

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

ABORDAGEM BASEADA EM APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA DISCRIMINAÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO E OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA NA PROTEÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

Fernanda Inácio da Silva (IC)¹, Aurélio Luiz Magalhães Coelho (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Aprendizado de Máquinas. Gerador Síncrono. Oscilações de Potência. Perda Excitação.

Introdução

Dada a importância de geradores síncronos na geração do sistema elétrico, a implementação de proteções visa minimizar custos com reparos e paradas não programadas na operação, certificando uma maior confiabilidade ao sistema.

Conforme Franco (2021) a perda de excitação (PE) caracteriza-se como uma condição anormal de operação em geradores síncronos. Essa ocorrência se dá quando, por alguma falha, o sistema de excitação deixa de suprir energia ao enrolamento de campo do gerador, levando à perda de sincronismo.

Perturbações no sistema elétrico de potência podem ser caracterizadas como leves ou fortes. As perturbações de característica leve são aquelas cujos sistemas de controle respondem corretamente e conseguem direcionar o sistema elétrico de potência para um novo ponto de equilíbrio e, portanto, a oscilação é considerada estável. Já as perturbações fortes não permitem que os sistemas de controle encontrem um novo ponto de equilíbrio para o sistema de potência (FRANCO, 2021).

É de suma importância identificar e atuar com proteções frente a esses fenômenos que podem acontecer em sistemas elétricos, diante disso o *Support Vector Machine* (SVM), que é um método baseado em aprendizado de máquina aplicado para classificar padrões de dados de entrada em classes predefinidas, baseado na ideia de um classificador de pontos, onde o espaço de dados é dividido em classes separadas por um hiperplano (EL-SAADAWI; HATATA, 2017).

O SVM foi escolhido para ser aplicado neste trabalho visto que dentre as suas vantagens estão a versatilidade de dados, visto que são capazes de suportar dados lineares e não lineares, sua robustez em ser menos propensas ao *overfitting*, um fenômeno de sobreajuste em que o modelo treinado perde a capacidade de generalizar para novos dados. A sua interpretabilidade é clara, beneficiando a compreensão das previsões do

modelo e as SVMs são altamente precisas para o tratamento de conjuntos de dados pequenos.

Este trabalho tem como objetivo simular eventos de condições de perda de excitação e oscilação de potência em um sistema no *software* PSCAD. A partir do resultado das simulações obtidas, propõe-se a implementação de um método de detecção de falhas no MATLAB visando a validação da proteção com o aprendizado de máquinas, através de *Support Vector Machine* e comparação com técnicas tradicionais de proteção. A justificativa deste trabalho se faz pela necessidade de aprimorar a proteção de geradores síncronos.

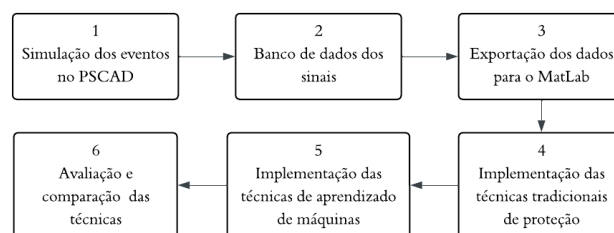
Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste, inicialmente, em estudos de transitórios eletromagnéticos por meio do *software* PSCAD.

Os dados obtidos foram tratados e analisados no ambiente MATLAB, com o propósito de implementação das lógicas tradicionais como a *ANSI40*. Posteriormente a implementação de uma abordagem em aprendizado de máquinas a fim de avaliar o novo método frente à identificação dos eventos simulados.

As etapas deste trabalho foram divididas de acordo com o fluxograma da Figura 1.

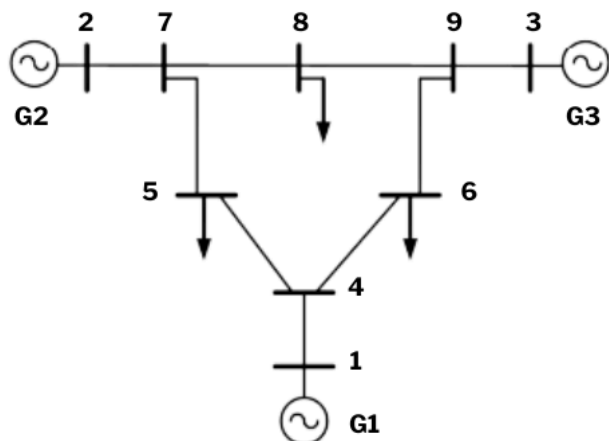
Figura 1 : Fluxograma de atividades da pesquisa.



