

Geometría novedosa en interruptores de baja tensión

Miguel S. Nuñez-Aguayo¹, J. Luis Luviano-Ortiz²,
Yanan Camaraza-Medina³, Abel Hernandez-Guerrero⁴

¹Energy Research Group, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, México. Email: ms.nunezaguayo@ugto.mx

²Energy Research Group, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, México. Email: luis.luviano@ugto.mx

³Facultad de Ciencias Técnicas, *Universidad de Matanzas, Cuba*. Email: yanan.camaraza@umcc.cu

⁴Energy Research Group, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, México. Email: abel@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se investigó la simulación y análisis del fenómeno complejo de la propagación de un arco eléctrico en cámaras de interrupción de baja tensión. El objetivo fue comparar el efecto de diferentes geometrías en el tiempo requerido para lograr la extinción del arco eléctrico. El análisis se realizó mediante simulaciones numéricas de fenómenos de campos electromagnéticos. Se propusieron geometrías novedosas que mejorarán la propagación y extinción del arco eléctrico. La cámara consta de dos electrodos de hierro (cátodo) y aluminio (ánodo), placas divisorias de hierro y un dominio de fluido de aire. El arco eléctrico se modela como una columna de plasma de 100 A de CC que fluye a través del aire, inicialmente a una temperatura de 1×10^4 K, y condiciones atmosféricas para el dominio de fluido. En el modelo se consideran propiedades dependientes de la temperatura. Las simulaciones se realizan cambiando la configuración de los parámetros geométricos en el modelo propuesto y comparando la fuerza superficial a lo largo de la columna de plasma.

Palabras clave: Arco eléctrico; Corriente continua; Energía; Análisis numérico.

Abstract

The simulation and analysis of the complex phenomenon of an electric arc propagation in low voltage chambers was investigated. The objective was to compare the effect of different geometries in the time required to achieve the extinction of the electric arc. The analysis is performed by electromagnetic field phenomena numerical simulations. The aim is to propose a novel geometry that will improve the functioning of the electric arc propagation and extinction. The chamber consists of two electrodes of materials iron (cathode) and aluminum (anode), splitter plates of iron, and a fluid domain of air. The electric arc is modelled as a plasma column of 100 A of DC (Direct Current) flowing through air initially at 1×10^4 K, and atmospheric conditions for the fluid domain. Temperature-dependent properties are considered in the model. The simulations are performed by changing the configuration of geometric parameters in the proposed model and comparing the surface force along the plasma column.

Keywords: Electric Arc; DC; Energy; Numerical Analysis.

