



Evento: XXVI Jornada de Pesquisa

MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CABOS DE REDE ELÉTRICA SUBTERRÂNEA EM MÉDIA TENSÃO¹

MODELING OF PARTIAL DISCHARGE IN MEDIUM VOLTAGE UNDERGROUND ELECTRICAL NETWORK CABLES

**Abilio da Silva Lima², Gustavo Eckhardt³, Airam Teresa Z. R. Sausen⁴,
Paulo Sérgio Sausen⁵, Maurício de Campos⁶**

¹ Projeto em parceria entre a Unijuí (GAIC) e a CEEE-D para Pesquisa e Desenvolvimento de Sistema de Descoberta de Conhecimento para Apoio a Tomada de Decisões Aplicado ao Controle de Operações do Sistema Duplo Radial Subterrâneo de Média Tensão.

² Bolsista; Aluno do curso de pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional; Líder de redes subterrâneas da CEEE-D.

³ Bolsista PROFAP/CEEE, aluno do curso de Engenharia Elétrica da Unijuí, gustavo.eckhardt@sou.unijui.edu.br

⁴ Professora, Doutora e Pesquisadora na Unijuí, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS

⁵ Professor, Doutor e Pesquisador na Unijuí, Bolsista produtividade CNPq DT 2, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS

⁶ Professor, Doutor e Pesquisador na Unijuí, Bolsista produtividade CNPq DT 2, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS

RESUMO

Para as redes de distribuição de energia elétrica em sistemas subterrâneos as falhas na isolação dos componentes da rede são as principais causas de interrupção no fornecimento. Métodos de diagnóstico do estado de degradação dos materiais isolantes dessas redes se tornam fundamentais para aumentar a confiabilidade desses sistemas. Para cabos e componentes isolados, os principais fenômenos vinculados à degradação dessas camadas isolantes são as descargas parciais e as arborescências. Identificar o início da ocorrência de descargas parciais é essencial para realizar um diagnóstico assertivo e eficaz do estado de deterioração da isolação. Nesse ponto, simular a ocorrência desses fenômenos nas redes subterrâneas é necessário para estudá-los e buscar diagnosticar o estado da isolação. Para tornar possível a realização dessas simulações, esse trabalho propõe um modelo matemático que representa as descargas parciais. Na sequência o trabalho sugere a sua implementação de forma a reproduzir com fidelidade os efeitos dessas faltas em simulação de circuitos de distribuição de energia.

Palavras-chave: Descargas parciais. Redes subterrâneas. Cabos isolados.

ABSTRACT

For electricity distribution networks in underground systems, failures in the insulation of network components are the main causes of interruption in supply. Methods for diagnosing the state of degradation of insulating materials in these networks are essential to increase the reliability of these systems. For insulated cables and components, the main phenomena linked to the degradation of these insulating layers are partial discharges and arborescence. Identifying the beginning of the occurrence of partial discharges is essential to make an assertive and



effective diagnosis of the deterioration state of the insulation. At this point, simulating the occurrence of these phenomena in underground networks is necessary to study them and seek to diagnose the state of insulation. To make these simulations possible, this work proposes a mathematical model that represents the partial discharges. Next, the work suggests its implementation in order to faithfully reproduce the effects of these faults in simulation of power distribution circuits.

Keywords: Partial discharges. Underground Network. Insulated cables.

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos pilares da nossa vida e da sociedade nos dias de hoje. A energia elétrica está presente nas residências, nas instalações comerciais, nas escolas, nos transportes e em diversas atividades de lazer. No entanto, apesar de sua importância, a maior parte das pessoas só dá valor à energia elétrica em momentos em que ela não está disponível. A energia elétrica chega às unidades consumidoras através do sistema de distribuição de energia. Segundo Delea et al. (2011), o sistema de distribuição é a parte do sistema de potência que tem o maior impacto no nível de confiabilidade experimentada pelo consumidor.

Nesse sentido, a confiabilidade no sistema elétrico, devido a sua importância, é abordada por órgãos reguladores que definem as diretrizes para o sistema elétrico. Segundo Delea et al. (2011), nos Estados Unidos da América (EUA) as primeiras regulações no sentido de garantir a confiabilidade do sistema datam de 2005, através da *North American Electric Reliability Corporation* (NERC), com a aprovação do legislativo federal. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a responsável por regular a confiabilidade do fornecimento de energia desde a sua criação em 1997 (ANEEL, 2003). Ela faz isso por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, PRODIST (ANEEL, 2021).

O sistema de distribuição é uma das quatro áreas do sistema elétrico de potência (SEP). Essas quatro áreas são o sistema de geração, de transmissão, de distribuição e de utilização (consumidores). No caso das redes de distribuição, elas ainda podem ser compostas por circuitos alimentadores primários de média tensão (entre 2,3 kV a 44 kV) e secundários de baixa tensão (entre 110 V e 440 V).

