

Cálculo dos parâmetros do arco elétrico em sistemas de corrente contínua utilizando teoria de identificação de sistemas *

Felipe P. Pessoa, Jhair S. Acosta, Maria C. Tavares *

* Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, SP, (e-mail: felipe.pretti@hotmail.com, jhairacosta@gmail.com, ctavares@unicamp.br).

Abstract: This paper presents a demonstration of the system identification theory applied to the black-box arc models parameters calculation, using the fundamental models of Cassie and Mayr. The purpose of this work is to verify the performance of these models in representing electromagnetic transients in direct current (DC) systems. It shows that black-box arc models can describe the relation between the arc and electrical circuit with good precision, representing a powerful tool for simulations.

Resumo: Este artigo apresenta uma aplicação da teoria de identificação de sistemas no cálculo dos parâmetros dos modelos de arco elétrico de Cassie e de Mayr. O objetivo deste trabalho é verificar a aplicação de modelos de arco elétrico conhecidos na literatura na representação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de corrente contínua (CC). Os modelos matemáticos do tipo caixa-preta descrevem com boa precisão a interação do arco elétrico com o circuito, sendo uma ferramenta de grande utilidade na simulação de circuitos elétricos.

Keywords: Black-box arc models; DC Circuit Breaker; DC Electric arc analysis; DC Short-circuit; System Identification.

Palavras-chaves: Modelos de arco tipo caixa-preta; Disjuntor CC; Análise de arco elétrico CC; Curto-Circuito CC; Identificação de Sistemas.

1. INTRODUÇÃO

Desenvolvimentos recentes em eletrônica de potência, conversores estáticos e fontes de energia renováveis levaram ao aumento significativo do uso de sistemas elétricos em corrente contínua (CC). Estes avanços permitiram realizar conversões de tensões que antes só era possível fazer em corrente alternada (CA) por meio de transformadores.

Importante ressaltar que as fontes distribuídas de energia renováveis possuem características inerentes de sistemas CC, como é o caso da energia fotovoltaica e também do elo CC utilizado para desacoplar as velocidades de rotação da rede CA em sistemas eólicos (Mackay, 2018). Além disso, a evolução das baterias para utilização em veículos elétricos, juntamente com aplicações já conhecidas em outros campos, como o transporte ferroviário de cargas e passageiros (Rojek and Sidorowicz, 2013), podem ser consideradas como motivações para ampliação dos sistemas de distribuição CC. Exemplos de aplicações em corrente contínua são mostrados na Figura 1.

No entanto, a interrupção de corrente apresenta alguns desafios, pois diferentemente dos sistemas CA, onde existe um cruzamento natural da corrente por zero, esta

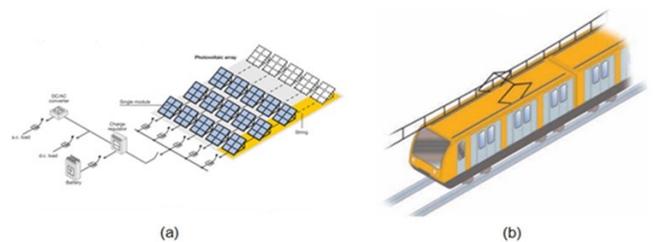


Figura 1. Aplicações em corrente contínua (a) sistema fotovoltaico e (b) sistema ferroviário (ABB SACE S.p.A, 2007).

característica é ausente em sistemas CC, tornando o processo de interrupção mais difícil e fazendo com que os disjuntores possuam dispositivos que forçam a corrente para zero antes da interrupção.

Em redes CC de baixa tensão, o principal mecanismo de interrupção utilizado por disjuntores são as câmaras de extinção. Durante o processo de abertura do disjuntor, o arco elétrico gerado pela separação dos contatos é direcionado para a câmara de extinção, onde acontece o alongamento e o resfriamento do arco.

Como será visto adiante, o arco elétrico desempenha um papel fundamental no processo de extinção de corrente, pois o aumento do seu comprimento permite alcançar níveis de tensões suficientes para criar uma taxa negativa

* Os autores agradecem o apoio financeiro das seguintes instituições: CAPES (no. 001), CNPq e FAPESP (nos. 2017/20010-1, 2015/26096-0 e 2019/16263-7).

de variação da corrente, que acarretará na eliminação da corrente de falta.

