

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ARCOS ELÉTRICOS EM CORRENTE CONTÍNUA UTILIZANDO A TEORIA MAGNETO-HIDRODINÂMICA (MHD)

Rodolfo P. Londero*, Luis Henrique S. Farina*, Alexander Dutra*, Vitor C. Bender*, Tiago B. Marchesan*, Fernando C. Pepe†, Gilnei J. G. dos Santos† e Lucas M. de Chiara†

* Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Laboratório de Engenharia Assistida por Computador – INRI CAE
Santa Maria, RS, Brasil

† Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL
Campinas, SP, Brasil

Resumo—Este trabalho apresenta uma metodologia de simulação numérica de arcos elétricos em corrente contínua empregando a teoria magneto-hidrodinâmica (MHD), a qual descreve esse fenômeno como um fluido condutor de eletricidade. Para isso, é apresentada a teoria fundamental dos arcos elétricos, bem como a modelagem matemática adotada na teoria MHD. A implementação do método é realizada através do acoplamento entre o *software* Ansys Fluent® e o Ansys Maxwell®, devido a necessidade da realização de cálculos relacionados à fluidodinâmica e eletromagnetismo. Através da simulação de uma geometria 3-D, de dois condutores em paralelo expostos ao ambiente aberto, alimentados por corrente contínua, obtém-se o comportamento do arco elétrico ao longo do tempo, apresentando os deslocamentos realizados e o aumento da temperatura do ar conforme o mesmo se expande. Com isso, torna-se possível analisar diversas outras situações, que não seriam facilmente obtidas experimentalmente, proporcionando a elaboração de cenários para os estudos práticos.

Palavras-Chave—Ansys, Arco Elétrico, Fluent, Maxwell, MHD, Teoria Magneto-hidrodinâmica

I. INTRODUÇÃO

Arcos elétricos são fenômenos bastante complexos, envolvendo eventos relacionados à fluidodinâmica, termodinâmica, reações químicas, eletromagnetismo e, em algumas situações, movimentos de partes mecânicas [1]. A medida que se estabelece, a corrente elétrica começa a circular pelo ar, gerando grandes quantidades de calor e expelindo, de forma explosiva, grandes volumes de gases ionizados (plasma) e vapores de metais condutores. Conforme o arco evolui, a energia elétrica continua a ser convertida em formas de energia extremamente perigosas. Os perigos incluem o imenso calor do plasma, calor irradiado, fumaça tóxica, gotículas derretidas de material condutor, estilhaços, luz intensa e uma onda de pressão dos gases em rápida expansão [2].

Em função disso, muitos pesquisadores fazem uso de experimentos para investigar esse fenômeno. No entanto, a determinação de diversos parâmetros, como temperatura e campo magnético, é complexa, principalmente quando o arco está localizado em ambientes fechados, devido à dificuldade de visualizar o fenômeno. Além disso, esses experimentos são de alto custo e exigem grandes períodos de tempo de

preparação, o que torna o uso de simulações numéricas uma alternativa ideal para reproduzir esse fenômeno, tornando possível a visualização do processo e a obtenção de resultados quantitativos e qualitativos, além de proporcionar agilidade em projetos e otimização, bem como a redução de custos, evitando a construção de protótipos desnecessários.

A fim de descrever e prever o comportamento do arco elétrico e as várias grandezas características, diversas abordagens podem ser utilizadas. Entre elas destaca-se teoria MHD, que aborda de forma mais completa os mecanismos físicos que ocorrem nesse fenômeno [3]. Essa teoria representa o fluxo de fluidos eletricamente condutores, como metais fundidos, eletrólitos e plasmas, na presença de campos eletromagnéticos, descrevendo a evolução de quantidades macroscópicas como densidade, velocidade, pressão e campos magnéticos [1].

Nesse contexto, este trabalho apresenta os principais conceitos que definem um arco elétrico, seguido da modelagem matemática da teoria MHD. É apresentada a metodologia de simulação empregada na aplicação da teoria MHD, destacando os principais processos a serem considerados para a realização da simulação. Por fim, é feito o estudo de uma simulação envolvendo dois condutores paralelos dispostos em um ambiente aberto, composto por ar, utilizando entradas de corrente contínua e, assim, obtendo-se resultados de densidade de corrente do arco elétrico e temperatura do ar que descrevem o comportamento do fenômeno ao longo do tempo.