“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Na primeira etapa o sistema foi escolhido por ser um modelo de teste que representa de forma simples, um sistema elétrico de potência, conforme ilustrado no diagrama da Figura 2.

Figura 2 - Sistema IEEE 9 barras no PSCAD.



Para a simulação dos eventos de perda de excitação total no gerador 1 (G1), disposto na Figura 2, o ajuste de tensão é dado através do controle de tensão, considerando um tempo empírico para a efetuação do fenômeno tratado e carregamentos diferentes dispostos na Tabela 1.

Para as análises de oscilação de potência estável, é considerado cenários diversos de carregamento de acordo com a Tabela 1, a fim de avaliar a estabilidade do sistema. Como condição para verificação da oscilação instável de potência é considerado um curto-circuito aplicado na barra 1 e na linha próxima ao gerador 1, levando em conta o carregamento 1 e o carregamento 4 para uma avaliação de dois cenários distantes no que tange à carga entre si.

Tabela 1- Carregamentos nas barras do sistema.

	Barra 5	Barra 6	Barra 8
Carregamento 1	125 + j50 MVA	90 + j30 MVA	100 + j30 MVA
Carregamento 2	175 + j70 MVA	140 + j50 MVA	155 + j55 MVA
Carregamento 3	225 + j70 MVA	190 + j50 MVA	200 + j55 MVA
Carregamento 4	300 + j70 MVA	250 + j50 MVA	260 + j65 MVA

Fonte: Silva (2021).

Dispostos dos dados coletados após a geração do banco de sinais na etapa 2 nas simulações dos eventos no PSCAD, os dados são importantes para o MATLAB, para execução de um algoritmo capaz de analisar o comportamento das impedâncias para a função *ANSI40* de perda de excitação.

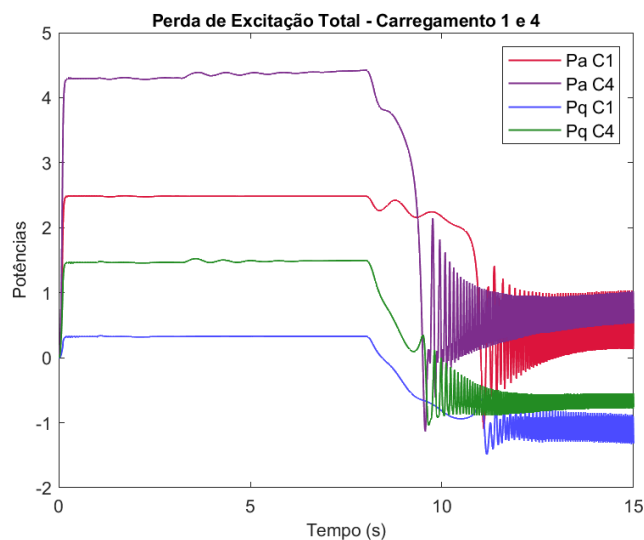
Para a etapa 5 é usando o recurso da *toolbox* de *Classification Learner* no MATLAB, que tem por objetivo treinar de forma automática os modelos para classificar os dados, têm-se sua configuração inicial no *data set variable* que é alimentado por uma tabela de dados, usando como parâmetros para alimentar os modelos a tensão de campo, a corrente de campo e a potência ativa coletadas em cada cenário simulado anteriormente no PSCAD, para a validação é configurando *Cross-Validation* de 5 etapas para proteger contra *overfitting*.

Resultados e discussão

As análises foram realizadas a partir de uma condição de perda de excitação total, foi considerada uma tensão de campo $e_f = 0$ em 8 segundos após o início da simulação em todos os cenários de carregamento.

Na Figura 3 é exposto o comportamento da potência ativa e potência reativa para o contexto supracitado.

Figura 3- Comportamento das Potências Ativas e Reativas (Carregamento 1 e 4).



Observa-se que para o carregamento 1 sendo o mais leve, o consumo de reativos ($P_q C1$) é maior, o que leva a máquina a tentar manter a estabilidade por um período brevemente superior comparado ao carregamento 4 ($P_q C4$), no qual a máquina tende a perder sua estabilidade mais rápido devido ao seu alto valor, o que conseqüentemente levará a atuação do relé de proteção primeiro para o carregamento C4.

