

Classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando métodos de inteligência computacional

Danton Diego Ferreira* Gabriel Aparecido Fonseca**
Flávio Bezerra Costa*** Aryfrance Rocha Almeida****

* Departamento de Engenharia – Universidade Federal Lavras, MG,
(e-mail: danton@ufla.br).

** Departamento de Engenharia – Universidade Federal Lavras, MG,
(e-mail: gabriel.fonseca@estudante.ufla.br)

*** Escola de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal do Rio
Grande do Norte, RN, (e-mail: flaviocosta@ect.ufrn.br)

**** Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do
Piauí, PI, (e-mail: aryfrance@ufpi.edu.br)

Abstract: Overhead energy transmission lines are highly susceptible to fail. Some researchers already studied the use of computational intelligence techniques like artificial neural networks and fuzzy logic with pre-processing phases that comprise the use of wavelet, Fourier transform or higher-order statistics. This work aims to show the use of random forest method and artificial neural networks with a notch filter as a pre-processing phase to classify faults in transmission line. It was used the k-fold cross validation and as result the average accuracy obtained by the neural network model was 89,59% while the random forest technique reached 91,96%.

Resumo: Sistemas de transmissão de energia elétrica externos estão altamente susceptíveis a falhas. Alguns pesquisadores já investigaram o uso de técnicas de inteligência computacional como redes neurais artificiais e lógica *fuzzy* com etapas de pré-processamento que compreendem o uso de transformada *wavelet*, Fourier ou estatística de ordem superior. Esse trabalho visa mostrar o uso do método de florestas aleatórias e redes neurais artificiais com uma etapa de pré-processamento com filtro *notch* para classificação de faltas em linhas de transmissão. Foi utilizada a validação cruzada *k-fold* e como resultado a acurácia média obtida pelo modelo de rede neural foi de 89,59% enquanto a técnica de florestas aleatórias obteve 91,96%.

Keywords: Random forest; artificial neural networks; notch filter; transmission lines; fault classification; cross validation.

Palavras-chaves: Florestas aleatórias; redes neurais artificiais; filtro notch; linhas de transmissão; classificação de faltas; validação cruzada.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de energia elétrica, os sistemas de transmissão têm sofrido com faltas e falhas diversas, por serem componentes altamente suscetíveis a intempéries e eventos externos. Descargas elétricas, animais e erros humanos podem levar à ocorrência de faltas nas linhas de transmissão. Assim, existe a necessidade de detectar, classificar e localizar rapidamente essas faltas para que se evite prejuízos à concessionária de energia e aos consumidores. O trabalho aqui proposto visa investigar a etapa de classificação de faltas em linhas de transmissão.

Em Avagaddi et al. (2017) são apresentados os tipos de faltas que podem ocorrer em uma linha de transmissão. As faltas mais comuns e menos graves são aquelas que envolvem apenas uma fase (AT, BT, CT). Faltas bifásicas (AB, BC e CA) são um pouco mais raras e severas. Aquelas que envolvem duas fases e o terra (ABT, BCT e CAT) são ainda menos comuns e mais nocivas. Por fim, faltas

trifásicas (ABC) e trifásicas com terra (ABCT) ocorrem raramente, mas quando acontecem podem levar ao colapso do sistema elétrico como um todo.

Uma técnica amplamente utilizada no processo de classificação de faltas em linhas de transmissão é a rede neural. Dentre os autores que fizeram uso dela, pode-se citar R. de Carvalho et al. (2014) que utilizaram os sinais de tensão com uma etapa de pré-processamento com estatística de ordem superior (*higher-order statistics* - HOS). Após isso os sinais foram apresentados à uma rede neural com 3 entradas, 40 neurônios na camada oculta e 10 saídas, obtendo uma acurácia de 99% na classificação com dados simulados. Kumar et al. (2014) também fizeram uso de redes neurais, no entanto, não foi incluída etapa de pré-processamento e como sinais de entrada foram utilizados os valores RMS da tensão e corrente em uma arquitetura com 6 entradas, 5 neurônios na camada escondida e 4 saídas. Saravanan and Rathinam (2012) realizaram uma pesquisa comparativa entre três arquiteturas de redes neurais *fe-*

edforward, a rede *multilayer perceptron* (MLP), a rede de função de base radial (RBF) e a rede em cascata para classificação e localização de faltas em linhas de transmissão de circuito duplo. O resultado da pesquisa desses autores indicou que a rede RBF tem o menor tempo de treinamento enquanto a rede em cascata obteve o menor erro.