Embora o estudo deste fenômeno tenha se desenvolvido inicialmente para sistemas CA, contando com diversas contribuições, como os trabalhos feitos por Portela et al. (1992), Asencios (2009) e Câmara (2010), ainda existem poucos trabalhos desenvolvidos para sistemas CC.

O objetivo deste trabalho é verificar a aplicação dos principais modelos matemáticos de arco elétrico presentes na literatura técnica em sistemas CC, visando avaliar o nível de representatividade dos mesmos na simulação de transitórios eletromagnéticos causado por um evento de curto-circuito. Para isto, os parâmetros destes modelos serão estimados utilizando a teoria de identificação de sistemas, que é conhecida por suas aplicações em sistemas de controle.

2. INTERRUPÇÃO DE CORRENTE CC

A interrupção de corrente em sistemas CC apresenta um problema diferente de sistemas CA em relação ao fenômeno associado à extinção do arco elétrico em virtude dos altos valores de corrente. Para representar o processo de interrupção em CC, consideremos o circuito da Figura 2.

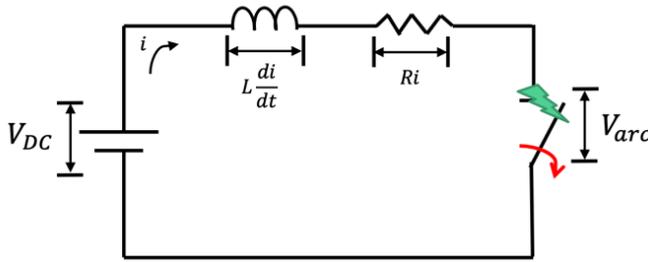


Figura 2. Circuito exemplo.

Para o circuito da Figura 2 podemos escrever a seguinte equação:

$$V_{DC} = L \frac{di}{dt} + Ri + V_{arc} \quad (1)$$

Reescrevendo (1):

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V_{DC} - Ri - V_{arc}) \quad (2)$$

Onde:

- V_{DC} Tensão da fonte de energia CC;
- L Indutância do circuito;
- i Corrente do circuito;
- R Resistência do circuito;
- V_{arc} Tensão do arco elétrico.

Portanto para obtermos uma redução da corrente de falta, a taxa de variação da corrente no tempo deve ser negativa:

$$\frac{di}{dt} < 0 \quad (3)$$

Logo:

$$V_{arc} > V_{DC} - Ri \quad (4)$$

Esta relação é verificada quando a tensão do arco elétrico é grande o suficiente de forma que o primeiro membro de (2) se torne negativo. Outro aspecto importante é que a taxa de variação da extinção da corrente é inversamente proporcional a indutância do circuito. Logo quanto maior for a indutância, maior será o tempo necessário para eliminação da corrente de falta.

Adicionalmente, é possível verificar que o tempo de extinção em corrente contínua tem uma relação direta com a constante de tempo do circuito ($\tau = \frac{L}{R}$), e que também depende das características do arco elétrico e da tensão da fonte (ABB SACE S.p.A, 2007).

3. CURVAS DE CURTO-CIRCUITO

De forma geral, as curvas de curto-circuito em sistemas CC apresentam um formato típico semelhante ao da Figura 3, que representa um registro de oscilografia de um teste realizado no ABB SACE Power Testing Laboratories.

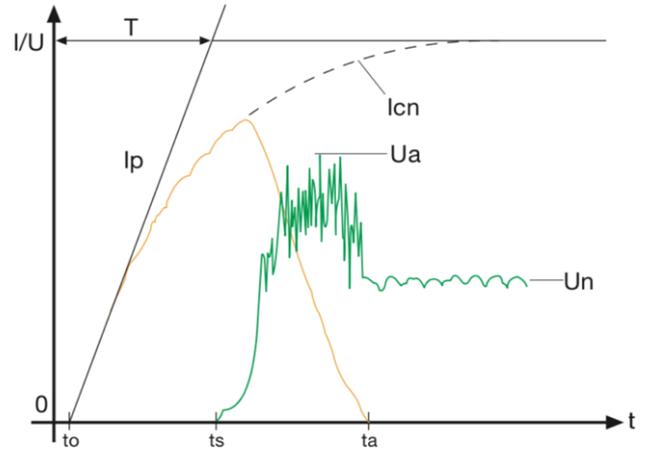


Figura 3. Curvas de curto-circuito CC (ABB SACE S.p.A, 2007).

