



ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES MODELOS DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA¹

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT HIGH IMPEDANCE FAULT MODELS IN AN ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM

**Fernando Feiten Pinto², Airam Teresa Zago Romcy Sausen³, Maurício de Campos⁴,
Paulo Sérgio Sausen⁵**

¹ Artigo científico desenvolvido em disciplina do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, desenvolvido na UNIJUÍ;

² Bolsista do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

³ Professora do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁵ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

RESUMO

Este trabalho apresenta a simulação e comparação de quatro modelos diferentes de Falta de Alta Impedância (FAI). As simulações são realizadas no *Matlab/Simulink*, construindo um circuito que representa um alimentador de uma rede de distribuição de energia elétrica. Os modelos de FAI são implementados no mesmo trecho e simulados separadamente. Os resultados são analisados sobre as características da FAI retratadas pela literatura, e posteriormente são comparados com um trabalho em que se tem a FAI encenada em um cenário real.

Palavras-chave: Falta de Alta Impedância. Modelos. Simulações.

ABSTRACT

This paper presents the simulation and comparison of four different High Impedance Fault (HIF) models. The simulations are performed in *Matlab/Simulink* from a circuit that represents a power distribution network feeder. The HIF models are implemented in the same stretch and simulated. The results are analyzed on the characteristics of HIF reported by the literature, and later are compared with an article in which the FAI is staged in a real scenario.

Keywords: High Impedance Fault. Models. Simulations.

INTRODUÇÃO

No Brasil, acidentes devido a ocorrência de Falta de Alta Impedância (FAI) são um dos principais responsáveis em causas de mortes na distribuição do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Este tópico de pesquisa vem sendo estudado desde a década de 70 e ainda não possui uma solução definitiva (SANTOS, 2017).



As FAI são eventos que não são facilmente identificados devido a suas baixas magnitudes de corrente (CAMPOS, 2016). Destaca-se também que, com o surgimento de arcos elétricos têm-se a inexistência de padrões simétricos e lineares de corrente e tensão na determinação de uma FAI (EMANUEL, 1990), as quais são características que justificam a dificuldade em localizar a ocorrência desses eventos nas redes de distribuição elétrica.

Além disso, a formação desses arcos elétricos, devido aos condutores estarem energizados, podem comprometer a qualidade da energia elétrica como também proporcionar perigo ao ambiente em que os cabos estão expostos. Os riscos que podem ser causados vão além da danificação de equipamentos, pois em consequência da energização do condutor, pode-se levar a óbito qualquer ser vivo que entrar em contato com esse equipamento, bem como causar incêndio com a interação de determinadas superfícies. Logo, a ocorrência desses eventos provoca custos para a concessionária e perda de confiabilidade em relação a segurança de seus serviços.

A diversidade de características não-lineares presentes na FAI tornam complexo o processo de construção de um único modelo que consiga descrever com exatidão o comportamento desse distúrbio, com todas as suas particularidades. Dessa forma, técnicas distintas de detecção podem ser consideradas válidas na tentativa de descrever a FAI, cada uma com suas vantagens e desvantagens sobre as diferentes características.

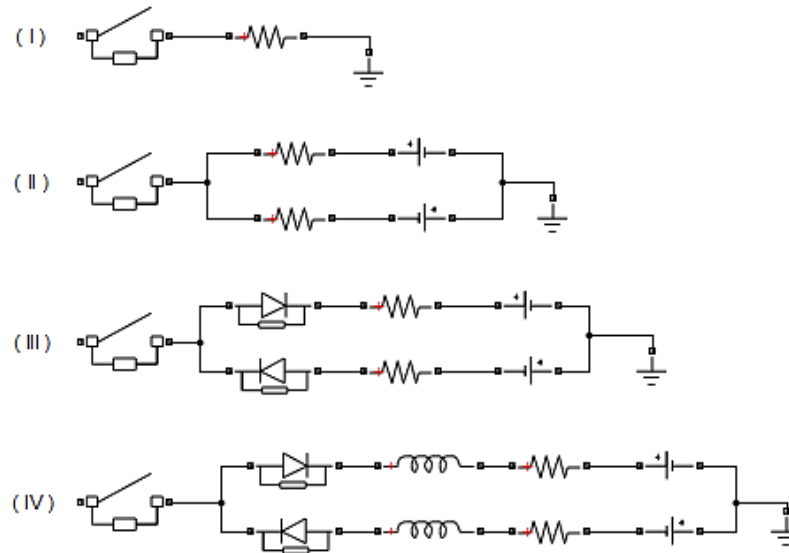
Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo realizar a simulação e a comparação de quatro modelos diferentes de FAI. Inicialmente, foi construído um circuito no *Matlab/Simulink* que representa a rede de distribuição com a falta sendo implementada em uma parte desse sistema. Na sequência, simulações são realizadas separadamente para cada um dos modelos de FAI testados. Por fim, esses resultados são comparados com uma FAI ensaiada em um cenário real.