Nomenclatura

\vec{E} – Vector de potencial eléctrico

R – Resistencia

I – Corriente

ρ – Densidad

t – Tiempo

σ – Conductividad eléctrica

\vec{J} – Densidad de corriente

\vec{B} – Campo magnético

\vec{H} – Campo de fuerza magnética

ϕ – Potencial eléctrico

1. Introducción

En el siglo XIX se construyeron redes eléctricas para distribuir electricidad de corriente continua (CC) durante los desarrollos de Edison. Sin embargo, la falta de estándares y tecnologías para las redes de CC se convirtieron en las principales razones para que los sistemas de distribución eléctrica de corriente alterna (CA) fueran los que dominaran el mercado, convirtiéndose así en el estándar de distribución de electricidad a los consumidores individuales y a la industria. Con el surgimiento de tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica en tiempos modernos, como los campos de paneles solares, y con el desarrollo de los circuitos electrónicos de potencia, ha sido necesario crear redes eléctricas de corriente continua para estos. La protección de estas redes contra cortocircuitos es uno de los desafíos más importantes en la aplicación de sistemas de alimentación de CC. El problema es más complejo que en redes CA porque el movimiento de electrones en CC es en una sola dirección y nunca pasa por un valor nulo. Estos dispositivos de protección deben extinguir una columna de plasma, que esencialmente es una alta concentración de energía en un espacio confinado, en el menor tiempo posible, y deben disipar la energía restante de manera que se protejan los materiales.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) define el bajo voltaje del sistema de suministro como un voltaje en el rango de 120 a 1500 V para sistemas de CC. La investigación en fenómenos de propagación del arco eléctrico está siendo liderada por empresas manufactureras, como Siemens [1] y Schneider Electric [2] con modelos 2D y 3D para geometrías complejas, que son las más cercanas a la realidad. Sin embargo, esta investigación a menudo incluye código propietario y datos no revelados en su totalidad. Las simulaciones de un arco eléctrico implican la dinámica de fluidos de plasma y las interacciones electromagnéticas de los materiales. Esto significa que deben construirse modelos numéricos multifísicos complejos para su análisis. Los estudios iniciales se llevaron a cabo en 1996 por Karetta et al. [3] con un enfoque que considera la interacción de la dinámica de fluidos, la transferencia de calor y los fenómenos electromagnéticos y que se amplió aún más para incluir el proceso de división del arco, debido a las placas divisoras en cámaras de bajo voltaje, por Lindmayer y otros [4]. Iturregui [5] estudió los efectos del número de placas divisoras en un modelo magnetohidrodinámico 3D y validó la metodología con datos experimentales. Desde entonces se han estudiado geometrías y enfoques más complejos [6-9].

2. Metodología

2.1. Ecuaciones gobernantes

El modelo considerado será analizado desde la perspectiva de las interacciones electromagnéticas del arco y los materiales ferromagnéticos en la cámara de extinción. Por ello, las ecuaciones que gobiernan el fenómeno son las leyes del electromagnetismo de Maxwell (Ecs. (1)-(3)).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (3)$$

Es de particular interés conocer la fuerza inducida sobre el arco eléctrico. Esta fuerza se puede calcular con la ecuación de fuerzas de Lorentz, como se muestra a continuación:

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4)$$

2.2. Modelo

Una cámara de bajo voltaje está hecha de muchas placas divisoras paralelas entre dos electrodos. El modelo 3D (Fig. 1) de la cámara de baja tensión utilizada en este trabajo, consta de dos electrodos de cobre con 12 placas divisoras sumergidas en un dominio de fluido, en este caso aire. La cámara de extinción se basa en interruptores (también conocidos como disyuntores) de CC, y está basada en modelos disponibles comercialmente. El material de la placa y el cátodo son de hierro, que tiene una permeabilidad magnética relativa alta (4000). El ánodo está hecho de aluminio, que no se considera un material ferromagnético y tiene una baja permeabilidad magnética (1.00002 en relación con el espacio libre). Las aplicaciones prácticas de materiales ferromagnéticos para la placa divisora deben considerar otros factores, como el costo y los efectos de desgaste. Se considera un dominio de fluido de aire. El arco eléctrico se extingue aumentando la longitud del arco y disminuyendo su área de sección transversal. Esto se logra dividiendo el arco con la placa divisora y aumentando la resistencia hasta que la corriente sea cero [4,8]. La placa divisora y los electrodos están estáticos durante la simulación.