Alguns autores exploraram o uso de outros métodos para a resolução desse problema. Almeida et al. (2017) utilizaram a análise de componentes independentes (*independent component analysis* - ICA) como etapa de pré-processamento e filtragem do sinal para uso em um classificador baseado em máquinas de vetor de suporte (*support vector machine* - SVM), realizando assim um comparativo entre a classificação do sinal filtrado e do sinal com ruído, obtendo acurácia de 100%. Das et al. (2005) realizaram um estudo comparando o uso da transformada de Fourier e *wavelet* na classificação de faltas em linhas de transmissão. Como conclusão nesse projeto, foi observado que para os dados e técnicas utilizadas a transformada *wavelet* fornece melhores resultados.

Considerando os trabalhos realizados na área, a motivação principal do projeto aqui proposto é aplicar técnicas mais simples e de menor custo computacional em relação às encontradas na literatura. Assim, na etapa de pré-processamento foi utilizado o filtro *notch*, que possui um custo computacional bem menor quando comparado às transformada de Fourier e *wavelet* que são geralmente utilizados em trabalhos dessa natureza. Apesar de técnicas mais sofisticadas levarem a resultados melhores pode ser necessário o uso de recursos computacionais superiores que não estejam disponíveis. Além disso, adotou-se o método de florestas aleatórias para a classificação das faltas, ele em geral tem um tempo de treinamento menor quando comparado com outras técnicas por ser baseado em regras de decisão. A simplicidade da estratégia proposta é corroborada ao se comparar esse método com a técnica de redes neurais artificiais, que é amplamente utilizada em trabalhos semelhantes. Essa comparação permite observar a discrepância no tempo de treinamento, enquanto a rede neural artificial demorou em média 1h e 30m para ser treinada o modelo usando florestas aleatórias executou esse processo em apenas 5 min.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia adotada nesse projeto

O conjunto de dados utilizado nesse trabalho foi obtido com a utilização do software MATLAB®, ele é composto por 939 arquivos, no qual cada um deles representa uma ocorrência da falta. Dessa maneira, estão presentes 10 tipos de faltas (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC), 3 distâncias da localização da falta (20km, 150km e 280km), variação do ângulo da falta entre 0° e 180° (com passo de 10°) e 3 diferentes valores para a resistência da falta (1 Ω, 50 Ω e 100 Ω). Além disso, a frequência fundamental do sinal é 60 Hz, e possui 256 amostras por ciclo, portanto, a frequência de amostragem é 15360 Hz. O diagrama de blocos do sistema elétrico analisado nesse projeto pode ser encontrado no final desse artigo na Figura 5.

Em sistemas de energia elétrica como tratado nesse trabalho, a frequência fundamental é constante e presente em todas as fases. Dessa maneira, ela representa uma redundância, e pode prejudicar ou dificultar o treinamento de alguns modelos de aprendizagem computacional, portanto, é necessário eliminá-la antes de utilizar os sinais no classificador. Dessa maneira, como etapa de pré-processamento foi utilizado um filtro *notch* para eliminar a frequência de 60 Hz do sinal.

O filtro *notch* é um filtro rejeita-faixa que deixa passar a maioria das frequências inalteradas, mas atenua aquelas em um intervalo específico. Sua banda de rejeição é muito estreita, ou seja, ele possui um alto fator de qualidade. Dentre as suas aplicações destaca-se o seu uso em projetos que lidam com sinais da rede elétrica.