II. O ARCO ELÉTRICO

De forma geral, um arco elétrico é uma ruptura elétrica de um gás que produz uma descarga elétrica, onde a corrente passa a circular através de um meio não condutor, gerando um plasma que sustenta a descarga. Esse fenômeno se forma através da separação de dois contatos elétricos com diferentes potenciais ou quando ocorre uma faísca entre os dois condutores. Nas descargas elétricas, a emissão dos elétrons a partir do catodo ocorre devido ao mecanismo auto eletrônico (em baixas temperaturas), termoiônico (em altas temperaturas) ou através de ambos. As correntes elétricas são elevadas, variando de alguns ampères (A) até milhares de ampères (kA). Dessa forma, as densidades de correntes típicas são

também elevadas, geralmente na ordem de $\approx 10^4 \text{ A/cm}^2$ a $\approx 10^7 \text{ A/cm}^2$ [4]. Além disso, segundo [5], a temperatura atingir valores superiores a $10.000 \text{ }^\circ\text{C}$ no interior do arco.

A. Modelo Genérico do Arco Elétrico

O esquema de um arco elétrico genérico é apresentado na Fig. 1(a), o qual representa o arco elétrico como um canal condutor em formato cilíndrico. Nesse modelo, há uma queda de tensão no catodo (U_c) e quase sempre outra queda de tensão no anodo (U_a), sendo que a queda U_c é geralmente maior que U_a [7]. Essas regiões são conhecidas como queda catódica e queda anódica, respectivamente, e ocorrem em regiões muito curtas em relação à superfície dos eletrodos, de modo que o campo elétrico nessas regiões é muito elevado [8]. Entre essas regiões, está presente a coluna do arco, a qual ocupa a maior parte do espaço entre os eletrodos [4, 8].

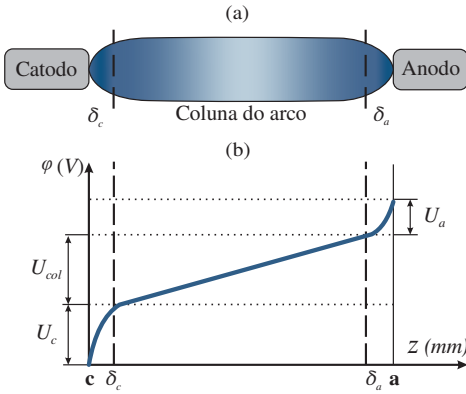


Figura 1: Representação do arco elétrico. (a) Coluna de plasma. (b) Queda de tensão típica ao longo da coluna do arco.

A distribuição de potencial ao longo da coluna de arco é uniforme (Fig. 1(b)), ou seja, a intensidade do campo elétrico é aproximadamente constante e depende de fatores como diâmetro do canal condutor, intensidade da corrente, tipo do gás, regime de fluxo, entre outros. Normalmente, a tensão total do arco (φ) apresenta um comportamento linear, aumentando conforme a extensão do arco. Entretanto, o comprimento da coluna pode ser afetado pelo efeito de condições externas como fluxo do gás, campos magnéticos, entre outros. Já nas regiões próximas aos eletrodos com comprimento δ_c e δ_a , o potencial muda rapidamente como resultado da transferência de energia entre a coluna de arco e os eletrodos [4].

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

O arco elétrico é um fenômeno extremamente complexo que envolve um grande número fenômenos físicos que interagem durante a formação, manutenção e interrupção, em um curto espaço de tempo. Dessa forma, são levados em conta problemas que envolvem fluidodinâmica, eletromagnetismo e termodinâmica [5]. Esses fenômenos podem ser modelados

¹Temperatura superior a, pelo menos, 2 vezes a temperatura da superfície do Sol, que é aproximadamente $5.810,93 \text{ K}$ [6].

através da teoria MHD, a qual considera o plasma como um fluido eletricamente condutor na presença de campos magnéticos e descreve, de forma macroscópica, quantidades como densidade, velocidade, pressão e campo magnético [1, 9].