Segundo Tleis (2019), todos os sistemas elétricos estão suscetíveis a falhas. Uma falha se caracteriza por uma condição anormal na operação de algum tipo de equipamento ou material em tensão primária do sistema de potência. No caso do sistema de distribuição, as falhas mais



comuns são a ocorrência de curto-circuito, queima de transformadores e falhas em conexões que ligam condutores entre si ou aos demais componentes da rede.

Ainda de acordo com Tleis (2019), basicamente existem dois tipos de falhas que podem ocorrer em um sistema de potência: falha por interrupção da corrente ou falha no isolamento. As falhas por interrupção da corrente ocorrem pelo rompimento de alguma conexão ou material e é conhecida como circuito aberto, do inglês *open circuit*. Já as falhas no isolamento resultam em curto-circuito e podem ocorrer como resultado da degradação pelo tempo, por um súbito aumento de tensão ou ainda por estresse. Essas falhas são chamadas de faltas, do inglês *fault*. Nas faltas, os curtos-circuitos podem ocorrer entre uma fase para a terra, fase-fase, duas fases com o terra, trifásico e ainda trifásico com o terra. Apenas o curto-circuito que afeta as três fases de um sistema produz uma falta simétrica. Todos os demais tipos de curto-circuito produzem efeitos assimétricos em cada uma das fases do sistema.

Os sistemas de distribuição por sua vez, podem ser divididos entre sistemas de redes aéreas ou em sistemas de redes subterrâneas. Os sistemas de redes subterrâneas são altamente confiáveis e não afetados pelo clima, porém, para entregar esses benefícios, ele tem custos de construção e manutenção mais elevados do que os sistemas de redes aéreas (DELEA et al., 2011). Os componentes dessas redes subterrâneas, especialmente os cabos, mesmo sendo confiáveis, sofrem degradação ao longo do tempo devido a vários fatores de estresse, tais como, os ambientais, os elétricos e os mecânicos. A deterioração do isolamento e a degradação gradual dão origem a falhas incipientes que podem estar nos estágios iniciais, mas podem levar a falhas catastróficas ao longo do tempo (MOUSAVI et al., 2010).

Os fenômenos típicos de degradação são as descargas parciais e as arborescências. A arborescência ocorre na forma de árvores elétricas e árvores de água e levam às faltas. O fenômeno de arborescências nas isolações deve-se à descarga parcial resultante de alto estresse elétrico ou da presença de umidade sob estresse elétrico. O processo de conversão de uma árvore de água em uma árvore elétrica por meio de uma descarga parcial local pode acontecer em várias taxas, incluindo a regressão temporária do processo de degradação devido à evaporação da umidade. Componentes de alta frequência estão presentes na corrente durante o processo de descarga parcial. O espectro de frequência deste processo está abaixo de kHz e a natureza de tais picos de corrente é aleatória (JANNATI et al., 2019).



A detecção dessas falhas em um estágio inicial ajuda a evitar interrupções inesperadas e subsequente perda de receitas, transtorno por falta de energia aos consumidores, além de multas por transgressões dos indicadores de continuidade de fornecimento de energia elétrica pelas agências reguladoras. Além disso, a localização das falhas em redes subterrâneas após a ocorrência de uma falta é um processo demorado e que necessita de utilização de métodos ativos os quais são normalmente destrutivos. No entanto, segundo Mousavi et al. (2010), a detecção de falhas na fase incipiente é uma tarefa desafiadora, mas não impossível. Certas classes de falhas e falhas de equipamento, exibem indícios antes de seu início que podem ser utilizados para fins de detecção.

Existem atualmente alguns métodos de diagnóstico das condições do envelhecimento da rede subterrânea. Embora conceitualmente diferentes, eles podem ser categorizados em métodos ativos ou passivos e métodos online ou offline. Os métodos ativos são aqueles que necessitam de injeção externa de sinais no sistema e a partir destes são obtidos o diagnóstico. Muitas vezes os métodos ativos são destrutivos, implicando na possibilidade de danificar a isolamento nos pontos onde ainda não houve uma falha. Já os métodos passivos são os que não fazem uso de injeção de sinais e utilizam técnicas de identificação de “assinaturas” de faltas. Os métodos offline são todos aqueles que são realizados com a rede desenergizada de suas fontes primárias de energia. Por fim, os métodos online são os que fazem o diagnóstico sem a necessidade da interrupção do fornecimento de energia. Nesse sentido, os métodos passivos e online são preferidos a métodos ativos e offline, por não provocarem à priori mais danos à rede e por serem realizados sem interrupção do fornecimento de energia (MOUSAVI, 2005).