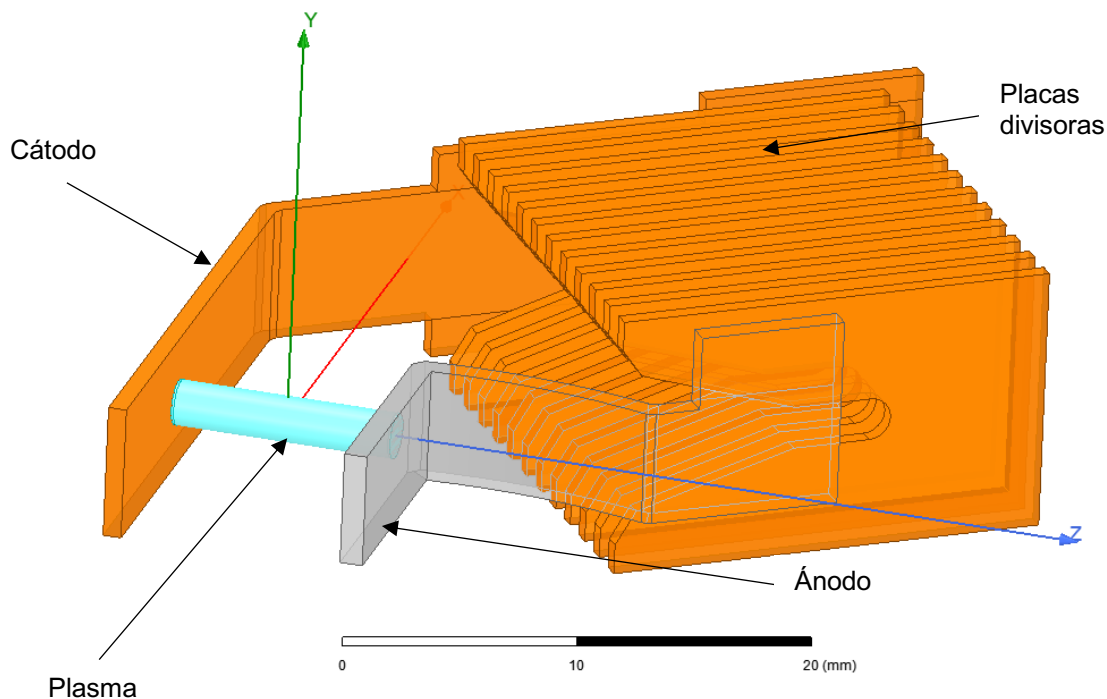


Figura 1. Modelo 3D de la cámara de bajo voltaje.

En el caso de un disyuntor de CC, la corriente no pasa por un valor de 0 V por sí sola (lo que sí sucede en los disyuntores de CA). Es necesario forzar que la corriente pase por este valor para extinguir el arco. Si esto no ocurre, seguirá generando calor e incluso podría llegar al estado estacionario del arco, si es que la fuente de tensión soporta tal carga. Por lo tanto, es necesario buscar formas alternativas de disipar la energía y obligar a que la tensión del arco de CC alcance un valor nulo. Esto se puede hacer por [4,8]:

- Enfriamiento del arco eléctrico.
- Dividirlo.
- Alargarlo (reduciendo así su diámetro y aumentando su resistencia).

El enfoque de este trabajo será proponer una nueva geometría que pueda aplicar una fuerza sobre el arco con la intención de alargarlo.

2.3. Consideraciones

Para la simulación del modelo propuesto se consideran los siguientes puntos:

- Las propiedades del aire-plasma, tal como la conductividad eléctrica, son una función de la temperatura.
- Las condiciones de simetría no se consideran en el modelo 3D.
- No se considera la ignición del arco ni la apertura de los contactos.
- Todos los elementos del modelo son estáticos cuando comienza la simulación.
- No se consideran modelos de caída de tensión en las raíces del arco.
- El arco eléctrico se modela como una columna de plasma de 2 mm de diámetro y se toman las propiedades a 1×10^4 K.
- Corriente de entrada de 100 A.

2.4. Variaciones de geometría propuestas

Las geometrías propuestas se propusieron con el objetivo de lograr un efecto de elongación cuando el arco se acerca a las placas divisorias. Para hacer esto, la posición de las placas divisorias se movió en 3 posiciones diferentes, como se muestra en la Figura 2.