Ele é geralmente usado devido ao seu baixo custo computacional e a maior seletividade na frequência de interesse, neste trabalho foi considerado um filtro de segunda ordem com valor constante de 60Hz para frequência de corte. Sua transformada z é dada pela equação 1 Ferreira (2010).

$$H(s) = \frac{1 + a_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 + \rho_0 a_0 z^{-1} + \rho_0^2 z^{-2}} \quad (1)$$

onde, $a_0 = -2 \cos \omega_0$ e ρ_0 é o fator *notch* com $0 \ll \rho_0 < 1$. Um valor que apresentou melhores resultados para detecção e classificação de distúrbios foi $\rho_0 = 0,97$ Ferreira (2010), e portanto nesse projeto utilizou-se o mesmo valor.

As primeiras amostras do sinal filtrado são compostas por um transitório advindo do filtro, isso pode prejudicar o desempenho do classificador e, portanto, foram retiradas do sinal. Também, não é interessante fazer uso de todo o sinal para evitar a complexidade dos modelos criados, portanto, nesse trabalho fez-se uso de meio ciclo, o que compreende 128 amostras. Um exemplo desse sinal pode ser observado na Figura 1.

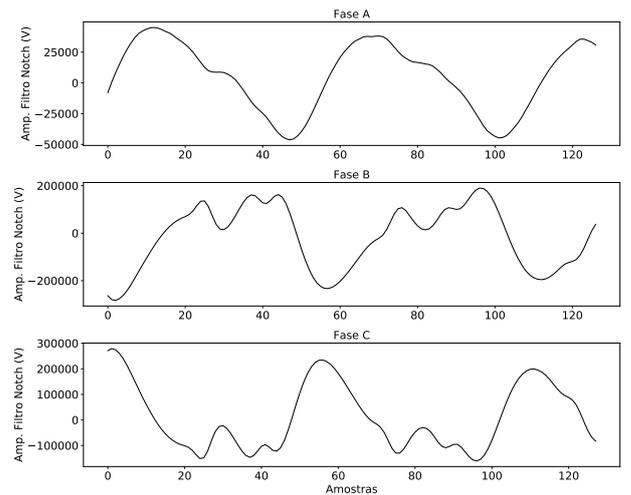


Figura 1. Exemplo de meio ciclo do sinal filtrado.

Além do pré-processamento do sinal citado, é importante também realizar a normalização dos dados para evitar que os modelos de aprendizado computacional sejam enviesados. Assim, cada uma das ocorrências de faltas a serem apresentadas aos classificadores é composta pelos sinais

filtrados de cada uma das 3 fases após a normalização entre -1 e 1.

Na Figura 2 pode-se verificar o fluxograma apresentando as etapas desenvolvidas durante esse projeto. Os sinais de tensão de cada fase são utilizados como entradas para o filtro *notch*, os sinais de saída não normalizados e utilizados na validação cruzada. Foram implementados dois modelos de classificadores: florestas aleatórias e redes neurais artificiais. O fluxograma da Figura 2 é o mesmo para ambos, foi feito uso também da validação *k-fold* com 10 *folds* sendo que cada *fold* foi repetido dez vezes. Ao final obteve-se um vetor de acurácias, então foi calculada a média e desvio padrão para se obter o desempenho geral do modelo.

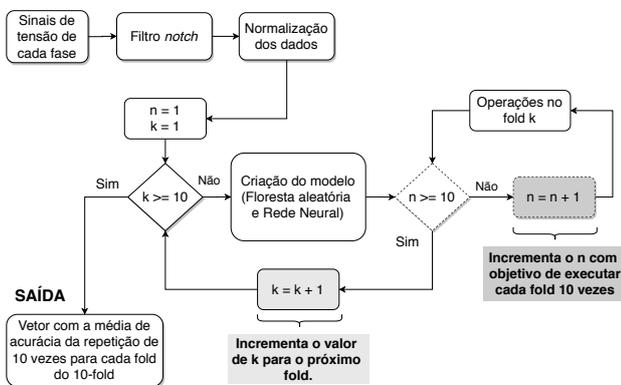


Figura 2. Fluxograma apresentando as etapas do projeto.

