

APLICAÇÃO DO ZERO-PADDING À TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER NA ANÁLISE DE COMPONENTES INTER-HARMÔNICOS PARA A DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

LUIZ H. P. C. TRONDOLI, JOSÉ C. M. VIEIRA JÚNIOR

*Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade de São Paulo*

Caixa Postal 400, 13566-590, São Carlos, SP.

E-mails: luiz.trondoli@usp.br, jcarlos@sc.usp.br

Abstract— High impedance faults caused by a high voltage conductor touching the ground in distribution systems may lead to electrical arc. This phenomenon causes the fault current to be non-linear and inject harmonic and inter-harmonic components into the system. Its detection is usually performed by a frequency component analysis. For this purpose, spectral decomposition can be performed by using Fourier transform, in which, for a fixed window, presents fixed resolution. This work investigates the use of zero-padding in fixed size window in order to vary transform resolution without the need of modifying the window length. Application results show that it is possible to analyze frequencies whose values are not integer multiples of the resolution frequency on the fixed window, producing the greatest relative error of 0,022% for the 300 Hz component amplitude. The results suggest that it is possible to study high impedance fault detection with shorter data windows.

Keywords— High impedance fault, power distribution systems, discrete Fourier transform, harmonics, inter-harmonics, zero-padding.

Resumo— Em sistemas de distribuição, faltas de alta impedância causadas pelo contato de um condutor da rede primária no solo ocasionam o surgimento de arcos elétricos. Este fenômeno faz com que a corrente de falta seja não linear e apresente em seu espectro de frequências componentes harmônicos e inter-harmônicos. A detecção do defeito passa pela análise destes componentes. Para este fim, uma das ferramentas mais utilizadas é transformada discreta de Fourier, na qual, para uma janela de dados de tamanho fixo, apresenta resolução em frequência também fixa. Este trabalho investiga o uso da técnica de *zero-padding* em janelas de comprimento fixo, com o objetivo de variar a resolução em frequência da transformada sem que haja a necessidade da modificação do tamanho da janela. O resultado da aplicação da técnica mostrou ser possível analisar componentes cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência de resolução imposta pela janela analisada, apresentando maior erro relativo de 0,022%, na amplitude do componente de 300 Hz. Como consequência, foi possível o uso de uma janela de dados reduzida. Estes resultados sugerem a possibilidade de se estudar a detecção de faltas de alta impedância utilizando janelas de dados mais curtas.

Palavras-chave— Falta de alta impedância, sistemas de distribuição de energia elétrica, transformada discreta de Fourier, harmônicos, inter-harmônicos, *zero-padding*.

1 Introdução

A detecção das Faltas de Alta Impedância (FAI) continua sendo, ainda hoje, um dos problemas mais desafiadores no ramo da engenharia elétrica devido à dificuldade de detecção e distinção confiável de outros fenômenos (Chen et al., 2013; Mai et al., 2012; Arias, 2015). Estima-se que de um terço à metade das faltas provocadas por rompimento de condutores sejam faltas de alta impedância (Sedighizadeh et al., 2010) e que estes eventos causem em média 54 mortes ao ano (Oliveira Junior, 2006). Ainda, a maioria dos incêndios de origem elétrica é originada em decorrência dos arcos elétricos produzidos por FAI (Nakagomi, 2006).

Devido à presença do arco elétrico, a corrente de falta apresenta característica não linear e compreende vasta faixa de frequência em seu espectro, contendo componentes harmônicos e inter-harmônicos, de frequências pares e ímpares. Destas, compõem a corrente de falta as baixas frequências, menores que 2 kHz (Benner et al., 1989; Aucoin & Russell, 1989), e as altas frequências, maiores que 2 kHz e menores que 10 kHz (Aucoin, 1985; Girgis et al., 1990). Esta ex-

pressiva quantidade de informações pode ser utilizada, não só para detectar o defeito, como para diferenciá-lo de outros fenômenos comuns à operação da rede, a exemplo do chaveamento de banco de capacitores e energização de transformadores.

Para a extração dos componentes de frequência, uma das ferramentas utilizadas é a Transformada Discreta de Fourier (TDF). Este trabalho propõe e discute seu uso em conjunto com a técnica de *zero-padding* (Weeks, 2012), com o objetivo de possibilitar a análise em frequência de modo detalhado, por meio da variação da frequência de resolução, sem que haja a necessidade de que seja modificado o comprimento da janela de dados. Com isso, pretende-se não só poder variar a resolução em frequência e melhorar o detalhamento espectral, como reduzir o tempo de detecção das FAI com a redução da janela de dados. Como será visto na seção 4, a aplicação da técnica permitiu a redução da janela em metade do comprimento.