Onde:

- I_p Corrente de curto-circuito;
- I_{cn} Corrente de curto-circuito esperada (se não houvesse extinção);
- U_a Tensão máxima do arco elétrico;
- U_n Tensão da fonte;
- T Constante de tempo da corrente de curto-circuito;
- t_0 Início do curto-circuito;
- t_s Início da separação dos contatos do disjuntor;
- t_a Extinção da corrente de falta.

Quando ocorre o curto-circuito no instante t_0 , a corrente (curva laranja) começa a aumentar de acordo com a resposta natural do circuito. Então, os contatos do disjuntor começam a abrir, dando início ao arco elétrico no instante t_s .

A corrente continua subindo por um instante de tempo após a separação dos contatos do disjuntor, até que ela começa a decrescer devido ao aumento cada vez maior da resistência do arco elétrico introduzida no circuito.

Como pode ser visto na Figura 3, a tensão do arco aumenta até um valor superior ao da fonte (curva verde), sendo que no tempo t_a , a corrente de curto-circuito é completamente extinta.

4. O ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico é um fenômeno complexo causado por diversas interações físicas que acontecem durante a sua formação, existência e interrupção, sendo caracterizado por ser um fenômeno rápido. Ele desempenha um papel fundamental em dispositivos de proteção no processo de interrupção de correntes.

Fisicamente o arco elétrico pode ser definido como um canal de plasma que se forma após uma descarga de gás em um meio isolante (Van der Sluis, 2001). Quando os contatos dos disjuntores iniciam o processo de separação, a energia armazenada nas indutâncias do sistema de potência impede que o fluxo de corrente seja interrompido instantaneamente, forçando a passagem da corrente pelos contatos. Estes contatos possuem uma área superficial reduzida, e à medida que se afastam, cria-se uma densidade de corrente elevada, fazendo com que o material dos contatos comece a derreter. A energia liberada por este processo causa a ionização do meio, dando origem a uma descarga no meio dielétrico, seja ele ar, óleo ou gás, como o Hexafluoreto de Enxofre (SF6).

O estado de plasma é alcançado com o aumento da temperatura, que fornece energia suficiente para que as moléculas se dissociem em átomos; e se a energia for suficientemente elevada, os elétrons presentes nos átomos se separam e ficam livres, gerando íons positivos (Figura 4).

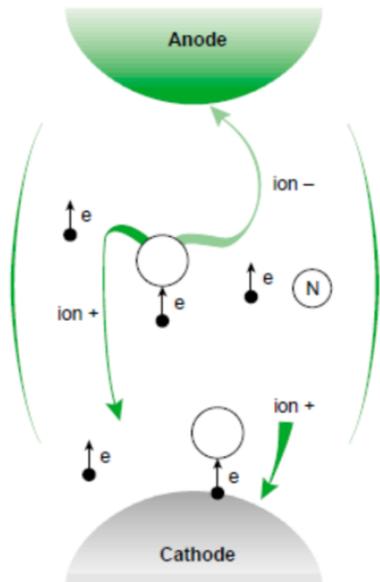


Figura 4. Arco elétrico em meio gasoso (Théoleyre, 1999).

De forma geral, o arco elétrico pode ser dividido em três regiões - a coluna central, a região do cátodo e a região do anodo, conforme mostrado na Figura 5. A figura também

mostra a distribuição típica de potencial ao longo do arco entre os contatos do disjuntor. Não existem espaços carregados na região central, e a corrente é mantida pelos elétrons, sendo que existe um balanço entre os elétrons e os íons positivos. Dependendo do meio dielétrico e da configuração da câmara de extinção do disjuntor, a temperatura na coluna do arco pode atingir picos entre 7000 e 25.000 K (Martinez-Velasco, 2017).

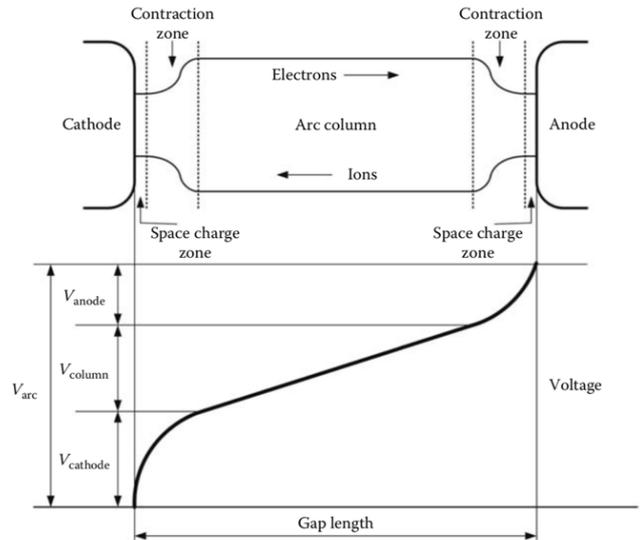


Figura 5. Estrutura do arco elétrico (Martinez-Velasco, 2017).