Nesse sentido, diversos métodos menos destrutivos foram desenvolvidos, para poder avaliar o envelhecimento das redes elétricas subterrâneas, como os de Mousavi et al. (2009), Kulkarni et al. (2014) e Jannati et al. (2019). Essas pesquisas tiveram início em um grupo da Texas A&M University. *Esse* grupo se utilizou de dados coletados em alimentadores de média tensão para validar os modelos desenvolvidos por eles para identificação de padrões de descargas parciais e assim poder avaliar o envelhecimento dos cabos, seus componentes e isolações (MOUSAVI et al. 2009). Outro estudo, da University of Texas em Austin, desenvolveu algoritmos que buscam localizar os locais das falhas nos cabos baseando-se no monitoramento de tensão e corrente do momento anterior ao momento da falha (KULKARNI et al., 2014). Além destes se destaca o estudo da University of Shahreza, no Irã, que utiliza uma



estratégia de monitoramento em duas etapas baseada nos algoritmos CU-SUM e ADALINE e propõe detectar falhas incipientes em cabos subterrâneos (JANNATI et al., 2019).

Além dos citados acima, outros estudos que também buscam contribuir com novos conhecimentos acerca da identificação de falhas incipientes em cabos isolados de redes de média tensão subterrâneos a partir de métodos online e passivos, são os de Faisal et al. (2012), Dong et al. (2014), Kulkarni et al. (2014), Bretas et al. (2017). Porém, o tema ainda permanece sem uma solução definitiva para esse modelo de diagnóstico.

Como mencionado, os estudos citados, são de grande importância para o sistema de distribuição de energia elétrica subterrâneo, visto que eles buscam identificar as possíveis falhas antes que elas venham a ocorrer no sistema, podendo reduzir a ocorrência de falta de energia para os consumidores. Nesse ponto, a identificação da descarga parcial existente no sistema logo no início é fundamental para que o diagnóstico de degradação da rede seja realizado o mais rápido possível e os reparos executados sem prejuízos maiores.

Para estudar, propor e avaliar técnicas de identificação de descargas parciais é fundamental que sejam realizadas simulações, onde o comportamento mais acurado possível das descargas parciais é desejável. Portanto é fundamental para essas simulações que esse fenômeno da descarga parcial seja modelado e incluído nessas simulações.

OBJETIVO

O presente estudo tem por objetivo desenvolver a modelagem matemática do fenômeno das descargas parciais, que ocorrem por conta de uma falha incipiente da isolação do cabo elétrico de média tensão. Para isso foram utilizados os sinais de descarga parcial adquiridos e apresentados no artigo de Mousavi et al. (2009). Para obter esses sinais de descarga parcial o autor realizou além de experimentos controlados, uma análise de um conjunto de dados adquiridos em um circuito alimentador de média tensão subterrâneo, composto por cabo isolado em polietileno reticulado (XLPE) de uma região residencial. Tal alimentador trabalha na tensão de 7200 V e fornece energia a transformadores de 7200 V / 120 V em uma frequência de 60 Hz.

Após a coleta dos sinais, o autor aplica os dados obtidos em um sistema para identificação dos padrões e classificação dos dados. O sistema consiste em 5 macro etapas, pré-processamento, primeiro estágio do processamento de padrões de dados, extração de



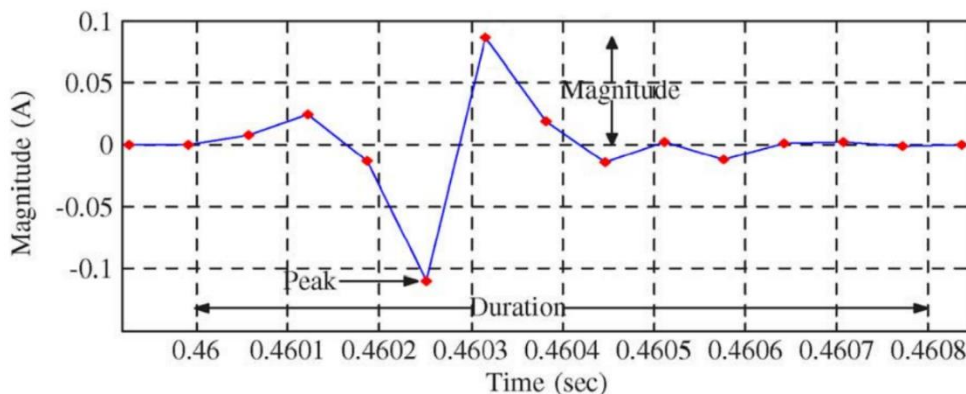
características, segundo estágio do processamento de padrões de dados e pós-processamento. Tanto no primeiro estágio do processamento de padrões de dados quanto no segundo estágio, o sistema de identificação de descargas parciais faz a comparação do dado a ser analisado com o padrão já definido, para que depois este dado já caracterizado siga para os processos de classificação e reconhecimento das anormalidades incipientes.

Dessa forma este trabalho utiliza o pico de descarga parcial apresentado no trabalho original. Tal informação, conforme mencionado anteriormente, é essencial para novos estudos desses fenômenos e de técnicas de identificação de degradação em redes subterrâneas de distribuição.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO FENÔMENO DE DESCARGAS PARCIAIS

Para obter o modelo matemático vinculado a esse fenômeno foi utilizado o sinal apresentado na Figura 2, onde observa-se o padrão do pico de descarga parcial apresentado por Mousavi et al. (2009), a partir dos dados obtidos nas medições do alimentador subterrâneo realizados naquele trabalho.