METODOLOGIA

Em um primeiro momento, realizou-se uma revisão bibliográfica e definiu-se quatro modelos de FAI a serem estudados nesta pesquisa (Figura 1). Em síntese, na literatura técnica são retratados diversos estudos sobre modelos de FAI (CAMPOS, 2016), sendo alguns dos mais utilizados escolhidos para esse estudo.



Figura 1: Modelos de FAI construídos no *Matlab/ Simulink*.



Fonte: O autor.

Os modelos de FAI são construídos no *Matlab/Simulink*. Para representar os resistores, indutores, capacitores, diodos e disjuntores utilizou-se os blocos presentes no *toolbox Simscape Power Systems*. Especificamente, destaca-se a utilização do bloco *Series RLC Branch*, o qual pode ser manipulado como resistor, indutor ou capacitor.

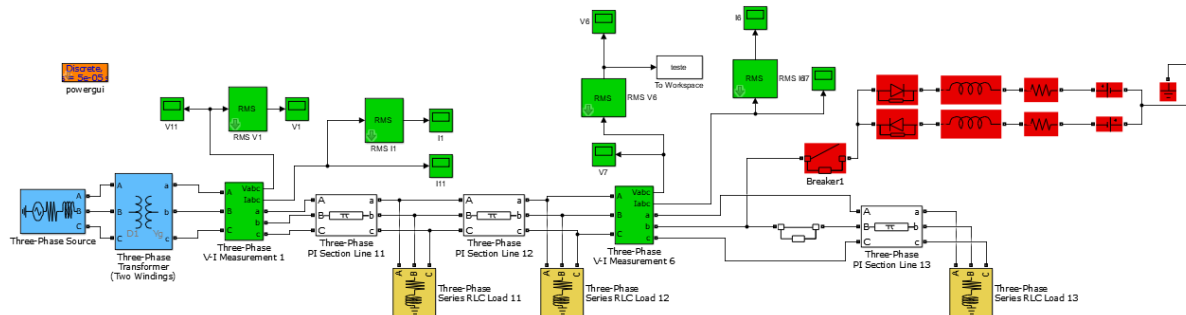
Posteriormente, construiu-se um circuito no *Matlab/Simulink*, que representa uma rede de distribuição de energia elétrica, baseada na representação do primeiro alimentador de Zamora (2007). Essa rede é utilizada para realizar as simulações com os diferentes modelos de FAI.

Desse modo, são construídos quatro programas, um para cada modelo de FAI, e as simulações são desenvolvidas separadamente. Destaca-se também que todos modelos de falta são inseridos no mesmo ponto do sistema, entre a segunda carga e o último segmento PI.

De forma a auxiliar na compreensão da representação do sistema da Figura 2, organizou-se o diagrama da seguinte forma: os blocos azuis são a fonte e o transformador; todos os blocos verdes são referentes a parte instrumental (para coletar as medidas de tensão e corrente instantânea e RMS); os blocos brancos representam os segmentos PI (i.e., modelo para parâmetros concentrados); os blocos amarelos são as cargas e transformadores (potência ativa e reativa); por fim, a FAI está representada nos blocos de cor vermelha.



Figura 2: Sistema que simula uma rede de distribuição com FAI construídos no *Matlab/Simulink*.



Fonte: O autor.

Assim como foi construído os modelos de FAI, os demais blocos desse sistema também são retirados do *toolbox Simscape Power Systems*, como exemplo cita-se o bloco *Three-Phase PI Section Line*, o qual é possível especificar resistências, indutâncias e capacitâncias, assim como as demais características. Além disso, destaca-se que os dados técnicos, como o tipo de condutor e seus parâmetros, potência dos transformadores, características dos cabos, entre outras informações, são baseados também no sistema apresentado por Zamora (2007).