Para a aplicação dessa teoria, são feitas duas considerações [9]:

- O plasma está em Equilíbrio Térmico Local (ETL), ou seja, a temperatura do gás (T_g), dos elétrons (T_e) e dos íons (T_i), são iguais [8];
- Os vapores próximos aos eletrodos não são considerados.

A teoria é descrita numericamente através das equações de Navier-Stokes da dinâmica dos fluidos, que consiste nas equações de conservação de massa, momento e energia; e pelas equações de Maxwell que descrevem os campos eletromagnéticos [1].

a) Equação de conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

onde ρ é a densidade de massa (kg/m^3);

b) Equação de conservação de momento:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_i \vec{V}) = \nabla \cdot (\eta \nabla v_i) - \nabla p + \rho \vec{g} + S_i \quad (2)$$

onde v_i é a velocidade na direção i , η é a viscosidade dinâmica (Pa.s), p é a pressão (Pa), \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s^2) e S_i é o termo que descreve outras fontes.

c) Equação de conservação de Energia:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho H \vec{V}) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla H \right) + S_j \quad (3)$$

onde H é a entalpia (J), λ é a condutividade térmica (W/(mK)), C_p é o calor específico (J/(kgK)) e S_j representa outras fontes.

d) Equações de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (7)$$

onde \vec{E} é o vetor intensidade de campo elétrico (V/m), \vec{B} é o vetor densidade de fluxo magnético (Wb/m^2), c é a velocidade da onda eletromagnética (m/s), $\mu = \mu_0$ é a permeabilidade do ar ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$) e \vec{J} é a densidade de corrente elétrica (A/m^2).

Essas equações impõem dois termos fontes na equação da conservação de momento (Eq. 2), a força de Lorentz (Eq. 8) e a força eletrostática (Eq. 9):

$$\vec{F}_l = \vec{J} \times \vec{B} \quad (8)$$

$$\vec{F}_e = \rho_e \vec{E} \quad (9)$$

onde ρ_e é a densidade de carga elétrica (C/m^3).

IV. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE ARCOS ELÉTRICOS

As simulações dos arcos elétricos são realizadas implementando o Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método de Volumes Finitos (MVF). A implementação desses métodos foi realizada através dos *softwares* da Ansys®, principalmente: (i) o Ansys Fluent®, o qual é responsável pela solução das equações de mecânica dos fluidos e faz uso do MVF; e (ii) o Ansys Maxwell®, que é um módulo do pacote Ansys Electronics, responsável pela solução das equações eletromagnéticas empregando o MEF.

O Ansys Fluent® dispõe de um módulo dedicado ao cálculo das equações MHD, permitindo a simulação de fluidos eletricamente condutores sobre o efeito de campos magnéticos constantes. Entretanto, para a simulação dos arcos elétricos é importante a obtenção dos campos magnéticos gerados pelo mesmo a cada instante de tempo, ou seja, é necessário realizar um acoplamento entre o Ansys Fluent® e o Ansys Maxwell®. Assim, o Ansys Maxwell® calcula os campos eletromagnéticos gerados pelo arco elétrico e fornece essa informação ao Ansys Fluent® para determinar o movimento dos arcos no espaço.

A Fig. 2 ilustra o fluxo de simulação ao realizar o acoplamento entre o Ansys Fluent® e o Ansys Maxwell®. O Ansys Fluent® é o *software* que gerencia toda a simulação, sendo ele o responsável por acionar o Ansys Maxwell® e ler o seu retorno. A cada iteração, o Ansys Fluent® envia os dados de condutividade elétrica do fluido em questão ao Ansys Maxwell® para que este possa atualizar essa informação no seu ambiente de simulação e, assim, calcular e exportar o campo magnético com os dados atualizados. Dessa forma, o Ansys Fluent® atualiza o campo magnético gerado pelo fluido e pode calcular a força de Lorentz, que irá influenciar na direção do movimento do arco elétrico. Esse processo constitui o fluxo de simulação considerando corrente contínua, ou seja, entrada de corrente constante. Para a realização das simulações com corrente alternada (CA) é necessário a inclusão um passo intermediário que atualiza as entradas de ambos os *softwares*.