2.2 Florestas Aleatórias

Florestas aleatórias são uma combinação de árvores de decisão tal que cada árvore depende dos valores de um vetor aleatório amostrado independentemente e com a mesma distribuição de todas as árvores na floresta Breiman (2001). Esse é um método de classificação interessante pois pode ser usado em problemas de classificação e regressão e por ser menos suscetível ao sobre ajuste (*overfitting*) dos dados que pode ocorrer nas árvores de decisão quando elas crescem profundamente. Um problema desse método, no entanto, é a demora no treinamento dependendo da quantidade de árvores utilizadas na construção da floresta.

O modelo de floresta aleatória, validação cruzada e matriz de confusão foram implementados utilizando *Python*, para isso fez-se uso da biblioteca *scikit-learn* e algumas funções criadas para esse projeto. Na Tabela 1 pode-se observar alguns parâmetros utilizados no modelo, o significado de cada um deles e os valores utilizados. Parâmetros não apresentados na Tabela 1 foram utilizados com seus valores padrões, conforme documentação oficial do *scikit-learn* disponível em *scikit learn* (2019).

Tabela 1. Parâmetros utilizados no modelo de florestas aleatórias

Parâmetro	Significado	Valor usado
<i>n_estimators</i>	Quantidade de árvores na floresta.	50
<i>max_depth</i>	Profundidade máxima das árvores.	20
<i>min_samples_split</i>	Número mínimo de amostras necessárias para dividir um nó interno.	7
<i>min_samples_leaf</i>	Número mínimo de amostras necessárias para estar em um nó folha.	1
<i>criterion</i>	Função que mede a qualidade da divisão.	'entropy'
<i>bootstrap</i>	Todo conjunto de dados é usado para construir cada árvore.	False
<i>max_features</i>	Número de características consideradas quando procurar pela melhor divisão.	11

Antes de proceder com a validação cruzada, o conjunto de dados foi dividido da seguinte maneira: 90% treino (845 amostras) e 10% validação (94 amostras). Os dados de treinamento foram utilizados durante a validação cruzada passando por divisões sucessivas obtendo-se assim novos conjuntos de treino e teste. Dessa maneira, a divisão final do conjunto de dados foi: 80% treino, 10% teste e 10% validação.

Nesse trabalho, utilizou-se o *k-fold* estratificado (com $k = 10$) o qual cria os *folds* de tal maneira que o percentual de amostras é preservado para cada classe. Cada *fold* foi repetido 10 vezes para se obter um resultado mais preciso dada a natureza aleatória dos modelos utilizados. Foi escolhido esse número de repetições uma vez que valores maiores do que esse não apresentaram uma diferença significativa no resultado final. Por fim, o tempo total de treinamento do método de florestas aleatórias incluindo as repetições foi de 5 minutos e 19 segundos.

2.3 Rede Neural Multicamadas

A rede neural multicamada (*multilayer perceptron* – MLP) consiste de um sistema de neurônios simples interconectados, ela representa um mapeamento não linear entre um vetor de entrada e um vetor de saída. Os neurônios são conectados por pesos e sinais de saída que são uma função da soma das entradas do neurônio modificada por uma função de ativação não-linear Gardner and Dorling (1998).

Segundo Murtagh (1991), para se definir uma rede neural artificial multicamadas é necessário determinar: a sua configuração ou arquitetura (número de camadas, número de neurônios por camada, etc); a função de ativação a ser usada nos neurônios; o método de treinamento a ser utilizado; o modo de atualização dos pesos (tempo real ou *off-line*).

Tendo em vista isso que foi apresentado, nesse projeto, utilizou-se o *Keras* que é uma API (*application programming interface*) de alto nível para implementação de redes neurais em *Python*. Após alguns testes, verificou-se que os parâmetros indicados na Tabela 2 foram aqueles que apresentaram o melhor resultado para os dados em questão.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na rede neural implementada.

