudicial para la seguridad de la aparamenta.

Para el caso de la conf.1. sobredimensiona de igual manera, pero también de manera poco significativa siendo menor al 10%.

El algoritmo demostró funcionar y dar datos muy cercanos a la simulación FEM además de seguir con los cálculos de acuerdo a la IEC, además el procesamiento se puede hacer en pocos minutos en comparación a los cálculos manuales que además añaden error al usar diagramas para el cálculo de los factores no lineales.

Referencias

- [1] Ł. Kolimas, S. Łapczyński, M. Szulborski and M. Świetlik, "Low voltage modular circuit breakers: FEM employment for modelling of arc chambers," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 68, no. 1, pp. 61-70, 2020.
- [2] G. Kadkhodaei, K. Sheshyekani, M. Hamzeh and S. Dadjo Tavakoli, "Multiphysics analysis of busbars with various arrangements under short-circuit condition," *IET electrical systems in transportation*, vol. 6, no. 4, pp. 237-245, 2016.
- [3] D. Yang, Y. Li, Y. Han, B. Ding, L. Li and J. Wu, "Vibration analysis and experimental study of GIS busbar enclosure under electric force," *Shock and vibration*, pp. 1-8, 2022.
- [4] J. Martinez-Roman, R. Puche-Panadero, A. Sapena-Bano, J. Burriel-Valencia, C. Terron-Santiago, M. Pineda-Sanchez and M. Riera-Guasp, "Fast numerical model of power busbar conductors through the FFT and the convolution theorem," *IEEE transactions on power delivery*, 2021.
- [5] Ł. Kolimas, S. Łapczyński and M. Szulborski, "Tulip contacts: Experimental studies of electrical contacts in dynamic layout with the use of FEM software," *International journal of electrical engineering education*, pp. 1-20, 2019.

- [6] R. Khademi-Zahedi and P. Alimouri, "Finite element analysis to the effect of Thermo-mechanical loads on stress distribution in buried polyethylene gas pipes jointed by electrofusion sockets, repaired by PE patches," *energies*, vol. 11, no. 10, p. 2818, 2018.
- [7] S. Li, Y. Han and L. Chengzhu, "Coupled multiphysics field analysis of high-current irregular-shaped busbar," *IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology*, vol. 9, no. 9, pp. 1805-1814, 2019.
- [8] F. M. Yusop, S. Masri, D. Ishak and M. Kamarol, "Investigation of electromagnetic force in 3P5W busbar system under peak short-circuit current," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, no. 1, 2014.
- [9] Y. Jiaxin, W. Yang, W. Lei, L. Xiaoyu, L. Huimin and B. Longqing, "Thermal-dynamic stability analysis for the enclosed isolated-phase bus bar based on the subsegment calculation model," *IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology*, pp. 1-9, 2017.
- [10] M. Szulborski, S. Łapczyński, Ł. Kolimas, Ł. Kozarek and D. D. Rasolomampionona, "Calculations of Electrodynamic Forces in Three-Phase Asymmetric Busbar System with the Use of FEM," *energies*, vol. 13, no. 20, p. 5477, 2020.
- [11] M. Krčum, M. Zubčić and T. Dlabač, "Electromechanical analysis of the medium voltage earthing switch due to short-time and peak withstand current test," *energies*, vol. 12, no. 16, p. 3189, 2019.
- [12] International Electrotechnical Commission, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems-Part 0: Calculation of currents, IEC 60909-0: 2016.
- [13] International Electrotechnical Commission, Short-Circuit Currents-Calculation of effects-Part 1: Definitions and calculation methods, IEC 60865-1:2011.
- [14] "Copper Development Association," [Online]. Available: https://www.copper.org/resources/properties/144_8/. [Accessed 7 9 2022].
- [15] I. C. Popa and A.-I. Dolan, "Numerical modeling of three-phase busbar systems: Calculation of the thermal field and electrodynamic forces," in *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2016.
- [16] "ANSYS Innovation Courses," 07 01 2021. [Online]. Available: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/ansys-maxwell-getting-started/lessons/ansys-maxwell-basics-lesson-1/>. [Accessed 07 11 2022].

- [17] G. Kadkhodaei, K. Sheshyekani and M. Hamzeh, "Coupled electric–magnetic–thermal–mechanical modelling of busbars under short-circuit conditions," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 4, pp. 955-963, 2016.

Piero S. Prado Zuta-First Author was born in Villa El Salvador, Lima in 2001. He's a Mechanical-Electrical Engineering student from National Technological University of Lima (UNTELS).

In 2021, I develop a scientific about Low Voltage Energy and at 2022 I was involved in the development of an electricity book.

Interested in research related topics in simulation of electrical devices.

Fabrizio A. Millan Montalvo-Second Author was born in Jauja, Junín, in 1976. He received his degrees in the specialty of electrical engineering, National University of Callao, Bellavista. Peru, in 2009 and the degree of Mgs. in Public Management, E. Guzmán y Valle National University. Chosica, Peru, in 2018. Graduated from the Doctorate in Educational Sciences. 2019.

From 2001 to 2018, I performed work functions as assistant, supervisor, designer and director in electromechanical projects for different clients such as electricity distribution companies, Telecommunications, Mining, Buildings and Industries. Since 2011, Professor at different Universities, auxiliary category in the Department of Electrical Engineering, National Technological University of Lima Sur and National University of Callao. He is the author of a book, more than one technical scientific article.

His research interest includes related topics in electrical engineering and its application. Recognized as second place for his presentation in the framework of the I International Congress of Science, Technology and Innovation UNTELS-CICTI 2020.

Higmmmer Santiago Presentation Quispe-Third Author. He was born in La Victoria, Lima, in 1986. He graduated in the specialty of mechanical and electrical engineering, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Villa El Salvador, Lima-Peru in 2016. Graduated from the Master's Degree in University Teaching, Universidad E. Guzmán y Valle, in 2019.

From 2015 to the present, I perform work functions as a supervisor, designer and head of electrical projects and maintenance in various electrical systems for different companies in various types of buildings. Since 2017, professor at various Institutes, teacher at the Electrotechnics school at the institute, Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial, SENATI and Instituto de Educación Superior Tecnológico Público Gilda Liliana Ballivian Rosado.

Interested in research on topics related to electrical engineering applied in the Industrial sector for innovation and improvement in technology and quality improvement.

Julio Enrique Lostaunau Martínez-Fourth Author was born in San Vicente, Cañete, Lima in 1973. He received his degrees in the specialty of electrical engineering, Engineering National University, San Martin de Porres. Peru, in 2012 and the degree of Mgs. in Master in Business Administration, Garcilaso de la Vega University. Lima, Peru, in 2022.

From 2013 to the present, I performed work functions as concrete-encased grounding electrodes designer for different clients such as electricity distribution companies, Telecommunications, Buildings and Medical Industries. Since 2023, Professor at different Universities, in the Department of Electrical Engineering, National Technological University of Lima Sur, Technological University of Peru and Cibertec Institute

Vilma Tarrillo Vargas- fifth author was born in Rioja, San Martín, in 2000. He holds a degree in Mechanical and Electrical Engineering from the National University of Jaén, Peru. She works as a supervisor in the Construction Control Department at Tecsur, leading the supervision of low- and medium-voltage networks and ensuring the proper execution of electrical projects.