Figura 2 - Gráfico do pico da descarga parcial.



Fonte: Mousavi et al. (2009).

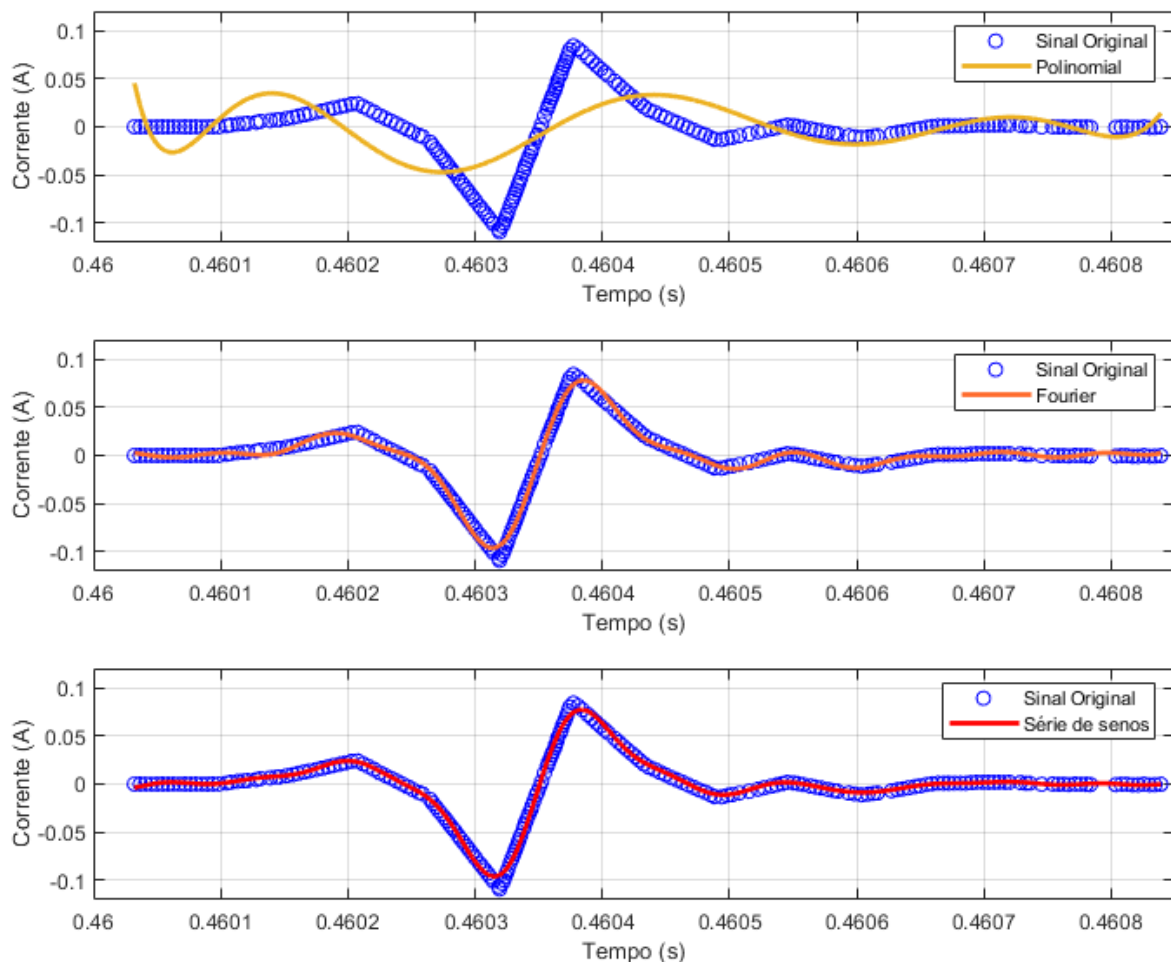
Para definir a equação matemática que representa com uma boa acurácia esse pico de descarga parcial, foi utilizado o método de modelagem matemática chamado de regressão. Nessa metodologia, o modelo matemático que melhor representa um sistema real, é obtido por meio de dados obtidos em um sistema real. O modelo matemático obtido pode então ser simulado em conjunto com trechos de uma rede elétrica para permitir novos estudos de identificação desse fenômeno.



Para extrair os dados do gráfico foi utilizado a aplicação on-line *Web Plot Digitizer* 4.4. Esse software permite que um gráfico qualquer sirva de entrada e a partir dele o software permite identificar os pontos, retornando à informação tabelada. Após o resultado desse obtido foi reproduzido no MATLAB™, na sequência, utilizando a ferramenta *Curve Fitting Tool™* (CFTool™) foi possível identificar os modelos que representam esse sistema.