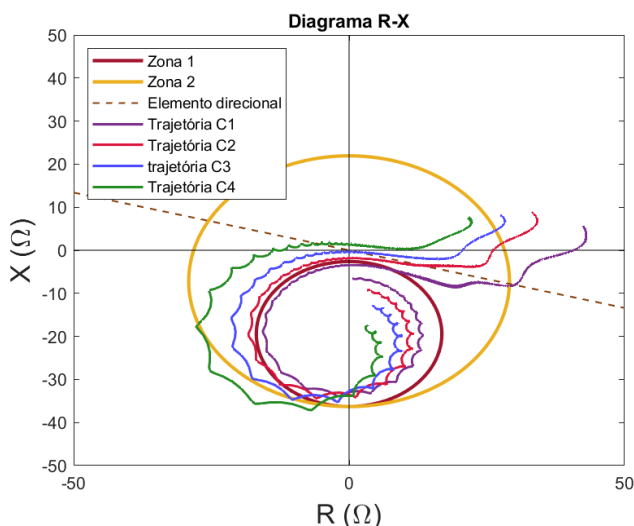
Para um cenário de perda total de excitação como na Figura 4, através da *ANSI40* com *offset* positivo por

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

meio do método desenvolvido por Mason e otimizado por Berdy, retrata a trajetória das impedâncias para os diferentes tipos de carregamento, evidenciando que esse tipo de proteção se comporta melhor para cargas elevadas como no carregamento C3 e C4, é possível observar que toda a trajetória de C4 se encontra dentro da atuação da zona 2 denominada temporária com atuação de 0,5 segundos, convergindo ambas para a zona 1 de atuação instantânea.

Com atuações de proteções para uma trajetória em C3 de em torno 10,06 segundos e C4 de 9,61 segundos considerando o tempo desde o início da simulação, corroborando para uma análise de quanto maior o carregamento mais rápido é a atuação da proteção.

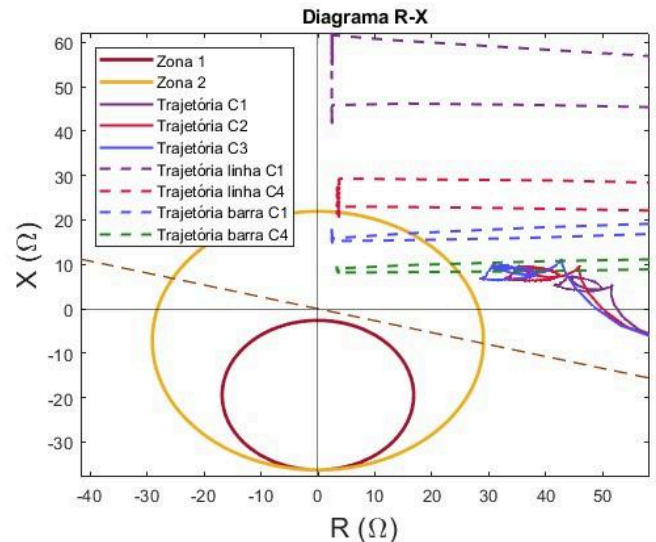
Figura 4- Trajetórias das impedâncias para uma perda total de excitação.



Em condições de oscilações de potência estável, foi considerado 3 cenários de carregamento, observando na Figura 5, quanto maior o carregamento, como em C3, mais próximo das zonas de proteção e maior a oscilação no sistema.

Para uma condição de oscilação de potência instável com simulações de curto circuitos na barra e na linha, na Figura 4 nas linhas tracejadas, com duração total de 1 segundo, o elemento direcional vai inibir a atuação da proteção visto que o sistema encontrará um novo ponto de equilíbrio após o distúrbio.

Figura 5- Trajetórias das impedâncias para uma oscilação de potência estável e instável.



Traçando uma análise para essas detecções baseadas em um algoritmo de aprendizado de máquinas, foi executado no MATLAB os treinamentos de 7 tipos de modelos de *Support Vector Machine*.

Na Figura 6 temos os resultados, com destaque para o modelo 3, com acurácia, ou seja uma taxa de acerto de 97,2%, demonstrando que o modelo está treinado.