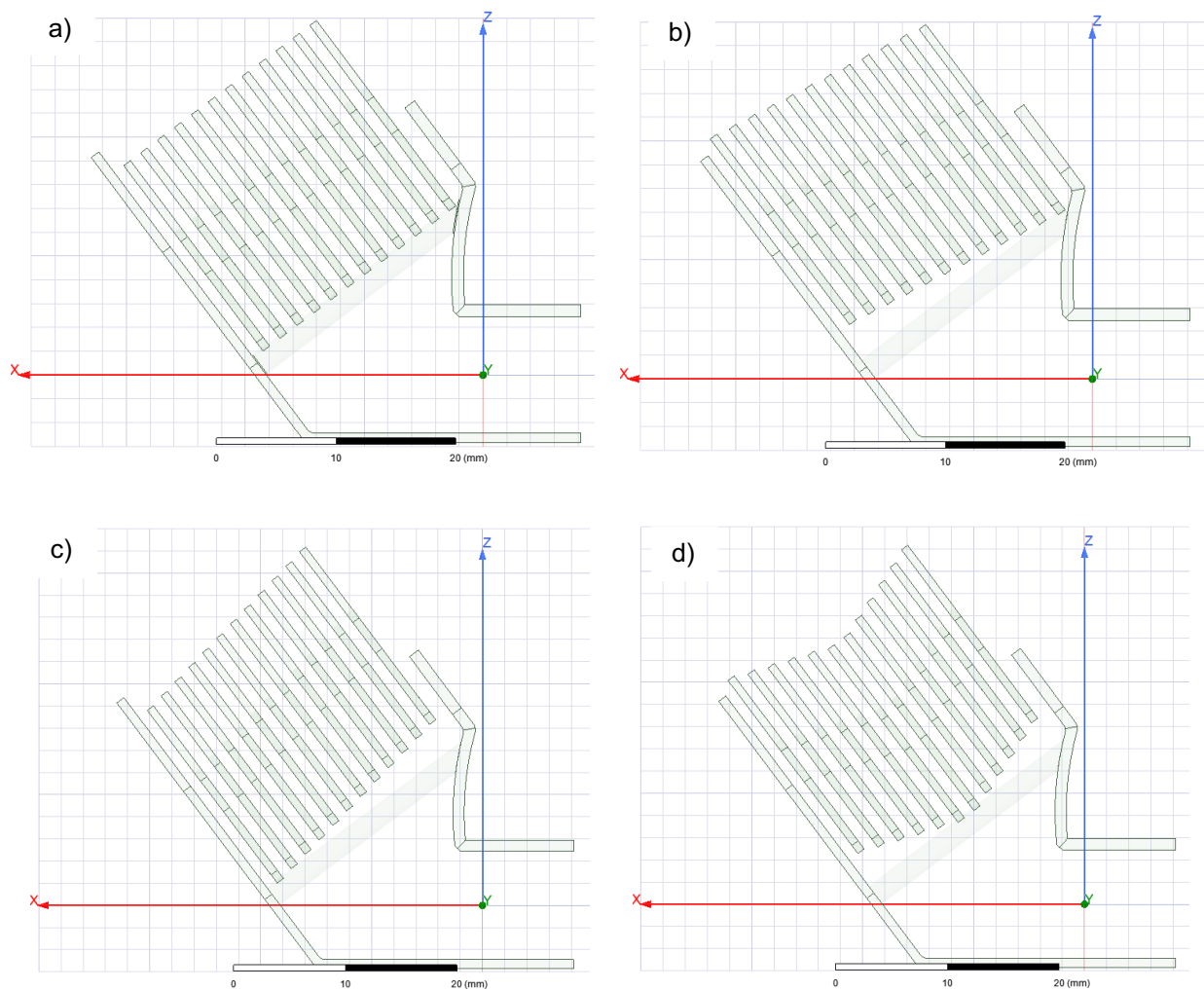


Figura 2. Geometrías propuestas. a) Geometría original, b) geometría con desplazamiento inferior, c) geometría con desplazamiento superior, d) geometría con desplazamiento inferior y superior.

3. Resultados

La Figura 3 muestra la magnitud de la densidad de corriente y el campo magnético para el caso cuando se usa la geometría original y el arco está cerca de las placas divisoras.

El efecto provocado por la interacción de estos campos produce las fuerzas de Lorentz, ya que esta es la fuerza ejercida por el campo electromagnético que recibe una partícula cargada o una corriente eléctrica. El requerimiento de extinguir el arco eléctrico en el menor tiempo posible sugiere que las modificaciones geométricas deben influenciar la intensidad y posicionamiento de las fuerzas de Lorentz, con el objetivo de direccionar el arco hacia las placas divisoras. Esto ayudará a analizar cómo se comportará el arco al acercarse a las placas divisoras.