5. MODELOS DE ARCO ELÉTRICO

Como pode ser visto anteriormente, o arco elétrico é o principal elemento no processo de extinção da corrente de curto-circuito em sistemas CC. Os modelos matemáticos para representação do arco são normalmente divididos nas seguintes categorias (Cigré Working Group 13.01, 1998):

- Modelos Físicos
- Modelos Tipo Caixa-Preta
- Modelos Empíricos

Modelos Físicos são os modelos mais complexos, uma vez que a descrição do arco é baseada em equações dinâmicas de fluido e pelas leis da termodinâmica, em combinação com as equações de Maxwell. Estes modelos são baseados nas equações de conservação de massa, e da quantidade de movimento e energia. Normalmente são utilizados por fabricantes no projeto de novos disjuntores visando reduzir custos com protótipos.

Modelos Tipo Caixa-Preta descrevem o arco elétrico por meio de equações diferenciais. São modelos matemáticos baseados em considerações físicas que estabelecem a relação entre a condutância do arco elétrico com parâmetros elétricos como tensão e corrente.

Embora estes modelos não sejam adequados para projeto de disjuntores, eles são muito importantes nas simulações de circuitos elétricos, onde descrevem com boa precisão a interação do arco elétrico com o circuito.

Os modelos mais conhecidos nesta categoria são os modelos de Cassie (1939) e de Mayr (1943), sendo desenvolvidos outros modelos a partir destes.

Modelos Empíricos utilizam diagramas e fórmulas que descrevem a dependência de parâmetros e suas leis de crescimento para casos específicos, tais como curvas-limite para falta quilométrica, comportamento da corrente de chopping com a capacitância paralela, e outros. Estes modelos derivam de testes ou de cálculos e simulações utilizando os outros modelos.

A seguir serão detalhados os modelos de Cassie e Mayr, que são os principais modelos do tipo caixa-preta encontrados na literatura técnica. O foco destes modelo está na representação do fenômeno do arco elétrico por meio de variáveis de circuito durante o processo de interrupção de corrente, sem entrar no detalhamento físico do processo.

5.1 MODELO DE ARCO DE CASSIE

O primeiro modelo de arco elétrico utilizando equações diferenciais, proposto por A.M. Cassie em 1939, descreve o comportamento do arco elétrico por meio da mudança de sua condutividade em função das variações do fluxo de calor. O modelo de Cassie adota as seguintes premissas (Júnior, 2003):

- Temperatura constante na direção radial;
- Resfriamento por convecção na direção axial; e
- Área da seção transversal do arco variável.

A equação de Cassie é mostrada abaixo:

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{u_0^2} - 1 \right) \quad (5)$$

Onde:

g_c	condutância do arco de Cassie [S]
τ_c	constante de tempo do arco [s]
u	tensão do arco elétrico [V]
u_0	tensão constante do arco em equilíbrio [V]

Como o modelo de Cassie supõe que as perdas ocorrem principalmente por convecção térmica durante o intervalo de tempo em que a corrente tem amplitude elevada, este modelo não é adequado para baixas correntes.

5.2 MODELO DE ARCO DE MAYR

O. Mayr desenvolveu em 1943 um modelo matemático baseado em equações diferenciais, porém com premissas diferentes de Cassie (Júnior, 2003):

- Área da seção transversal do arco constante;
- Perdas de calor por condução no sentido axial; e
- Potência retirada do arco constante.

A equação de Mayr é mostrada a seguir:

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (6)$$

Onde:

g_m	condutância do arco de Mayr [S]
τ_m	constante de tempo do arco [s]
u	tensão do arco elétrico [V]
i	corrente do arco elétrico [A]
P_0	potência de resfriamento do arco [W]

O modelo proposto por Mayr admite que a perda por calor ocorre por condução térmica no sentido radial, com a condutância do arco variando exponencialmente com a energia armazenada. Devido às premissas adotadas por Mayr, este modelo se mostrou mais adequado para correntes baixas (próximas de zero).

6. IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

O cálculo dos parâmetros do arco será realizado utilizando a teoria de identificação de sistemas. A metodologia consiste na construção de um modelo matemático que represente um sistema dinâmico através das medidas dos sinais de entrada e saída do sistema. A aplicação deste conceito na modelagem do arco elétrico foi proposta em Rodríguez-Medina et al. (2003).

Dado um conjunto N de medidas de dados de entrada e saída, que pode ser escrito da seguinte forma:

$$Z^N = [y^N, u^N], \quad (7)$$

$$y^N = [y(1), y(2), \dots, y(N)]^T \quad (8)$$

$$u^N = [u(1), u(2), \dots, u(N)]^T \quad (9)$$

onde $u(t)$ e $y(t)$ representam os sinais de entrada e de saída do sistema, respectivamente. Estes dados são ajustados ao modelo do arco elétrico.

O modelo a ser ajustado possui a seguinte característica:

$$\hat{y}(t, \theta) = g(t, \theta) \quad (10)$$

onde $\hat{y}(t, \theta)$ representa a estimativa do modelo para $y(t)$, utilizando o vetor de parâmetros θ a ser estimado. A definição dos parâmetros de θ normalmente é feita por meio da solução de um problema de otimização, com objetivo de minimizar uma função custo que representa o erro entre a saída do modelo e a saída medida.

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} V_N(\theta, Z^N) \quad (11)$$

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N l(\epsilon(t, \theta)) \quad (12)$$

$$\epsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t, \theta) \quad (13)$$

A equação (12) representa a função custo a ser minimizada, onde $\epsilon(t, \theta)$ é o erro e o operador $l(\cdot)$ representa a norma do erro, podendo ser utilizada neste caso a norma simples ou a norma quadrada. A Figura 6 mostra um exemplo da metodologia de identificação de sistemas para um sistema de uma entrada e uma saída.

A função custo pode ser implementada utilizando a norma simples ou quadrada. A utilização da norma quadrada resulta em um problema de otimização usando mínimos quadrados. Como os modelos de arco elétrico são modelos

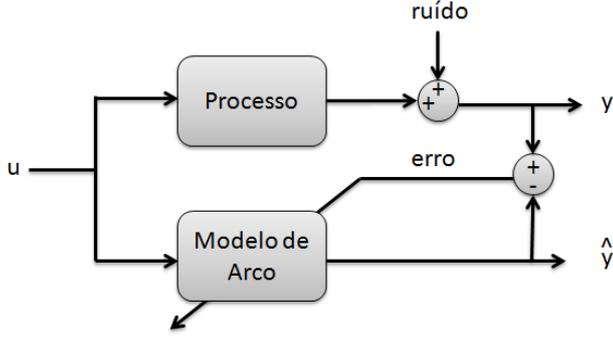


Figura 6. Metodologia de identificação de sistemas (Rodríguez-Medina et al., 2003).

não lineares, trata-se de um problema de otimização não linear usando mínimos quadrados.

Para resolução do problema de otimização, vários métodos podem ser empregados, tais como o método iterativo de Gauss-Newton, método do Gradiente, método de Levenberq-Marquardt ou algum outro.

Uma alternativa interessante para aplicação desta metodologia é a utilização da ferramenta de identificação de sistemas do Matlab (Ljung, 2020), onde é possível testar vários métodos de otimização de forma rápida e prática.

7. FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

A ferramenta de identificação de sistemas do Matlab disponibiliza várias formas para representação do problema, tais como função de transferência, espaço de estados, dentre outras.

A estrutura de um modelo de processo é definida como uma função de transferência contínua no tempo que pode ser escrita da seguinte forma:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_p} e^{-sT_d} \quad (14)$$

Onde:

- K_p ganho estático do sistema
- T_p constante de tempo do sistema
- T_d atraso do sistema

A representação dos modelos de Cassie e de Mayr na forma de função de transferência é mostrada a seguir:

7.1 Modelo de Cassie

Utilizando a lei de Ohm e fazendo um rearranjo matemático na equação do modelo de Cassie (5), podemos reescrevê-la da seguinte forma:

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u \cdot i}{u_0^2} - g_c \right) \quad (15)$$

Substituindo-se o produto entre a tensão e a corrente do arco pela potência ($w = u \cdot i$) e aplicando a transformada

de Laplace dos dois lados da igualdade, chega-se a seguinte função de transferência:

$$H_c(s) = \frac{G_c(s)}{W(s)} = \frac{\frac{1}{u_0^2}}{1 + \tau_c s} \quad (16)$$

onde $H_c(s)$ representa a função de transferência do modelo de Cassie, que relaciona a transformada de Laplace da condutância do arco $G_c(s)$ (saída) com a transformada de Laplace da potência do arco $W(s)$ (entrada).