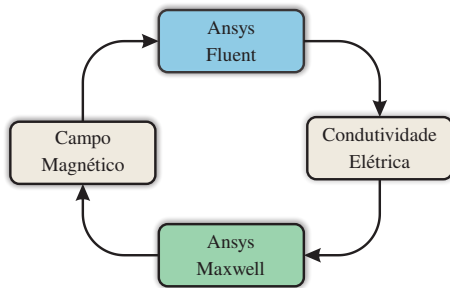


Figura 2: Acoplamento entre o Ansys Fluent® e o Ansys Maxwell®.

A implementação do fluxo de simulação apresentado na Fig. 2 é realizada através de *User-Defined Functions* (UDF), que são funções programadas pelo usuário, capazes de customizar e aprimorar significativamente o Ansys Fluent®. Essas funções são escritas em linguagem de programação C/C++, seguindo uma estrutura de macros definidas pelo *software* [10].

V. SIMULAÇÃO

A. Modelo da Geometria

A geometria adotada na simulação é derivada de um dos ensaios presentes na norma IEEE 1584 [11], a qual consiste em dois condutores de cobre paralelos, dispostos verticalmente, separados por uma distância de 300 mm entre seus centros (Fig. 3), onde o condutor da esquerda é o Anodo e o condutor da direita é o Catodo, ambos modelados com uma área de seção transversal de 36 mm x 36 mm e comprimento de 240 mm, e estão imersos em uma caixa com ar (600 mm x 400 mm x 1.000 mm) à pressão atmosférica.

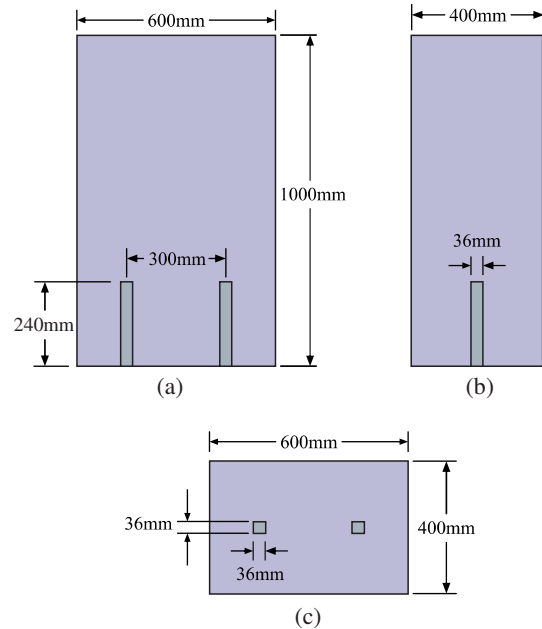


Figura 3: Geometria com suas dimensões. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Vista superior.

B. Malha

Para a solução numérica das equações MHD, assim como a solução de qualquer outro sistema de equações diferenciais que regem o comportamento de fluidos, é necessário realizar a discretização do domínio em questão, em pequenos subdomínios (elementos), para que seja possível aplicar os métodos de volumes finitos e elementos finitos para resolver o conjunto de equações em cada elemento [12]. O conjunto desses pequenos elementos é chamado de malha, e a precisão das soluções está diretamente ligada à forma de definição dos elementos.

A Fig. 4 apresenta a malha da geometria a ser simulada (Fig. 3). Foram realizadas diversas opções de malha, com diferentes métodos, tamanho e quantidade de elementos, optando-se por utilizar aquela que proporcionou uma melhor qualidade ortogonal. Para a geração da malha foi adotado o método CutCell que, segundo [13], é um método que permite uma redução no tempo de geração de malha e, por fazer uso de elementos hexaédricos, produz resultados melhores que dos métodos tetraédricos. A malha obtida apresenta as seguintes características:

- Média de assimetria: 0,00064
- Média de qualidade ortogonal: 0,99988
- Número total de elementos: 167.184
- Número total de nós: 177.701

A média de assimetria é uma das principais medidas de qualidade para uma malha, informando o quão perto do ideal uma face ou célula está. De acordo com a definição de assimetria, um valor de 0 indica uma célula equilátera (melhor) e um valor de 1 indica uma célula completamente degenerada (pior). A qualidade ortogonal das células é calculada usando o vetor normal da face, o vetor do centroide da célula que aponta para o centroide de cada uma das células adjacentes e o vetor do centroide da célula que aponta para cada uma das faces. O intervalo de qualidade ortogonal é 0-1, onde um valor de 0 é o pior e um valor de 1 é o melhor [13].