El efecto de la fuerza sobre la superficie de la columna de plasma al cambiar la geometría se muestra en la Figura 4. donde se puede observar cómo la distribución de fuerzas a lo largo de la columna de plasma se ve afectada por la posición de las placas divisoras, y este tirón siempre es hacia las placas divisoras.

Para lograr una mejor elongación del arco eléctrico y, por lo tanto, una extinción más rápida, un tirón más fuerte en cualquiera de los extremos del plasma tendrá mejores resultados. Esto se debe a que las raíces del arco, es decir, los puntos donde el arco se conecta con los electrodos, ofrecen la mayor resistencia al movimiento del arco eléctrico debido al contacto directo que existe entre ellos.

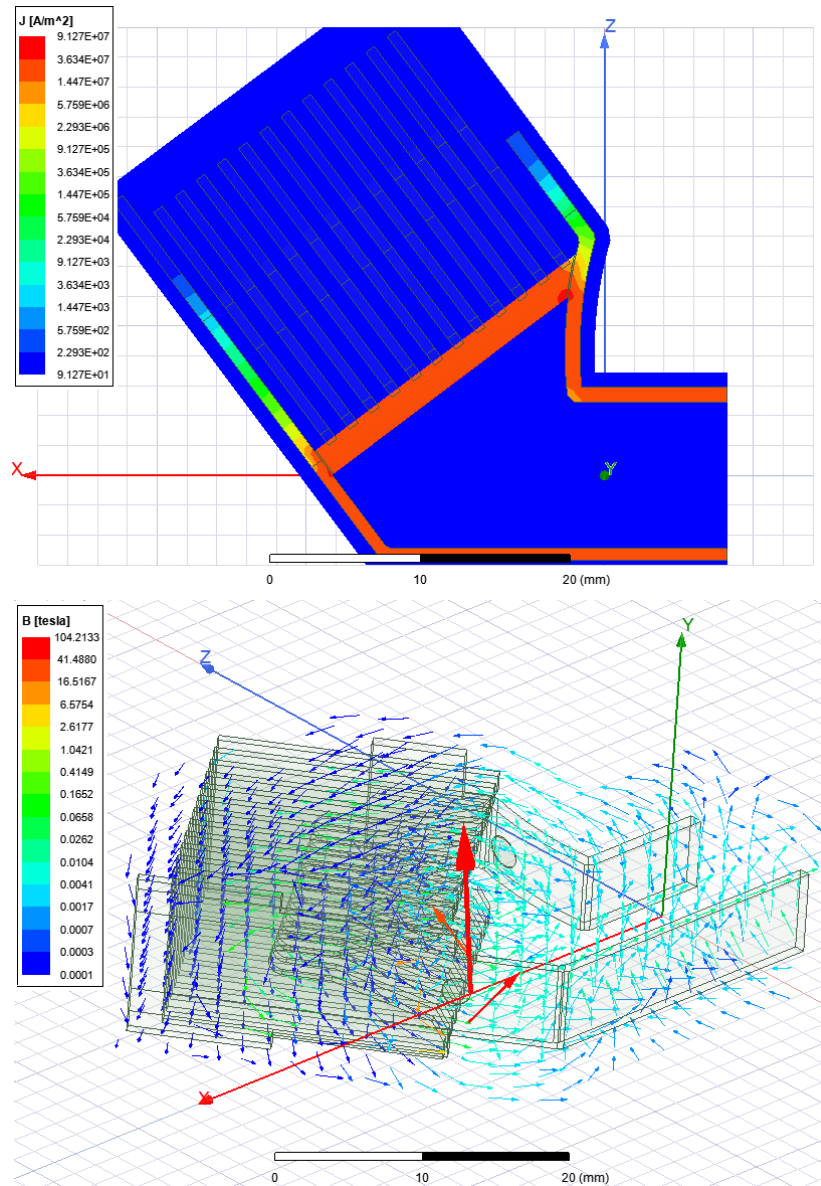


Figura 3. Geometría original. Densidad de corriente (arriba), campo magnético (abajo).