CARACTERÍSTICAS DE FALTA

Estudos para avaliar e propor novas técnicas de detecção e localização de FAI, necessitam de modelos matemáticos que possam representar com boa acurácia o seu comportamento. Isso porque, não é possível reproduzir de forma segura uma FAI em laboratório. A modelagem computacional, portanto, se torna a única possibilidade viável para estes estudos. Nesse sentido, as principais características de FAI apresentados na literatura são (TRONDOLI, LOPES e VIEIRA, 2022):

- Shoulder: períodos em que a amplitude da corrente de falta é constante;
- Avalanche: fenômeno em que o ar conduz a corrente, devido ao condutor tocar o solo e o contato de alta resistência impedir que a corrente flua, podendo ocorrer a formação do arco;
- Acúmulo: é o crescimento gradual da amplitude da corrente até atingir o valor máximo;

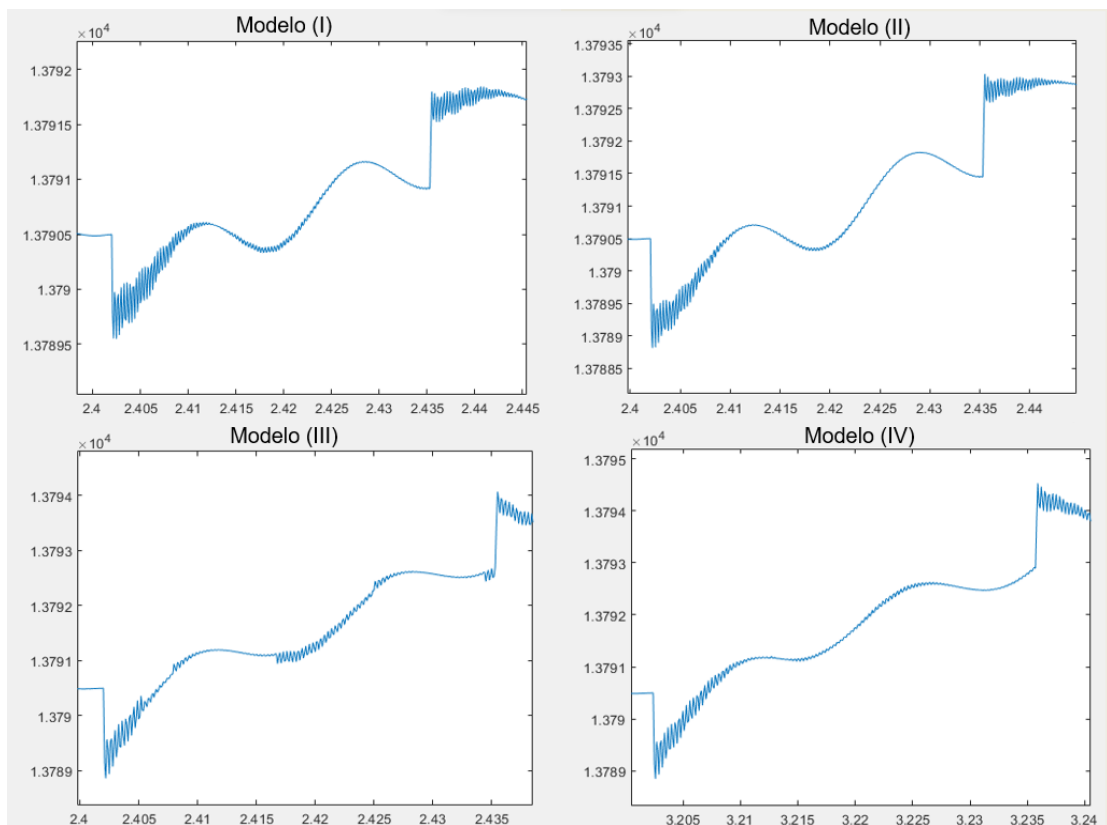


- Assimetria: valores diferentes da amplitude de corrente para meio ciclos positivos e negativos;
- Intermitência: período de existência de um arco e o tempo entre duas rajadas, causando intermitência na corrente de FAI;
- Variação de Amplitude (Modulação): ocorre devido ao tipo de superfície de contato e suas condições, causando modulação e flutuações aleatórias na corrente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados de cada modelo de FAI simulados, somente é analisado o instante em que ocorre a FAI no sistema. Para isso, utilizou-se o bloco *To Workspace* que transportou os dados RMS (*Root Mean Square*) de tensão no momento em que ocorre a FAI, gerados no *Simulink*, para a janela principal do *Matlab* em forma de matrizes. Desse modo, os gráficos plotados abaixo são apenas com os dados do condutor rompido.

Figura 3: Simulação dos quatro Modelos de FAI.



Fonte: O autor.