7.2 Modelo de Mayr

Realizando o mesmo procedimento feito anteriormente para o modelo de Mayr, temos a seguinte função de transferência:

$$H_m(s) = \frac{G_m(s)}{I^2(s)} = \frac{\frac{1}{P_0}}{1 + \tau_m s} \quad (17)$$

onde $G_m(s)$ e $I^2(s)$ representam a transformada de Laplace da condutância do arco de Mayr (saída) e da corrente de arco ao quadrado (entrada), respectivamente.

Comparando a estrutura de modelo de processo mostrada em (14) com as funções de transferência de Cassie e de Mayr, é possível identificar o ganho estático e a constante de tempo dos modelos, conforme tabela abaixo:

Tabela 1. Relação entre os parâmetros

Modelo	K_p	T_p	T_d
Cassie	$\frac{1}{u_0^2}$	τ_c	0
Mayr	$\frac{1}{P_0}$	τ_m	0

8. EXPERIMENTO DE REFERÊNCIA

A curva de curto-circuito de referência foi obtida do trabalho de Rojek and Skrzyniarz (2019), que apresenta os resultados do teste de curto-circuito realizados em disjuntores utilizados em sistemas de tração ferroviária (Figura 7).

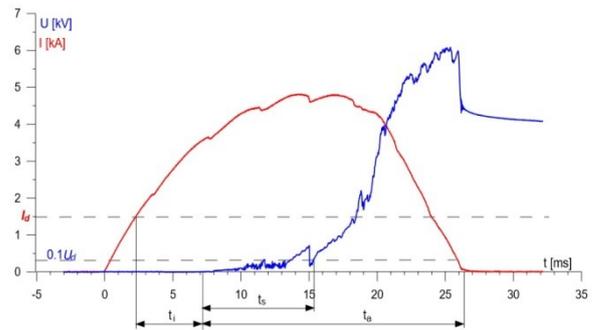


Figura 7. Experimento de referência (Rojek and Skrzyniarz, 2019).

Os testes foram realizados em um sistema alimentado por um retificador não controlado de 6 pulsos. Os valores das resistências e indutâncias do circuito foram ajustados de forma a obter um valor semelhante de constante de tempo em cada teste. Isto significa que um aumento da corrente

de curto-circuito sustentada (I_{ss}) também acarreta em um aumento da inclinação da corrente (di/dt). O disjuntor foi configurado para uma corrente de curto de $I_d = 1500 A$, e a tensão nominal média aplicada ao disjuntor foi de 3,6 kV (Rojek, 2015).

9. RESULTADOS

Os parâmetros dos modelos de Cassie e de Mayr foram otimizados utilizando a ferramenta de identificação de sistemas do Matlab. Os valores encontrados estão resumidos na Tabela 2, e as curvas de condutância dos modelos são mostradas nas Figura 8 e Figura 9.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos

Modelo de Arco	τ [ms]	U_0 [V]	P_0 [MW]	Fit[%]
Cassie	1,60	8500	-	75,53
Mayr	1,10	-	22,0	75,56

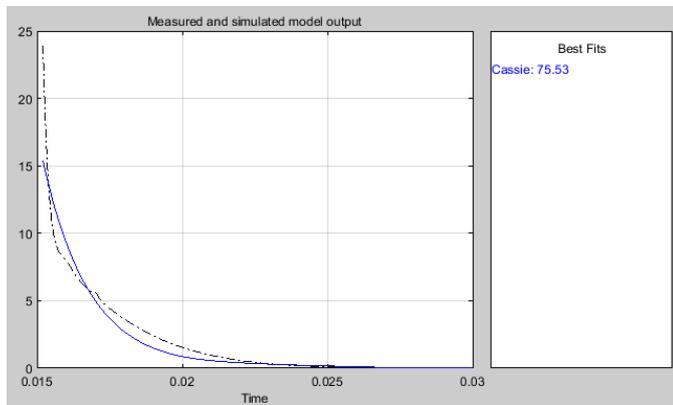


Figura 8. Condutância medida (linha tracejada) e estimada (linha contínua) com modelo de Cassie.