Parâmetro	Valor usado
Quantidade de entradas	384
Quantidade de camadas ocultas	1
Quantidade de saídas	10
Quantidade de neurônios na camada oculta	384
Inicialização dos pesos e bias	Inicialização Glorot
Função de ativação da camada oculta	Relu
Função de ativação da camada de saída	Softmax
Função de perda usada durante o treinamento	Entropia cruzada categórica
Algoritmo de treinamento utilizado	Adagrad
Taxa de treinamento utilizado	0,01
Atualização dos pesos	Off-line em lotes de 60
Quantidade de épocas	5000

Durante o treinamento da rede foi utilizada a técnica *droup-out*, ela previne a ocorrência de *overfitting* e fornece uma maneira de combinar eficientemente diferentes arquiteturas de redes neurais. Para isso, neurônios são removidos temporariamente da rede junto com todas as suas conexões de entrada e saída Srivastava et al. (2014). A escolha das unidades a serem removidas é realizada de maneira aleatória e para esse projeto escolheu-se uma taxa de 20% para remoção dos neurônios. Outra técnica utilizada foi a parada antecipada, ela também evita o sobre ajuste dos dados e é baseada no monitoramento de uma determinada métrica durante o treinamento. É realizada a constante verificação entre os conjuntos de treino e validação para averiguar se está ocorrendo melhoria ou não, interrompendo o processo no momento correto e evitando que a rede decore os dados de entrada. Por fim, o processo de validação cruzada foi conduzido de maneira similar ao que foi exposto no final da subseção 2.2. Deve-se destacar que o tempo total de treinamento da rede incluindo as repetições realizadas foi de 1 hora, 28 minutos e 36 segundos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante esse trabalho foi possível estudar e trabalhar alguns modelos de inteligência computacional. Especificamente, esse projeto tratou da aplicação de florestas aleatórias e redes neurais artificiais na classificação de faltas em linhas de transmissão. Para o primeiro modelo, obteve-se o seguinte vetor de acurácia com valores percentuais: [93.00, 89.28, 91.46, 92.46, 92.64, 93.22, 92.38, 92.05, 91.53, 91.62]. Assim a acurácia média da classificação foi de 91.96% com desvio padrão de 1.06%. Após o *k-fold*, o conjunto de validação foi utilizado no modelo para a predição em um grupo de dados não visto e foi obtida a matriz de confusão que pode ser analisada na Figura 3.

Já para o modelo de redes neurais artificiais obteve-se os seguintes valores para a acurácia: [91.78, 86.97, 88.52, 89.82, 90.26, 90.68, 89.93, 89.88, 89.02, 89.05]. Assim a acurácia média obtida pelo modelo foi de 89.59% com desvio padrão de 1.24%. O melhor modelo foi salvo durante o treinamento e utilizado posteriormente com o conjunto de testes na classificação de dados não vistos, e dessa maneira, foi obtida a matriz de confusão apresentada na Figura 4.

Na Figura 4, os valores numéricos das linhas e colunas indicam as seguintes classes: AB = 0, ABC = 1, ABT =

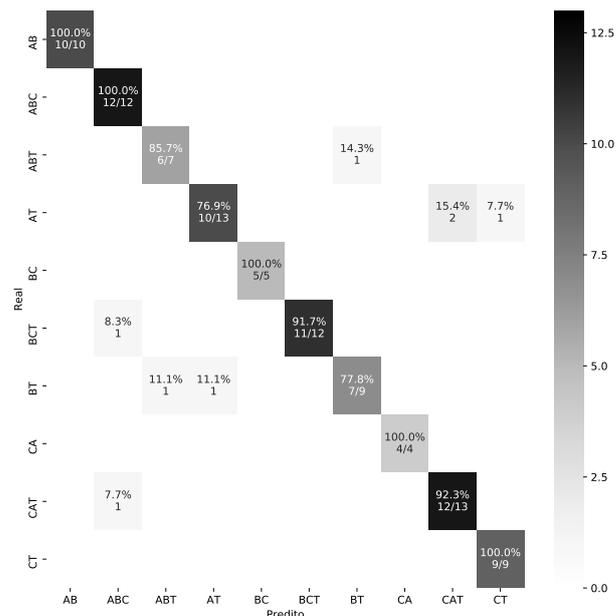


Figura 3. Matriz de confusão Florestas Aleatórias.