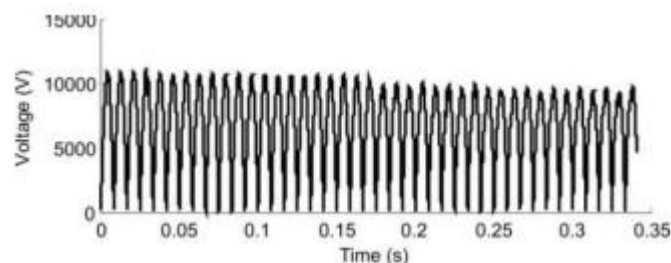
De modo geral, percebe-se que os modelos apresentam comportamentos bem semelhantes. Entretanto, é possível destacar algumas particularidades, tais como: no Modelo (I) nota-se a existência de um ruído inicial e final de maior magnitude ao comparar com os demais modelos, ocorrendo a formação de diferentes ciclos de acúmulo. Além disso, no Modelo (III) têm-se a ocorrência mais frequente de intermitências, especialmente entre *shoulders*, e apresenta um ruído mais intenso no meio de seu sinal, enquanto os outros são mais suaves.

Ao comparar semelhanças de amplitude de ondas, nota-se que os Modelos (I) e (II) possuem semelhança, com comportamentos longitudinais, como também os Modelos (III) e (IV), que quando comparados com os anteriores são mais transversais.

Além disso, nos quatro Modelos simulados têm-se a presença de características de não-linearidade, assimetria e modulação, as quais ocorrem no decorrer de todo sinal. Tais aspectos da FAI são influenciados por diferentes fatores, sendo os dois mais relevantes a umidade da superfície (seu crescimento sendo diretamente proporcional a corrente de falta) e o material da superfície (GHADERI, 2017).

Trabalhos que vêm sendo desenvolvidos buscam incorporar a variação desses fatores, para que se obtenham análises de como se comporta a tensão e a corrente presentes nesse distúrbio. Assim sendo, em Santos *et al.* (2010) é realizada a construção automática de um banco de dados simulados a partir de testes reais encenados de FAI, variando fatores como a posição angular, a umidade e utilizando diferentes superfícies (pedra brita, grama, areia...) de contato.

Figura 4: FAI encenada (tensão).



Fonte: SANTOS W. C., 2010.

Na Fig. 4 é apresentado uma FAI a partir do modelo escolhido por Santos *et al.* (2010) para descrever os dados presente no banco de dados. Esse modelo emprega duas séries de resistências variantes no tempo controladas pela Transient Analysis of Control Systems



(TACS). A automatização desses dados pode auxiliar no desenvolvimento da modelagem da FAI, tornando o processo mais rápido.

Os resultados encenados em cenário real por Santos et al. (2010) demonstram um trecho do comportamento da tensão durante a FAI. Dessa forma, pode-se identificar algumas características semelhantes como assimetria, modulação e *shoulder* com os quatro modelos simulados nesse artigo. Entretanto, nesse trecho não se tem a presença de acúmulos e intermitências.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foram simulados e comparados quatro modelos diferentes de FAI. Através dos resultados obtidos, constatou-se que em um aspecto geral os modelos apresentaram comportamentos semelhantes, divergindo especificamente na magnitude do ruído ao longo do sinal.

As semelhanças no comportamento entre os Modelos simulados, podem ser explicadas pelo fato de se tratar de simulações implementadas sobre um circuito de mesmas condições. Por isso, ao comparar com um trecho de FAI encenado em cenário real pode-se evidenciar algumas distinções, pois esse evento tem suas características profundamente influenciadas ao variar diferentes fatores como umidade e superfície de contato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, M. **Proposição de uma nova técnica de detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica.** Eletrônica de Potência, SOBRAEP, v. 21, p. 138–147, mar./jun. 2016.

DIEFENTHÄLER, A. T. **Proposição de uma metodologia baseada em redes neurais para a detecção de faltas de alta impedância em um sistema de distribuição de energia elétrica.** Tese (Doutorado) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2022.

EMANUEL, A. E. et al. **High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum.** IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 5, p. 676–686, apr. 1990.

GHADERI, A.; GINN, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. **High impedance fault detection: A review.** Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 143, p. 376–388, fev. 2017.



SANTOS, A. J. dos Santos da. **Modelagem Matemática de um Sistema de Distribuição Primário de Energia Elétrica em Média Tensão do Município de Ijuí**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2017.

SANTOS, W. C. et al. **High-impedance fault identification on distribution networks**. IEEE Transaction on Power Delivery, IEEE, v. 32, p. 23–32, feb. 2017.

SANTOS, W. C. et al. **Automatic building of a simulated high impedance fault database**. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, 2010.

TRONDOLI, L.; LOPES, G.; VIEIRA, J. **Configurable stochastic model for high impedance faults simulations in electrical distribution systems**. Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 205, apr. 2022..

ZAMORA, I. et al. **New method for detecting low current faults in electrical distribution systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 22, p. 2072–2079, oct. 2007.