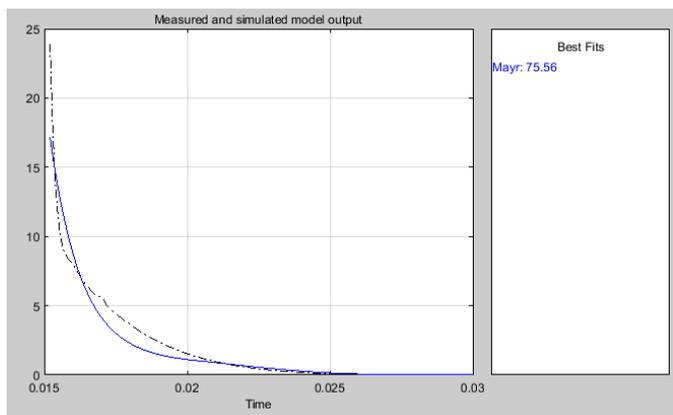


Figura 9. Condutância medida (linha tracejada) e estimada (linha contínua) com modelo de Mayr.

As curvas de curto-circuito dos modelos de Cassie e Mayr foram obtidas por meio de simulação. Para esta etapa foi utilizado o software Simulink do Matlab. Os modelos de arco elétrico utilizados podem ser encontrados na biblioteca *Arc Model Blockset* (Schavemaker and Van Der Sluis, 2002).

Os valores de resistência e indutância do circuito foram ajustados de forma que a corrente de curto-circuito

apresentasse a mesma constante de tempo e valor de pico esperado que as curvas de referência.

As curvas de corrente e tensão de arco elétrico obtidas por simulação são mostradas nas Figura 10 e Figura 11.

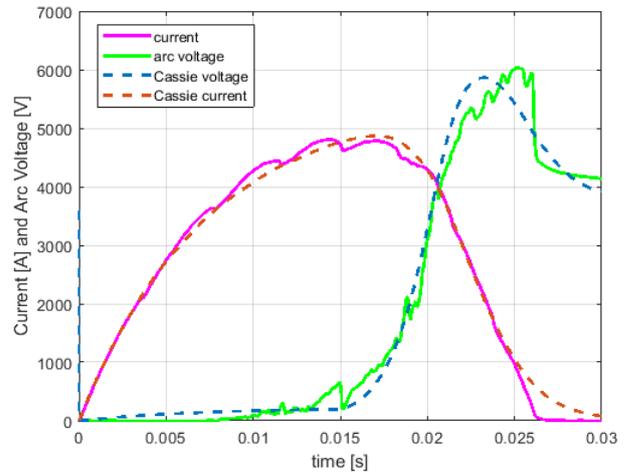


Figura 10. Curvas de curto-circuito simuladas com modelo de Cassie.

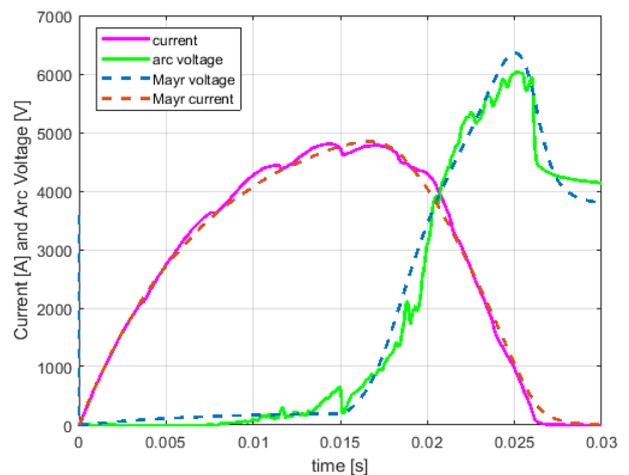


Figura 11. Curvas de curto-circuito simuladas com modelo de Mayr.