O trabalho está dividido em cinco seções. A partir desta, a segunda seção apresentará as características das faltas de alta impedância. A terceira seção analisa a TDF e a técnica de *zero-padding*. Para demonstrar a aplicabilidade da ferramenta, a seção quatro investiga um estudo de caso aplicado a faltas de alta impe-

dância. As conclusões e considerações são apresentadas na quinta seção.

2 Faltas de Alta Impedância

As FAI podem ocorrer quando um condutor, em geral da rede primária, entra em contato com uma superfície quase isolante (Mai et al., 2012). Devido à elevada resistência, não há incremento significativo na magnitude da corrente e, portanto, esta condição de defeito não pode ser identificada por dispositivos de proteção convencionais, tais como relés de sobre-corrente e fusíveis (Sedighi et al., 2005). Existem diversos tipos de faltas de alta impedância que podem ocorrer no sistema elétrico, a exemplo do toque de uma árvore no condutor ou a causada por falhas em isoladores. A que oferece maior risco à vida é a causada pelo rompimento de um condutor da rede primária, que venha a tocar o solo, uma vez que o condutor permanece energizado e o arco elétrico pode vir a causar incêndios. É reportado que os relés para detecção de FAI detectam apenas 50 a 60% destes eventos e que estas faltas podem permanecer por horas e até mesmo dias (Nam et al., 2001; Depew et al., 2006).

As faltas de alta impedância são resultado de interações complexas (Sultan et al., 1994) que envolvem a não linearidade do arco, interface entre o condutor e o solo, a capacidade térmica do meio, umidade, salinidade e temperatura do solo, produção de fumaça, reações químicas com o meio e o tipo do solo.

No instante em que o cabo toca o solo, o campo elétrico ao redor da superfície de contato é modificado, causando a aceleração de elétrons no meio. Estes elétrons ionizam moléculas ao seu redor que, por sua vez, ionizam outras moléculas. Este fenômeno ocorre numa fração de segundos, diminuindo a impedância do caminho ionizado e permitindo a formação do arco elétrico e passagem de corrente, caracterizando um evento conhecido como avalanche. Este processo causa o surgimento de harmônicos ímpares no sistema durante a falta (Emanuel et al., 1990). A umidade do meio ou a presença de sílica no solo causam assimetria entre os semiciclos positivo e negativo da corrente, resultando no surgimento do componente de segundo harmônico (Emanuel et al., 1990). Ainda sobre o arco elétrico, antes de se consolidar, ou seja, da estabilização de um caminho ionizado que permita o estabelecimento de corrente, pode haver um fenômeno chamado de intermitência ou centelhamento, que é o início do processo de formação do arco, mas que logo é cessado, sem que decorra a avalanche. Este efeito, que pode ocorrer repetidas vezes até que o arco se forme, é responsável pela geração de componentes harmônicos de alta frequência (Nakagomi, 2006).

Outra característica encontrada nas FAI é o aparecimento de uma envoltória crescente na forma de onda de corrente. Este fenômeno é causado pelo aumento

da amplitude da corrente até seu valor máximo (Fanucchi, 2014). O nome que se dá a este fenômeno é *build-up*. A corrente de falta também apresenta componentes inter-harmônicos. Eles podem ser explicados como o resultado da variação da resistência do arco, que rearranja as características dos caminhos de falta ao seu redor. Devido à aleatoriedade deste processo, há oscilação da amplitude de corrente a cada ciclo (Sultan et al., 1994).

Em síntese, o espectro de corrente de uma FAI é composto por sinais de alta e baixa frequência, com harmônicos pares, ímpares e componentes inter-harmônicos, além de apresentar comportamento aleatório.

2.1 Estudo do Espectro de Frequências das Faltas de Alta Impedância

Com o objetivo de gerar sinais sintéticos que possuam frequências contidas nas correntes de FAI, serão estudados dados extraídos de sinais reais, os quais servirão de base para o trabalho. A Tabela 1 apresenta a conclusão dos resultados dos trabalhos de (Nam et al., 2001; Kim & Don Russell, 1988; Emanuel et al., 1990) nos quais foram estudados os componentes harmônicos mais significativos em FAI. Nesta tabela, os valores dos harmônicos são expressos como porcentagem da amplitude do componente fundamental.