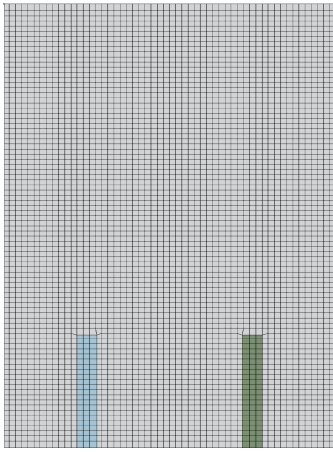


Figura 4: Malha.

C. Condições de Contorno

Para a correta simulação dos arcos elétricos, é necessário especificar as informações sobre as variáveis dependentes nos limites do domínio. O domínio fluido é representado por uma “caixa” que envolve os condutores, cujo material utilizado é o ar. O material usado nos domínios sólidos (condutores) é o cobre, com as propriedades físicas constantes e sem dependência de temperatura. As propriedades físicas do ar são especificadas através de UDFs fornecidas pela Ansys®.

As condições de contorno aplicadas nas superfícies dos domínios são apresentadas na Tabela I, onde T é temperatura, φ o potencial elétrico e A o potencial magnético vetorial.

Tabela I: Condições de contorno aplicadas

Contorno	T	φ	A
Paredes laterais, inferior e superior do domínio fluido	300 K	Fluxo Zero	Acoplado
Interfaces entre ar e condutores	Acoplado	Acoplado	Acoplado
Current_In (Face inferior do Anodo)	300 K	7.700.000 A/m ²	0
Current_Out (Face inferior do Catodo)	300 K	0 V	0

Além disso, as paredes do domínio fluido são modeladas como aberturas (*pressure-outlet*), indicando que os condutores

estão em ambiente aberto. A temperatura da caixa de ar é definida como 300 K (temperatura ambiente) à pressão atmosférica. As interfaces entre o ar e os condutores, são acopladas. A extremidade inferior do anodo recebe a entrada de corrente de 7,71605 MA/m², o que corresponde a 10 kA, e a extremidade inferior do catodo é definida como 0 V, assim a corrente flui do anodo em direção ao catodo. Além disso, a temperatura nessas faces é definida como 300 K a fim de melhorar a estabilidade e evitar erros devido às altas temperaturas do fluido.

D. Setup da simulação

A simulação no Ansys Fluent® foi configurada com os seguintes parâmetros:

- Modelo de energia: Ativado
- Modelo de radiação: P1
- Viscosidade: Standard k-e, Standard Wall Fn
- Acoplamento Pressão-Velocidade: Acoplado
- Número total de passos: 2.000
- Tamanho do passo: $1 \cdot 10^{-5}$
- Número de iterações em cada passo: 10

Já no Ansys Maxwell®, é utilizado o *setup* padrão e são definidas excitações de corrente nas faces inferiores dos condutores, sendo 10 kA entrando no anodo (*Current_In*) e 10 kA saindo do catodo (*Current_Out*), conforme a Fig. 5. Também deve ser definido um fio condutor entre os dois eletrodos, cuja condutividade elétrica é definida como 10.000 S/m [12]. Esse fio representa um “condutor de sacrifício”, que é utilizado apenas para definir o canal condutor inicial da descarga entre os condutores, após isso, o mesmo não interfere no decorrer da simulação.

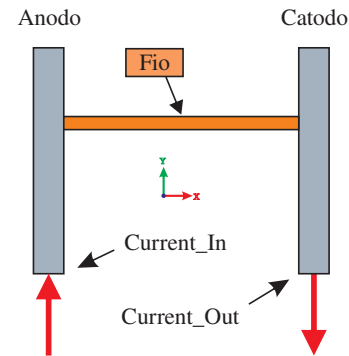


Figura 5: Geometria no Maxwell.