Conforme mostrado nas Figura 8 e Figura 9, a condutância calculada pelos modelos consegue alcançar uma correspondência de aproximadamente 75% em relação aos valores medidos, considerando a medida de desempenho do aplicativo de identificação de sistemas do Matlab¹. Esta limitação pode ser explicada pela complexidade dos modelos de arco elétrico, tendo em vista que eles são descritos por equações diferenciais de primeira ordem, e com apenas duas constantes de ajuste. Porém, mesmo se tratando de modelos de primeira ordem, as curvas de tensão e corrente de arco obtidas por meio de simulações apresentam alta correlação com os valores medidos. Um exemplo disto é a curva de tensão,

¹ A medida de desempenho utilizada pelo software *System Identification Tool* é o complemento da raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE)

que possui uma correlação em torno de 96% para os modelos calculados (Tabela 3), levando em consideração o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 3. Coeficiente de determinação da tensão de arco

Modelo de Arco	R^2 (tensão)
Cassie	96,40%
Mayr	95,90%

10. CONCLUSÃO

Este trabalho mostra a aplicação dos principais modelos de arco elétrico na representação de curto-circuito em sistemas de corrente contínua. Para o experimento apresentado, tanto o modelo de Cassie quanto o modelo de Mayr descrevem de maneira satisfatória a interação do arco elétrico com o circuito, atingindo uma performance de aproximadamente 75% pela ferramenta de identificação de sistemas, tendo como referência o sinal de condutância, além de uma correlação em torno de 96% para o sinal de tensão do arco elétrico obtido pelo circuito simulado (considerando o coeficiente de determinação). A correlação elevada no caso da tensão do arco permite afirmar que é possível representar com boa precisão o nível de sobretensão causado pela atuação do disjuntor em redes CC. Por esta razão, os modelos do tipo caixa-preta são uma poderosa ferramenta para estudo de transitórios.

Adicionalmente, estes modelos de arco possuem implementação computacional relativamente simples comparada aos modelos físicos, sendo que alguns softwares já possuem bibliotecas desenvolvidas como no caso do Matlab.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Artur Rojek por suas contribuições feitas em pesquisas com disjuntores de corrente contínua aplicados em sistemas ferroviários, que serviu de base e forneceu os dados de referência para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABB SACE S.p.A (2007). ABB Low Voltage Circuit-Breakers for Direct Current Applications.
- Asencios, O.W.G. (2009). *Identificação dos parâmetros do arco elétrico através da estimação de estados e parâmetros*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Câmara, A.d.S.B. (2010). *Modelagem de arco elétrico no ar. Aplicações em sistemas de potência*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ.
- Cassie, A.M. (1939). Arc rupture and circuit severity: a new theory. *CIGRE report*.
- Cigré Working Group 13.01 (1998). State of the art of circuit-breaker modelling.
- Júnior, L.C.Z. (2003). *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. EdUSP.
- Ljung, L. (2020). *System identification toolbox: User's guide*. Citeseer.
- Mackay, L. (2018). *Steps towards the universal direct current distribution system*. Tese de doutorado, Delft University of Technology.
- Martinez-Velasco, J.A. (2017). *Power system transients: parameter determination*. CRC press.
- Mayr, O. (1943). Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens. *Archiv für Elektrotechnik*, 37(12), 588–608.
- Portela, C.M., Santiago, N.H.C., Oliveira, O.B., and Dupont, C.J. (1992). Modeling of arc extinction in air insulation. *IEEE transactions on electrical insulation*, 27(3), 457–563.
- Rodríguez-Medina, B., Orama-Exclusa, L., and Vélez-Reyes, M. (2003). Arc model parameter extraction techniques using nonlinear least squares. *Proceedings of the 35th North American Power Symposium*.
- Rojek, A. (2015). Switching-off time of electromagnetic blow-out high-speed dc circuit breaker. *Railway Reports*, 169, 53–60.
- Rojek, A. and Sidorowicz, M. (2013). Researches and tests of high-speed circuit breakers for rolling stock and substations in 3 kv dc traction power system. *Problemy Kolejnictwa*.
- Rojek, A. and Skrzyniarz, M. (2019). Contact arc time—important parameter of dc high-speed circuit-breakers. In *MATEC Web of Conferences*, volume 294, 05002. EDP Sciences.
- Schavemaker, P. and Van Der Sluis, L. (2002). The arc model blockset. In *Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS, Crete*.
- Théoleyre, S. (1999). Cahier technique no. 193: Mv breaking techniques. *sl: Schneider Electric*.
- Van der Sluis, L. (2001). *Transients in power systems*. John Wiley & Sons Ltd.