2, AT = 3, BC = 4, BCT = 5, BT = 6, CA = 7, CAT = 8 e CT = 9. Portanto, nota-se uma dificuldade do modelo para prever as faltas ABC e AT, em um maior nível do que as demais. Enquanto para o modelo de florestas aleatórias as classe que apresentaram classificações errôneas foram: ABT, AT, BCT, BT e CAT. Cabe destacar que os resultados obtidos pelas matrizes de confusão não são constantes nessa etapa pois não foi realizado nenhum *loop* com consequente cálculo da média e desvio padrão. Dessa maneira, em cada execução do algoritmo uma nova divisão para o banco de dados é realizada o que leva à geração de matrizes de confusão distintas.

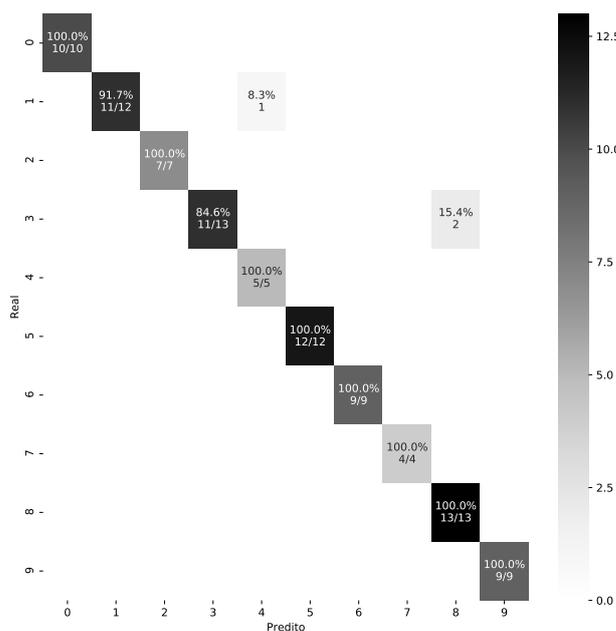


Figura 4. Matriz de confusão Rede Neural.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, utilizou-se os modelos de florestas aleatórias e redes neurais artificiais para classificação de faltas em linhas de transmissão. Tendo em vista que esse é um problema amplamente estudado na literatura, diversos autores já propuseram métodos para a realização dessa tarefa. Cabe ressaltar que os métodos utilizados no projeto proposto possuem componentes aleatórios tanto no ajuste manual dos hiperparâmetros, que foi realizado por tentativa e erro, quanto na adaptação dos parâmetros internos do modelo. Para a obtenção de resultados fidedignos busca-se eliminar essa aleatoriedade usando a repetição do laço de validação cruzada, nesse trabalho ele foi repetido 10 vezes, que pode ser considerado um número relativamente baixo. No entanto, um número maior de repetições não foi possível ser executado devido a configuração da rede neural utilizada e os recursos computacionais disponíveis, uma vez que mesmo com essa pequena quantidade de repetições o tempo de treinamento da rede foi elevado (superior a uma hora).

Após o treinamento da rede o conjunto de validação utilizado para gerar as matrizes de confusão e avaliar o desempenho final do modelo. A acurácia média obtida para o modelo de florestas aleatórias foi de 91.96% com desvio padrão de 1.06%, enquanto para a rede neural obteve-se uma média de 89.59% com 1.24% de desvio padrão. Os resultados obtidos foram comparados com outros projetos observados na literatura como ser analisado na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação entre os resultados obtidos e alguns projetos de outros autores.