VI. RESULTADOS

A simulação foi realizada em uma *workstation* com processador Intel®Core™ i7-10750H CPU 2,60 GHz (12 CPUs) e memória RAM de 32 GB. Foram necessárias cerca de 6 h e 40 min para simular as 2.000 iterações, correspondendo a 20 ms de representação do fenômeno.

A. Análise das Densidades de Corrente

A densidade média de corrente nos condutores é apresentada na Fig. 6, a qual aumenta conforme o arco elétrico se estabelece, convergindo para aproximadamente 7 MA/m².

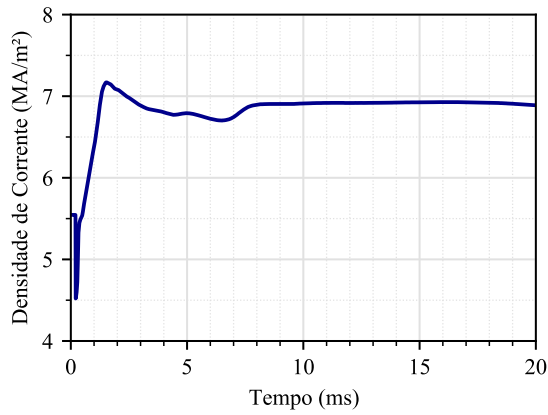


Figura 6: Densidade de corrente média nos condutores ao longo do tempo.

Já a corrente que circula pelo ar, atinge aproximadamente 32 MA/m^2 de pico nos instantes iniciais da formação do arco elétrico e varia conforme o arco se expande, mantendo-se aproximadamente em 21 MA/m^2 a partir de 10 ms.

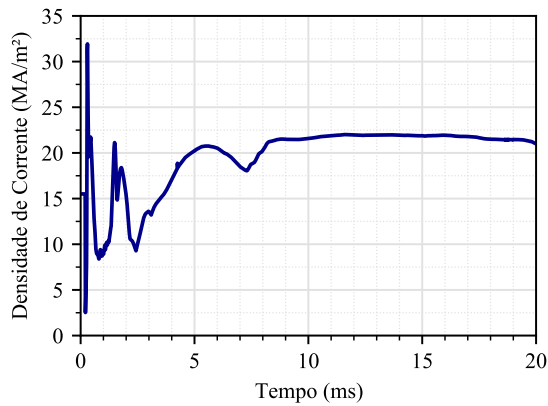


Figura 7: Densidade de corrente máxima no ar ao longo do tempo.

A Fig. 8 apresenta a distribuição da densidade de corrente observada através de um corte no plano X-Y, em determinados instantes de tempo, cuja corrente flui do anodo (condutor da esquerda) para o catodo (condutor da direita). Uma vez que a teoria MHD não considera as interações microscópicas que provocam seu surgimento, conforme visto na Seção III, utiliza-se o fio de sacrifício para simular a coluna inicial do arco elétrico, como observado no instante inicial da simulação (0 s). Nesse instante, a densidade de corrente máxima ao longo do fio é cerca de $12,1765 \text{ MA/m}^2$. Ao longo do tempo, a força de Lorentz produzida pela corrente do arco elétrico afeta o seu formato, direcionando-o para as extremidades superiores dos condutores e se expandindo ao longo do ar. Além disso, outro fator que afeta o deslocamento do arco elétrico é o alto valor de temperatura produzida pela radiação emitida, afetando a condutividade elétrica do ar.

A Fig. 9 mostra um corte no plano Y-Z, destacando que além do arco ser direcionado para cima (eixo Y positivo), há movimentos na direção do eixo Z, proporcionado pelos efeitos da força de Lorentz.

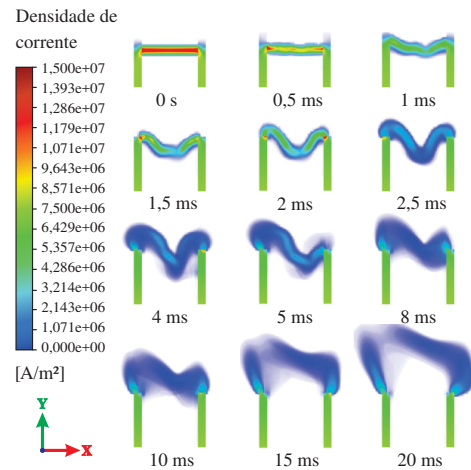


Figura 8: Distribuição de densidade de corrente (Plano X-Y).