No CFTool™ é possível ainda, comparar os modelos matemáticos que podem ser obtidos por regressão a partir dos dados obtidos, assim como polinomial, Fourier, Soma de Senos, dentre outros. Na Figura 3 são apresentados os resultados dos modelos matemáticos obtidos, sendo possível realizar uma comparação entre o modelo polinomial, de Fourier e soma de senos.

Figura 3 – Comparação entre os modelos matemáticos obtidos.





Na sequência, é apresentada na Tabela 1 a comparação dos coeficientes R^2 para identificar o modelo que melhor representou a descarga parcial (DP).

Tabela 1 - Comparação dos R^2 dos modelos estudados para curva da DP.

Modelo matemático	Grau utilizado	R^2
Polinomial	9	0,3722
Fourier	8	0,9912
Soma de Senos	8	0,9940

Assim como demonstrado na Tabela 1, é possível identificar que o modelo de soma de senos de oitavo grau e o de série de Fourier também de 8 grau foram os que mais se aproximaram do comportamento real com uma sutil diferença entre ambos. No entanto, na maioria dos simuladores de sistemas elétricos é mais simples trabalhar com sinais senoidais (em função das fontes de sinais) do que com sinais cossenoidais, o que determina a escolha para essa modelagem. Abaixo, é apresentada a equação (1), que melhor representa esse fenômeno. Os coeficientes a_1 ao a_8 , b_1 ao b_8 e c_1 ao c_8 são apresentados na Tabela 2.

$$f(x) = a_1 * \sin(b_1 * x + c_1) + a_2 * \sin(b_2 * x + c_2) + a_3 * \sin(b_3 * x + c_3) + a_4 * \sin(b_4 * x + c_4) + a_5 * \sin(b_5 * x + c_5) + a_6 * \sin(b_6 * x + c_6) + a_7 * \sin(b_7 * x + c_7) + a_8 * \sin(b_8 * x + c_8) \quad (1)$$

Tabela 2 – Coeficientes da equação (1).

nº	a	b	c
1	0.01026 (0.008473, 0.01205)	1.297e+04 (1.208e+04, 1.386e+04)	1198 (787.6, 1608)
2	0.0247 (0.02287, 0.02653)	2.23e+04 (2.127e+04, 2.332e+04)	493 (20.36, 965.6)
3	0.02578 (0.02468, 0.02689)	3.177e+04 (3.028e+04, 3.326e+04)	-287.6 (-974.6, 399.5)
4	0.02162 (0.02028, 0.02296)	4.188e+04 (4.003e+04, 4.373e+04)	2228 (1375, 3081)
5	0.008554 (0.007836, 0.009271)	6.375e+04 (6.138e+04, 6.612e+04)	-671.7 (-1763, 420.1)
6	0.01104 (0.009755, 0.01233)	5.281e+04 (5.035e+04, 5.527e+04)	783.6 (-348.8, 1916)
7	0.006091 (0.005003, 0.007179)	7.445e+04 (7.211e+04, 7.68e+04)	5159 (4080, 6238)
8	0.002384 (0.001437, 0.003331)	8.419e+04 (8.228e+04, 8.61e+04)	4265 (3383, 5146)



O modelo apresentado acima demonstrou ter um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9940. Como ele foi obtido a partir de dados reais, considera-se o modelo com uma ótima acurácia. Assim, o modelo matemático consegue representar o fenômeno real do pico de descarga parcial em um cabo isolado XLPE de média tensão instalado em rede subterrânea de distribuição de energia elétrica.

MODELAGEM DO FENÔMENO DE DESCARGAS PARCIAIS NO SIMULINK

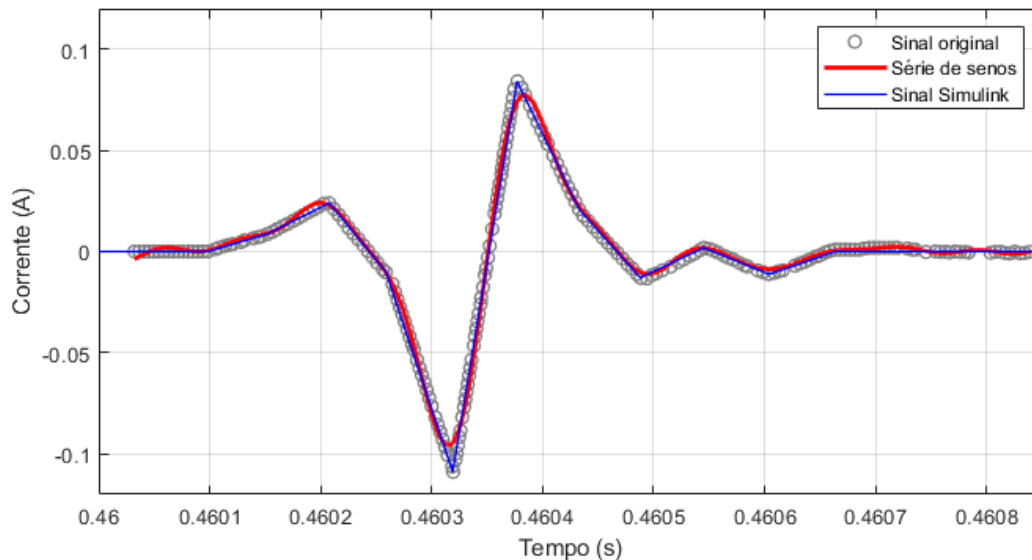
Com o intuito de utilizar o modelo matemático de descarga parcial desenvolvido, para realizar análises, proposições e testes de detecção prévia destes fenômenos em redes de distribuição de energia, o modelo foi implementado no Simulink®. Para isso, utilizou-se a ferramenta Simscape™, que permite a criação de modelos de sistemas físicos dentro deste ambiente (MATHWORKS, 2021).