Trabalho	Pré-processamento	Método	Acurácia
R. de Carvalho et al. (2014)	HOS	Redes Neurais	99%
Almeida et al. (2017)	ICA	SVM	100%
Proposto	Filtro <i>notch</i>	Redes Neurais	89,59%
Proposto	Filtro <i>notch</i>	Florestas aleatórias	91,96%

Dessa forma, comparando-se os resultados com trabalhos realizados anteriormente como em R. de Carvalho et al. (2014) e Almeida et al. (2017), o projeto aqui proposto possui uma etapa de pré-processamento computacionalmente mais eficiente tendo em vista que utilizou-se o filtro *notch* que possui menor custo computacional do que estatística de ordem superior e análise de componentes independentes que foram utilizados nos trabalhos citados. No entanto, visando a melhoria da acurácia na classificação desses dados, futuramente pretende-se realizar um comparativo entre o uso do filtro *notch* com outras técnicas no pré-processamento dos sinais. Além disso, é interessante treinar e testar outros modelos de inteligência computacional e comparar os resultados com o desempenho obtido pelas técnicas de redes neurais artificiais e florestas aleatórias propostas nesse trabalho.

Por fim, é importante destacar que os dados utilizados nesse trabalho foram gerados pelo modelo proposto por Costa et al. (2010), e que em geral os autores não disponibilizam suas fontes de dados, ou como reproduzi-los o que dificulta a comparação direta com trabalhos disponíveis na literatura. Ainda deve-se ressaltar que os métodos de inteligência computacional, podem se beneficiar da paralelização, uso de múltiplos processadores ou GPUs (*Graphics Processing Unit*), dessa maneira, o tempo de treinamento

encontrado por outros trabalhos de pesquisa na literatura podem diferir dos que foram obtidos nesse trabalho. Além disso, essa não é uma informação comumente apresentada de maneira direta ou simplificada por artigos da área. No entanto, no contexto do trabalho proposto os resultados foram satisfatórios principalmente em relação ao tempo de treinamento do modelo de florestas aleatórias.

REFERÊNCIAS

- Almeida, A.R., Almeida, O.M., Junior, B.F., Barreto, L.H., and Barros, A.K. (2017). ICA feature extraction for the location and classification of faults in high-voltage transmission lines. doi:10.1016/j.epsr.2017.03.030.
- Avagaddi, P., Edward, B., and Ravi, K. (2017). A review on fault classification methodologies in power transmission systems: Part i. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 5. doi:10.1016/j.jesit.2017.01.004.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324. URL <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Costa, F., Souza, B., and Brito, N. (2010). Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines. *Electronics Letters*, 46, 753 – 755. doi:10.1049/el.2010.0812.
- Das, D., Singh, N.K., and Sinha, A.K. (2005). A comparison of fourier transform and wavelet transform methods for detection and classification of faults on transmission lines. *2006 IEEE Power India Conference*, 2005, 620–626. doi:10.1109/POWERI.2006.1632580.
- Ferreira, D.D. (2010). *Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência*. Ph.D. thesis, UFRJ/COPPE.
- Gardner, M. and Dorling, S. (1998). Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, 32(14), 2627 – 2636. doi: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00447-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00447-0). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231097004470>.
- Kumar, S.K., SwamyR, M., and Venkatesh, V. (2014). Artificial Neural Network Based Method for Location and Classification of Faults on a Transmission Lines. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(1), 2250–3153. URL www.ijsrp.org.
- Murtagh, F. (1991). Multilayer perceptrons for classification and regression. *Neurocomputing*, 2(5), 183 – 197. doi:[https://doi.org/10.1016/0925-2312\(91\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0925-2312(91)90023-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925231291900235>.
- R. de Carvalho, J., V. Coury, D., Duque, C., and F. Paula, B. (2014). A new transmission line protection approach using cumulants and artificial neural networks. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 25. doi: 10.1007/s40313-013-0101-7.
- Saravanan, N. and Rathinam, A. (2012). A comparative study on ANN based fault location and classification technique for double circuit transmission line. *Proceedings - 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2012*, 824–830. doi:10.1109/CICN.2012.15.
- scikit learn (2019). Random forest classifier. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/>