En este caso, las placas divisoras desplazadas inferiormente logran una tracción más fuerte (imagen inferior izquierda de la Figura 4) con una fuerza superficial de $593,19 \text{ N/m}^2$ aplicada a la superficie del arco eléctrico en el lado del ánodo. El resto de las geometrías propuestas producen fuerzas de Lorentz de menor magnitud. Esto se debe que al cambiar la posición de las placas, también cambia la forma que

tendrá el campo magnético de distintas maneras, afectando así también las fuerzas de Lorentz producidas por cada geometría. Los resultados obtenidos sugieren que desplazar las placas superiores, en la proporción propuesta en este trabajo, afecta negativamente a la magnitud de las fuerzas de Lorentz ejercidas sobre el arco.

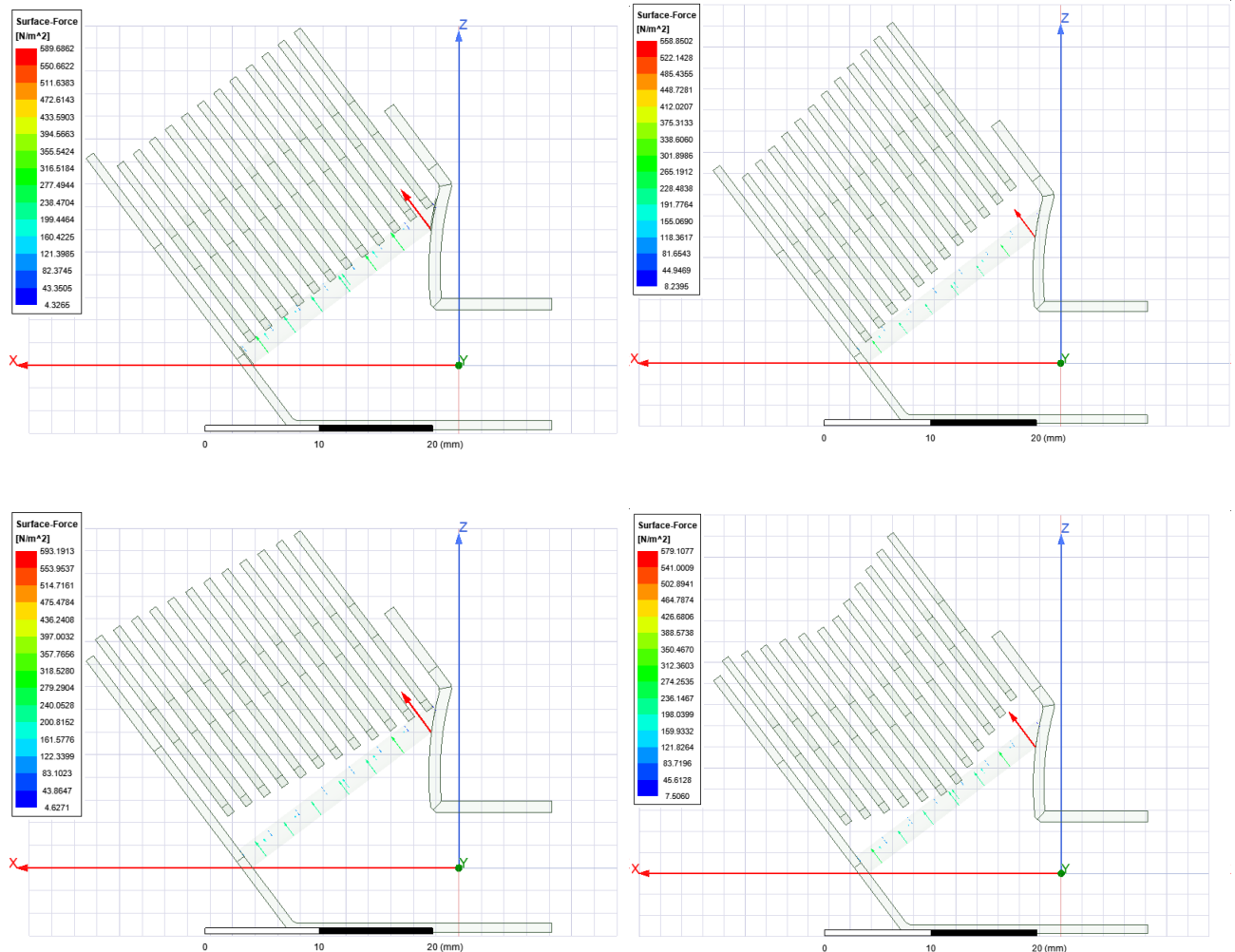


Figura 4. Fuerza en la superficie del arco eléctrico.