Como apresentado, o pico de descarga parcial foi representado de maneira eficaz, através de uma série composta de funções senoidais. Esta modelagem permite realizar análises de maneira satisfatória do sinal em tempo contínuo. No entanto, esta série também pode ser utilizada para representar o sinal de pico de descarga parcial em tempo discreto, na simulação no Simulink®.

Este ambiente de simulação disponibiliza o bloco *Repeating Sequence Interpolated* para criação de sinais periódicos, como é o caso. Através desta ferramenta é possível criar o pico de descarga através de simples vetores de dados, nos quais são atribuídos os pontos mais significativos. Para demonstrar a eficiência deste método, a resposta obtida é apresentada na Figura 4 comparando com o sinal obtido originalmente uma comparação entre estes.



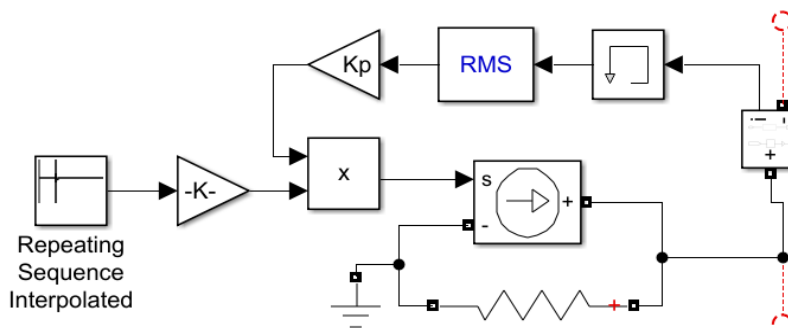
Figura 4 - Comparação entre os métodos para descrever o sinal.



Ainda é importante ressaltar que foram adicionadas variáveis na criação deste sinal, de modo que é possível realizar deslocamento temporal e de amplitude no mesmo, para melhor representar um cenário específico por exemplo. Isso torna possível em uma aplicação, escolher em que ponto do sinal da rede o sinal de descarga parcial ocorreria e manter a sua proporcionalidade em relação aos sinais elétricos de funcionamento normal do sistema.

A partir da criação deste sinal, desenvolveu-se a modelagem do sistema no Simulink® para simular a ocorrência deste em sistemas de energia, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo para o Simulink de descarga parcial.



Conforme observado anteriormente, este pico de descarga parcial pode ser detectado nos valores do fluxo de corrente de um alimentador. Deste modo, utilizou-se uma fonte de corrente controlada, na qual o sinal é inserido.



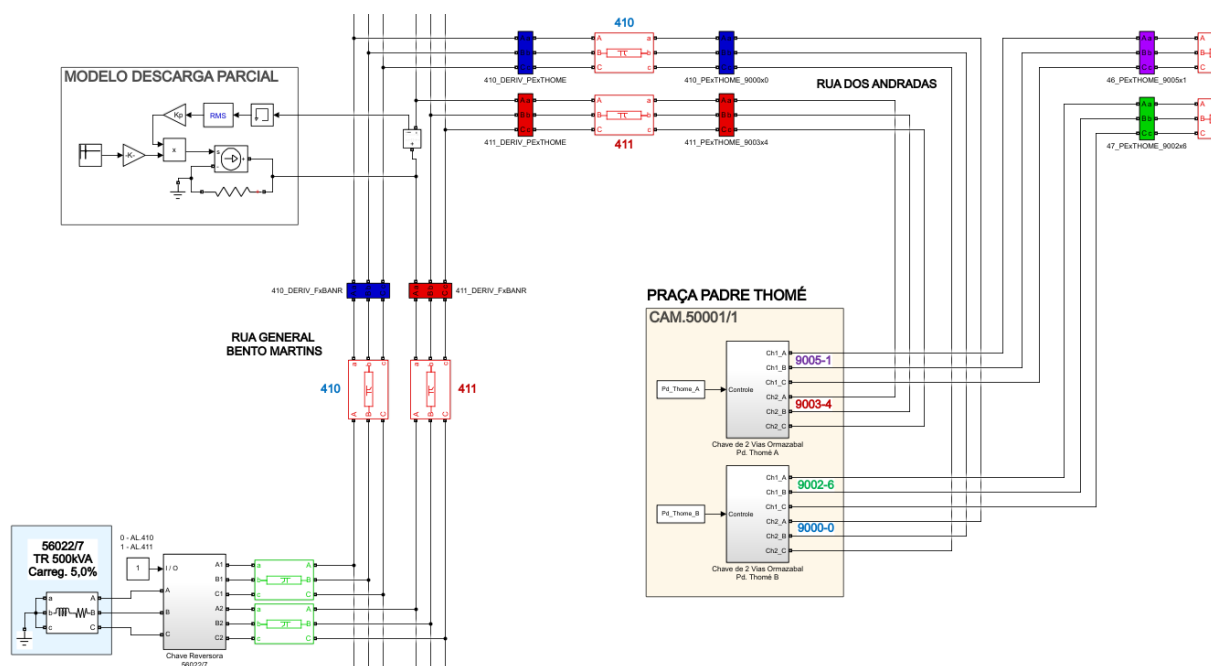
Também foi utilizado uma realimentação no sistema, deste modo, o sinal de descarga parcial é criado proporcionalmente ao fluxo de corrente existente no alimentador, de forma análoga ao que ocorre na prática. Para isso, foram observados os valores para o pico de descarga parcial descritos no trabalho de Mousavi et al. (2009).