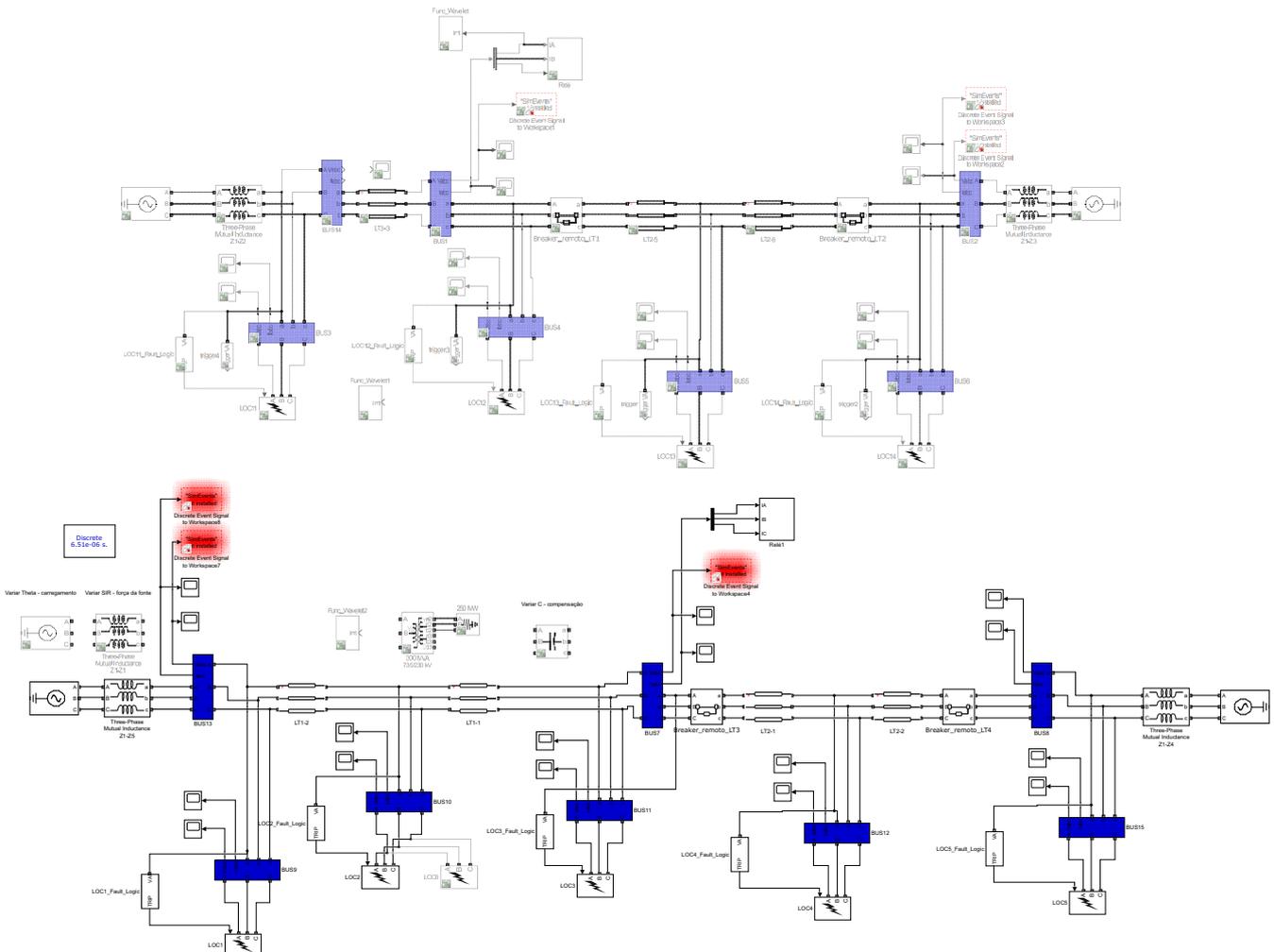


Figura 5. Diagrama do sistema elétrico analisado nesse projeto.