Tabela 1. Faixa de Valores de Amplitude dos Componentes Harmônicos Mais Significativos da Corrente de FAI.

Ordem Harmônica	Valor Mínimo (Expresso como % do fundamental)	Valor Máximo (Expresso como % do fundamental)
1	100,0	100,0
2	0,14	6,70
3	0,83	15,0
4	0,16	0,87
5	0,35	4,50
6	0,24	0,75
7	1,00	2,30
9	0,50	1,10
11	0,38	0,73
13	0,19	0,37

Além dos componentes harmônicos, as FAI também geram componentes inter-harmônicos que, como explicado, são resultado da variação da resistência do arco ao longo do tempo. Este processo é aleatório e, portanto, estas frequências não têm valores de amplitude característicos. Apesar disso, trabalhos identificaram existência recorrente de algumas delas. As faixas de valores próximos ao do componente fundamental que apresentam significativa presença durante a FAI possuem valores entre 40 a 56 Hz e 64 a 80 Hz (Carvalho et al., 2015). Em Russell et al. (1988) foi observada presença das frequências: 30, 90, 150 e 210 Hz. Em (Aucoin & Russell, 1987), foram observadas 150 e 270 Hz.

Segundo (Kim & Don Russell, 1988), acima do 16º componente, as frequências possuem baixa amplitude e começam a se comportar como ruído branco. Ainda, bancos de capacitores proporcionam um caminho de baixa impedância a estes ruídos, atenuando sua presença no sistema elétrico. Posto isso, as altas frequências são menos utilizadas na detecção de FAI.

Do espectro apresentado, os componentes harmônicos de baixa frequência são bons indicadores do fenômeno, porém, cargas não lineares, comuns aos sistemas elétricos, também injetam estes componentes, por isso, associada a estes, a análise dos componentes inter-harmônicos é de fundamental importância na detecção da FAI, pois auxilia na distinção do fenômeno.

3 A Transformada Discreta de Fourier e a Técnica de Zero-Padding na Análise de Componentes Inter-Harmônicos

Estudadas as características do espectro de frequências de uma falta de alta impedância, passa-se à etapa da análise do sinal, ou seja, extrair estes componentes. Para este fim, será utilizada a transformada discreta de Fourier, mostrada na Equação 1.

A teoria apresentada nesta seção é coberta em detalhes em (Weeks, 2012) e (Oppenheim et al., 1999).

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\pi nm/N} \quad (1)$$

Sendo:

- $X[m]$: Sinal no domínio da frequência.
- $x[n]$: Sinal no domínio do tempo.
- N : Número de amostras do sinal.

A resolução em frequência desta transformada, ou seja, o incremento em frequência entre dois senos ou cossenos correlacionados com o sinal, é dado pela Equação 2.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2)$$

Sendo:

- f_s : Frequência de amostragem do sinal.
- N : Número de amostras do sinal.

Um equipamento de medição, seja um relé ou um analisador de qualidade de energia cuja taxa de aquisição seja de P pontos por ciclo, analisando o sinal durante C ciclos, em uma rede com frequência de 60 Hz, possui resolução em frequência dada pela Equação 3, derivada da Equação 2.

$$\Delta f = \frac{60 \cdot P}{C \cdot P} = \frac{60}{C} \quad (3)$$

Conclui-se que a resolução em frequência independe da frequência de amostragem, mas depende do número de ciclos lidos do sinal. Para um sinal de um ciclo a resolução é de 60 Hz, o que significa que é possível ler frequências múltiplas desta, como: 0, 60, 120, 180 Hz. Vale ressaltar que, apesar da frequência de resolução ser independente da frequência de amostragem, esta última deve respeitar o critério de amostragem de Nyquist, o qual afirma que a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, o dobro do valor da máxima frequência contida no sinal analisado. Posto isso, para a análise de frequências inter-harmônicas, é necessário que sejam analisadas janelas com maiores números de ciclos. A exemplo, se necessário uma análise de frequências distantes em 0,5 Hz, segundo a Equação 3, são necessários 120 ciclos. Isso torna a detecção da FAI lenta, principalmente em etapas nas quais se deseja confirmar a presença de falta pela persistência de componentes inter-harmônicas em tempo real, não sendo interessante utilizar valores do sinal de corrente armazenados em ciclos anteriores, mas valores atuais, decorrentes do defeito. Portanto, é preciso que se utilize uma ferramenta capaz de analisar o espectro em poucos ciclos. Para este fim será apresentada a técnica de *zero-padding*. Esta técnica consiste em concatenar valores nulos ao vetor de sinal amostrado no tempo, neste caso, a corrente de falta. Com isso, mantém-se a frequência de amostragem elevando o número de pontos que serão passados como entrada para a TDF. Como consequência, a saída da TDF também possuirá mais pontos, reduzindo a diferença de valor das frequências de análise adjacentes, de acordo com a Equação 2. Essa técnica permite então analisar frequências que não são múltiplas inteiras da frequência de resolução obtida com a janela de dados lida.