Blocos de ganho também foram adicionados, de modo que é possível controlar a intensidade do sinal aplicado, o que pode auxiliar em estudos e análises de detecção destes picos em diversas condições distintas. Foi adicionado também, um resistor de valor significativo em paralelo com a fonte de corrente, conforme recomendação do software Simulink®, quando utilizado esse tipo de fonte.

Para demonstrar o potencial de análise que pode ser realizada com este modelo de descarga parcial, este foi inserido na simulação de um trecho parcial do sistema de distribuição Radial Seletivo Subterrâneo (RSS) pertencente a CEEE-D, o qual se encontra no centro histórico de Porto Alegre – RS.

Na Figura 6 a região no qual o modelo de descarga parcial foi inserido. Este local do sistema de distribuição RSS, foi escolhido por ser um ponto de derivação entre 3 câmaras de manobra, o que facilita a análise, visto que existem mais pontos de medição no local.

Figura 6 - Região da simulação do sistema de alimentação RSS onde o modelo foi inserido.

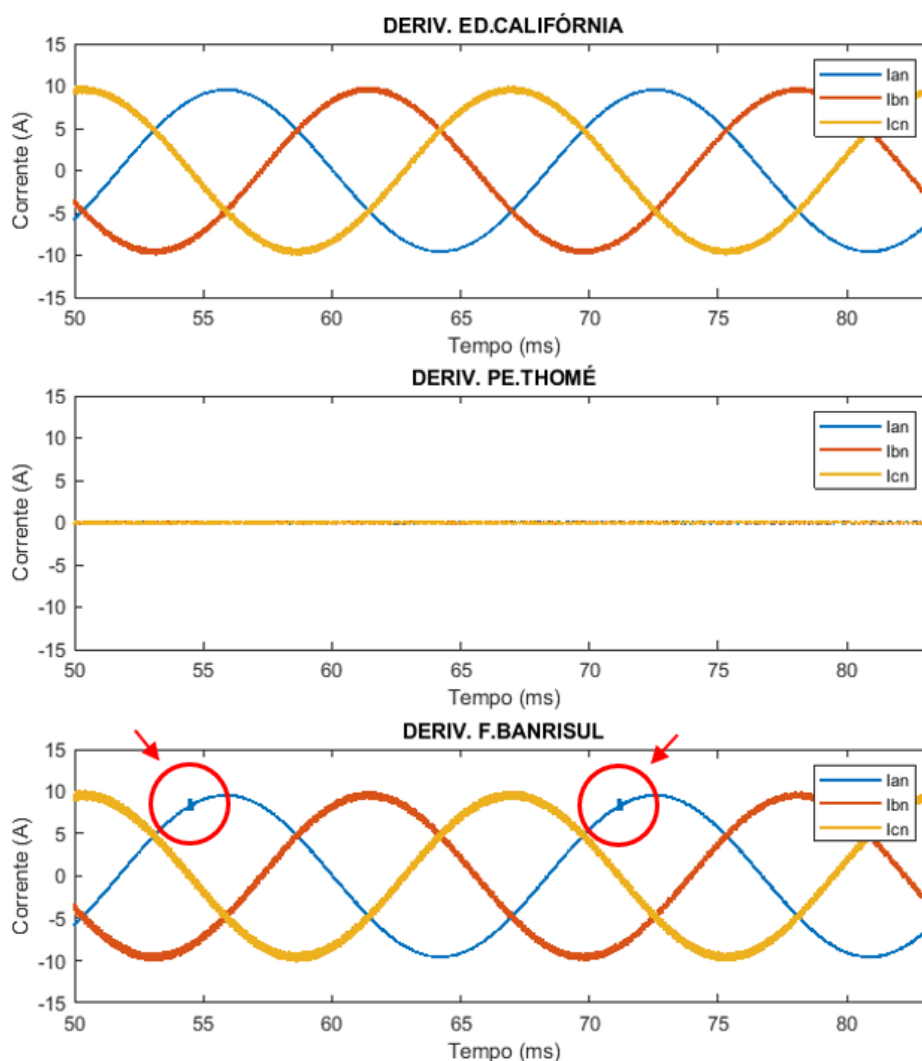




Para realizar a simulação, ajustou-se os parâmetros do modelo de descarga parcial, de modo que o sinal fosse aplicado próximo ao valor instantâneo máximo do sinal da rede de distribuição. Também se ajustou o ganho do sinal para 20 vezes, para facilitar a visualização dele na análise do sistema.

Neste contexto, os resultados da análise do fluxo de corrente do sistema com a ocorrência de descarga parcial em um segmento do cabo, são demonstrados na Figura 7.

Figura 7 – Resultados da simulação da ocorrência de descarga parcial.



Conforme é possível observar na Figura 7, a ocorrência da descarga parcial, inserida através do modelo, ocorre de maneira satisfatória. Possibilitando realizar análises de detecção do mesmo, traçando estratégias que podem ser testadas e validadas antes de testar um sistema de medição na prática, por exemplo.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da importância da energia elétrica na vida cotidiana da população atualmente, ainda não é possível fazer a entrega aos consumidores finais com 100% de disponibilidade. Mesmo os tipos de rede que conseguem entregar as maiores confiabilidades ainda assim sofrem com o envelhecimento por diversos fatores anteriormente relacionados. Buscar mitigar essas durações e as frequências das faltas de energia elétrica para os usuários é uma das obrigações de qualquer agente envolvido na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Nesse contexto, o presente artigo busca apresentar um modelo matemático que pode auxiliar no desenvolvimento e análise de metodologias para identificar o envelhecimento em cabos isolados de média tensão. Tais sistemas podem auxiliar na localização e prevenção de possíveis falhas na isolação dos cabos e seus componentes de forma menos intrusiva e destrutiva do que os métodos atualmente utilizados.