En la Figura 5, se graficó la distribución de la magnitud de la densidad de corriente y la magnitud del campo magnético a lo largo del arco eléctrico. Dado que las Fuerzas de Lorentz se calculan multiplicando los vectores de estos dos valores, se

puede ver que la distribución de fuerzas a lo largo de la columna de plasma se concentrará en los extremos del arco, como se muestra en la Figura 4, con un lado teniendo un tirón más fuerte.

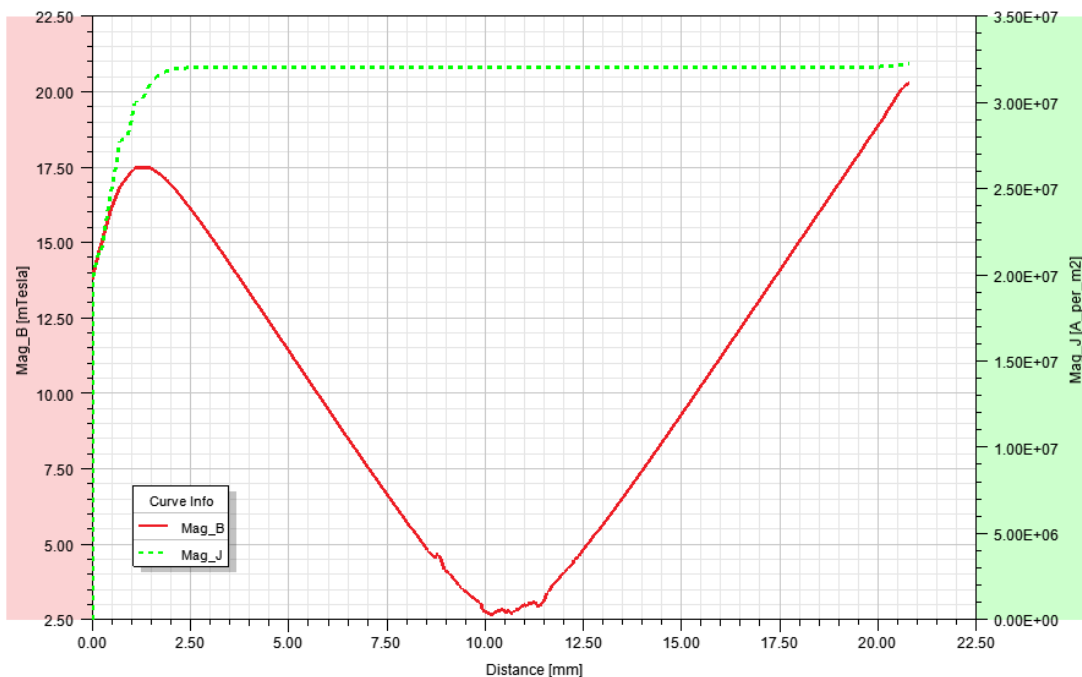


Figura 4. Densidad de corriente y campo magnético a lo largo de la columna de plasma que va del cátodo al ánodo (geometría desplazada inferiormente).