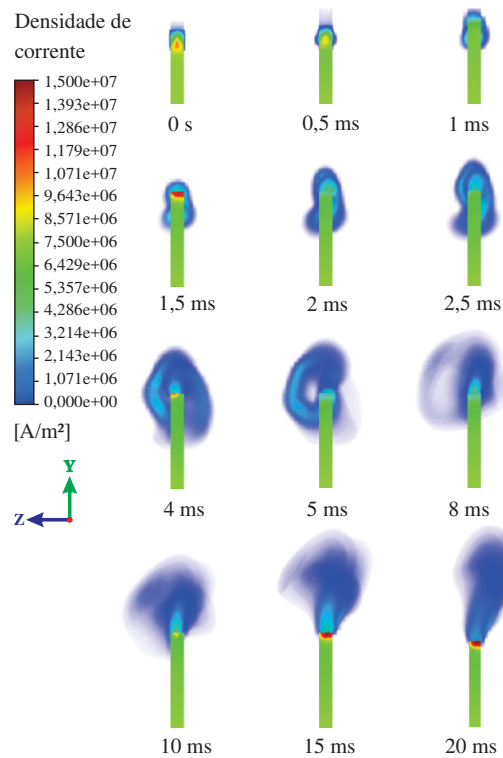


Figura 9: Distribuição de densidade de corrente (Plano Y-Z).

B. Análise da Temperatura

Uma das principais características do arco elétrico é a temperatura, que apresenta valores elevados devido, principalmente, à radiação fenômeno. A Fig. 10 apresenta a sua distribuição, vista através de um corte do plano X-Y.

A temperatura do ar eleva-se rapidamente a cerca de 16.000 K em menos de $0,1 \text{ ms}$, como pode ser observado na Fig. 11, e varia em torno de 12.000 K e 16.000 K ao longo do tempo. Além disso, observa-se na Fig. 10 que um grande volume de ar é aquecido pelo arco elétrico, alcançando temperaturas médias de 5.000 K a 10.000 K .

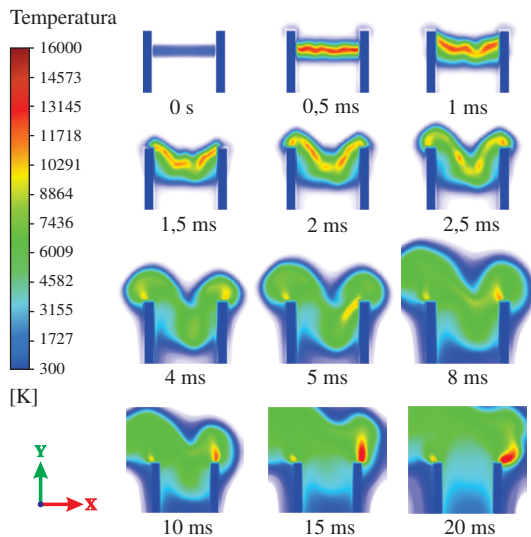


Figura 10: Distribuição de temperatura (Plano X-Y).

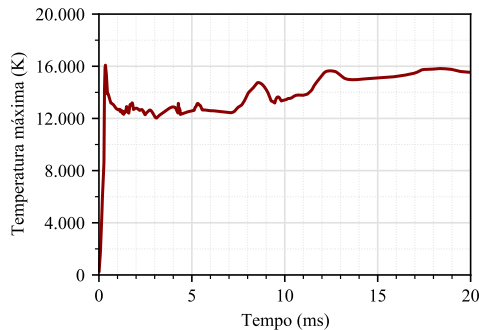


Figura 11: Temperatura máxima do ar ao longo do tempo.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia de simulação de arcos elétricos em corrente contínua utilizando a teoria MHD, através dos *softwares* Ansys®, a qual permite a análise do arco elétrico como um fluido condutor de eletricidade na presença de campos eletromagnéticos, tornando possível observar as propriedades macroscópicas desse fenômeno. Para a implementação dessa modelagem foi necessário a realização do acoplamento entre o Ansys Fluent® e o Ansys Maxwell®, a fim de obter o comportamento dinâmico do fenômeno ao longo do tempo. A metodologia abordada não atende os casos de corrente alternada, sendo necessário o ajuste das entradas de ambos os *softwares*, o que será implementado em trabalhos futuros.