Foi apresentado, nesse sentido, o modelo matemático através da combinação de sinais senoidais, do fenômeno real do pico de descarga parcial em um cabo isolado XLPE de média tensão instalado em rede subterrânea de distribuição de energia elétrica. O coeficiente de determinação (R^2) obtido no estudo foi de 0,9940, o que determina uma boa acurácia do modelo proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PRODIST – MÓDULO 8:** Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 12 ed. Brasília: ANEEL, 2021. 88 p.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **5 anos: Principais realizações 1998-2002.** Brasília, 2003.

BRETAS, Arturo Suman et al. Incipient fault location method for distribution networks with underground shielded cables: A system identification approach. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 27, n. 12, p. e2465, 2017.



DELEA, Frank; CASAZZA, Jack. Understanding Electric Power Systems: An Overview of the Technology, the Marketplace, and Government Regulations. 2011.

DONG, Xiang et al. Analysis of cable failure modes and cable joint failure detection via sheath circulating current. In: **2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**. IEEE, 2014. p. 294-298.

FAISAL, M. F.; MOHAMED, A.; SHAREEF, H. Prediction of incipient faults in underground power cables utilizing S-transform and support vector regression. **International Journal on Electrical Engineering and Informatics**, v. 4, n. 2, p. 186, 2012.

JANNATI, Mohsen; VAHIDI, Behrooz; HOSSEINIAN, Seyed Hossein. Incipient faults monitoring in underground medium voltage cables of distribution systems based on a two-step strategy. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 34, n. 4, p. 1647-1655, 2019.

KULKARNI, Saurabh; SANTOSO, Surya; SHORT, Thomas A. Incipient fault location algorithm for underground cables. **IEEE transactions on smart grid**, v. 5, n. 3, p. 1165-1174, 2014.

MATHWORKS. **Simscape – MATLAB & Simulink**. 2021. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>. Acesso em: 18 jul. 2021.

MOUSAVI, Mir Rasoul J.; BUTLER-PURRY, Karen L. Detecting incipient faults via numerical modeling and statistical change detection. **IEEE transactions on power delivery**, v. 25, n. 3, p. 1275-1283, 2010.

MOUSAVI, Mir Rasoul J. **Underground distribution cable incipient fault diagnosis system**. 2005. Tese de Doutorado. Texas A&M University.

MOUSAVI, Mir Rasoul J.; BUTLER-PURRY, Karen L. A novel condition assessment system for underground distribution applications. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 3, p. 1115-1125, 2009.

TLEIS, Nasser. **Power systems modelling and fault analysis: theory and practice**. Second Edition. London, United Kingdom: Newnes, Elsevier, 2019.