4. Conclusiones

Las cámaras de extinción de baja tensión son componentes esenciales en las aplicaciones actuales de redes de distribución de CC y electrónica de potencia. En este trabajo se estudió el efecto del posicionamiento de las placas divisoras ferromagnéticas en relación con el arco eléctrico. Con la configuración del modelo propuesto, la geometría con placas divisoras desplazadas inferiormente tuvo los mejores resultados, al lograr un tirón más fuerte en un extremo de la columna de plasma. Los resultados obtenidos sugieren que desplazar las placas superiores, en las proporciones propuestas en este trabajo, tiene un efecto debilitante en las fuerzas de Lorentz ejercidas en la superficie del arco eléctrico. Esto es consecuencia de que estas placas se encuentran más cerca del electrodo al que se le aplica el flujo de corriente.

Una nota importante es que si se invirtiera la dirección de la corriente eléctrica que fluye a través del circuito (siendo ahora el electrodo de hierro el ánodo y el electrodo de aluminio el cátodo), el campo magnético sería diferente y la geometría desplazada inferiormente podría no ser la geometría de mejor rendimiento. Tales variaciones se analizarán en futuros estudios.

5. Referencias

- [1] Anheuser M, Beckert T, Kosse S. Electric arcs in switchgear theory, numerical simulation and experiments'. In Proceedings FSO 2011, Symposium on Physics of Switching Arc 2011 Sep.
- [2] J. Wild, J.Y. Battandier, R. Delahaye, T. Devouassoux, M. Perrot, J.L. Ponthenier, 2D arc modelling of a double breaking circuitbreaker. Comparison with measurement and optimisation, in: 15th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Toulouse, 2004.
- [3] Karetta F, Lindmayer M. Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs. In Electrical Contacts-1996. Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts 1996 Sep 16 (pp. 35-44). IEEE.
- [4] Lindmayer M, Marzahn E, Mutzke A, Ruther T, Springstube M. The process of arc splitting between metal plates in low voltage arc chutes. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2006 May 30;29(2):310-7.
- [5] Iturregi A, Barbu B, Torres E, Berger F, Zamora I. Electric arc in low-voltage circuit breakers: experiments and simulation. IEEE Transactions on Plasma Science. 2016 Dec 9;45(1):113-20.
- [6] Lisnyak M. Theoretical, numerical and experimental study of DC and AC electric arcs (Doctoral dissertation), Université Orléans, France. 2018.

- [7] Yang F, Rong M, Sun Z, Wu Y, Wang W. A numerical study of arc-splitting processes with eddy-current effects. In 2008 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications 2008 Sep 7 (pp. 197-200). IEEE.
- [8] Singh AK, Ahmmed N, Atharparvez M. Numerical simulation of arc splitting process in a LV switching device considering thermo-field emission mechanism. In 2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm) 2015 Oct 11 (pp. 391-399). IEEE.
- [9] PM AP. An inverse problem approach to modeling of circuit breaker arc voltage. In 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE) 2014 Nov 28 (pp. 1-4). IEEE.
- [10] Nilsson A. Pre-study of Arc Extinguish Techniques for a 4-Pole 1500 VDC Contactor. Maestry dissertation. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. 2014.
- [11] Iturregi Aio A. Modelization and analysis of the electric arc in low voltage circuit breakers (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea), Spain. 2013.
- [12] Mutzke A, Ruther T, Kurrat M, Lindmayer M, Wilkening ED. Modeling the arc splitting process in low-voltage arc chutes. In Electrical Contacts-2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2007 Sep 16 (pp. 175-182). IEEE.
- [13] Murphy AB. Transport coefficients of air, argon-air, nitrogen-air, and oxygen-air plasmas. Plasma chemistry and plasma processing. 1995 Jun 1;15(2):279-307.
- [14] Lozano Ocampo R. Numerical analysis of heat dissipation in DC low-voltage circuit breakers (Master's dissertation, University of Guanajuato), Mexico. 2021.
- [15] T. Billoux, Y. Cressault, P. Teulet, and A. Gleizes, "Calculation of the net emission coefficient of an air thermal plasma at very high pressure," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 406, p. 012010, Dec. 2012, doi: 10.1088/1742-6596/406/1/012010.
- [16] V. Aubrecht, M. Bartlova, and O. Coufal, "Radiative emission from air thermal plasmas with vapour of Cu or W," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 43, no. 43, p. 434007, Oct. 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/43/434007.