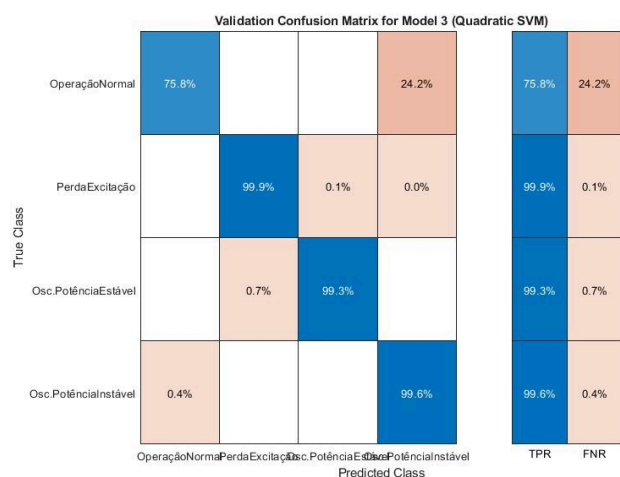
Figura 6- Resultados dos modelos de SVM treinados.

Models	
Sort by: Model Number	
★ 2 SVM	Accuracy (Validation): 95.5%
Last change: Linear SVM	7/7 features
★ 3 SVM	Accuracy (Validation): 97.2%
Last change: Quadratic SVM	7/7 features
★ 4 SVM	Accuracy (Validation): 96.2%
Last change: Fine Gaussian SVM	7/7 features
★ 5 SVM	Accuracy (Validation): 94.4%
Last change: Medium Gaussian SVM	7/7 features
★ 6 SVM	Accuracy (Validation): 87.6%
Last change: Coarse Gaussian SVM	7/7 features
★ 7 Kernel	Accuracy (Validation): 96.3%
Last change: SVM Kernel	7/7 features
★ 8 SVM	Accuracy (Validation): 66.7%
Last change: Cubic SVM	7/7 features

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

A matriz de confusão do modelo 3, na Figura 7 explicita o percentual de taxa de verdadeiros positivos e de taxa de falsos negativos baseados nos dados treinados. Afirmando o ótimo desempenho do modelo treinado.

Figura 7- Matriz de Confusão do modelo 3 de SVM.



Com a execução do modelo supracitado, teve-se uma performance eficiente, com um tempo de atuação de 9,03 segundos considerando o início da simulação, reduzindo esse tempo em comparação com o *trip* mais rápido para perda de excitação da função *ANSI40* com *offset* positivo que foi para o carregamento C4, com redução em torno de 6,04% no tempo de atuação.

Conclusões

Esse estudo demonstrou que a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina, como o *Support Vector Machine*, apresenta desempenho promissor na detecção de perda de excitação e oscilações de potência em geradores síncronos.

Os resultados indicaram acurácia elevada e redução no tempo de atuação em relação ao método tradicional *ANSI40*, indicando que o SVM pode ser uma opção eficiente como complemento ou alternativa na avaliação de proteção de geradores síncronos.

Agradecimentos

Gostaria de começar agradecendo a Deus por iluminar minha mente em todo o processo. Ao meu orientador e professor Aurélio Luiz Magalhães Coelho ao longo dessa jornada de pesquisa. Ao Luiz Henrique Cordeiro Rocha por todo apoio durante os dias de trabalho. Ao

CNPq pelo apoio financeiro concedido. A UNIFEI por proporcionar a licença aos *softwares* utilizados para a realização do projeto.

Referências

BERDY, J. **Loss of excitation protection for modern synchronous generators.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-94, n. 5, p. 1457–1463, Sep./Oct. 1975.

Classification Learner - Train models to classify data using supervised machine learning - MATLAB. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/stats/classificationlearner-app.html>>.

EL-SAADAWI, M.; HATATA, A. **A novel protection scheme for synchronous generator stator windings based on svm.** *Protection and Control of Modern Power Systems*, p. 12, 2017.

FRANCO, M. C. **Metodologia para Detecção de Perda de Excitação, Curto-Circuito e Oscilações de Potência em Geradores Síncronos.** 2021. Universidade Federal do Pampa, Alegrete.

MASON, C. R. **New loss-of-excitation relay for synchronous generators.** *AIEE Transactions*, v. 68, p. 1240–1245, 1949.

RAMADOSS, H.; MUTHIAH, G. **Ensemble machine learning approach to identify excitation failure in synchronous generators.** *Engineering Failure Analysis*, v. 152, p. 107506, out. 2023.

SILVA, C. R. **Avaliação dos Efeitos da Inserção de Dispositivos Facts em Estudos de Estabilidade e Proteção de Geradores Síncronos.** Itaboraí, 2021.

What Is a Support Vector Machine?. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/discovery/support-vector-machine.html>>.