A metodologia parte da definição do canal onde ocorre a descarga inicial, uma vez que a teoria MHD não considera as interações microscópicas que provocam o surgimento do arco. A partir disso, o método calcula as interações provocadas pelos campos eletromagnéticos, bem como a variação das propriedades do ar em função do aumento da temperatura ocasionado, na maior parte, pela radiação emitida pelo fenômeno. Dessa forma é possível identificar o estabelecimento e a expansão do arco elétrico ao longo do tempo, visualizando o

deslocamento que o mesmo sofre devido às ações dos campos eletromagnéticos produzidos por ele.

A partir da implementação realizada nesse trabalho, torna-se possível a variação de diversos parâmetros a fim de buscar resultados em qualquer situação. Por exemplo, variar as geometrias, buscando reproduzir o arco elétrico em diferentes tipos de equipamentos; variar as propriedades do ar, agregando características conforme determinada região geográfica, a fim de buscar resultados mais fiéis àquele ambiente; comparar modelos de radiação e viscosidade; entre outras situações que, na prática, não seria viável preparar um experimento para reproduzir cada uma delas, tornando esse tipo de simulação indispensável no desenvolvimento de estudos acerca desse fenômeno. Além disso, a possibilidade de simular inúmeros cenários permite a realização de diversos estudos como, por exemplo, projetos relacionados ao desenvolvimento de equipamentos de proteção individual visando a segurança dos trabalhadores diante dos perigos dos arcos elétricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia pelo projeto “Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro” (desenvolvido no âmbito do programa de P&D/ANEEL PD-00063-3069/2020). Este estudo foi realizado também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Mačák, P. Vyroubal, and J. Maxa, “Magnetohydrodynamic model of electric arc during contact opening,” *Advances in Military Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 347–361, 2019.
- [2] M. Lang, T. Neal, and R. Wilkins, “Introduction to arc flash,” in *8th International Conference on Electric Fuses and their Applications*. Clermont-Ferrand: IEEE, 2007, pp. 179–184.
- [3] B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet, P. Freton, and A. Gleizes, “Advances in low-voltage circuit breaker modelling,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, no. 4, pp. 595–609, 2004.
- [4] M. Lisnyak, “Theoretical, numerical and experimental study of DC and AC electric arcs: Modeling and experimental investigations of default arcs propagating along the electric bus-bars for aeronautical applications,” Ph.D. dissertation, Université Orléans, 2018.
- [5] A. I. Aio, “Modelization and analysis of the electric arc in low voltage circuit breakers,” Tese de Doutorado, Universidad del País Vasco, Leioa, 2013.
- [6] Nasa. (2020) The sun. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/sun>
- [7] A. Nilsson, “Pre-Study of Arc Extinguishing Techniques for a 4-Pole 1500 VDC Contactor,” Dissertação de Mestrado, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2014.
- [8] P. G. Slade, *Electrical Contacts: Principles and Applications*, 2nd ed. CRC Press, 2017.
- [9] M. Rong, M. Li, Y. Wu, F. Yang, Y. Wu, W. Liu, Y. Li, and Z. Chen, “3-D MHD Modeling of Internal Fault Arc in a Closed Container,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1220–1227, 2017.
- [10] ANSYS, “ANSYS Fluent Customization Manual,” p. 752, 2020.
- [11] IEEE, “IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations,” *IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002)*, pp. 1–134, 2018.
- [12] J. C. Bautista Cruz, “Characterization of Arc Extinction in Direct Current Residential Circuit Breakers,” Master’s Thesis, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, 2018.
- [13] ANSYS, “ANSYS Meshing User’s Guide,” p. 520, 2020.