Esta análise não altera o resultado da TDF já que a correlação do sinal com os senos e cossenos da transformada tem valor nulo nas amostras nulas. Porém, com o aumento do número de pontos, a correlação de senos e cossenos com o sinal, desde o componente de frequência nulo até a frequência de amostragem, apresentará passo de frequência menor do que se a entrada da TDF fosse o sinal sem zeros, resultando em uma análise mais detalhada do espectro, como será demonstrado na seção 4.

4 Aplicação do Zero-Padding na TDF para a Análise do Espectro de Frequências de Falta de Alta Impedância

4.1 Aplicação da Ferramenta em Sinal Sintético

Para demonstrar a utilidade da ferramenta serão gerados sinais sintéticos amostrados à taxa de 512

pontos por ciclo, ou 30720 Hz. O primeiro possui apenas uma frequência, de 270 Hz, amplitude de 10 A, janela retangular de 1 ciclo e, portanto, segundo a Equação 3, resolução em frequência de 60 Hz. A Figura 1 exibe o resultado da TDF deste sinal. Ela revela que não é possível encontrar este componente, que se situa entre as frequências de 240 Hz e 300 Hz, acarretando em erro nos valores de amplitude e frequência no resultado da TDF.

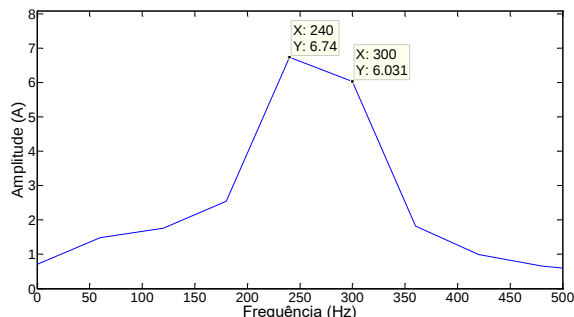


Figura 1. TDF do sinal de 270 Hz com resolução de 60 Hz em janela retangular de 1 ciclo.

A proposta deste trabalho é corrigir este erro sem ter que aumentar o tamanho da janela de dados. Para isto, a este sinal será aplicada a técnica de *zero-padding*. Isso será feito, como explicado na seção 3, concatenando zeros ao final do vetor do sinal amostrado no domínio do tempo, que, por estar sendo lido em janela de um ciclo, possui 512 pontos. A resolução desejada é de 30 Hz, para obtê-la será necessário concatenar 512 zeros ao fim do sinal, para que o número total de pontos passados à TDF seja suficiente (1024 pontos) para atingir tal resolução, mantendo-se a mesma frequência de amostragem. A Equação 4 exibe este resultado.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{512 \cdot 60}{512 \cdot 512} = 30 \text{ Hz} \quad (4)$$

Sem esta técnica, seria necessário ler uma janela de dados de 2 ciclos, como mostrado da Equação 3. Neste caso, apenas 1 ciclo foi necessário. A Figura 2 mostra que, a técnica corrigiu o erro em frequência e amplitude.

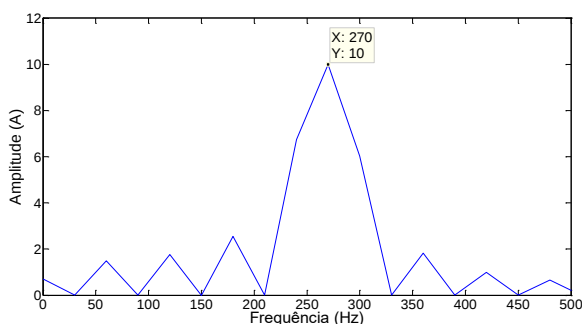


Figura 2. TDF do sinal de 270 Hz, concatenado com 512 zeros, com resolução de 30 Hz em janela retangular de 1 ciclo.

Deste resultado é visível o surgimento de valores não nulos ao lado do lóbulo da frequência principal. Eles são chamados de lóbulos secundários ou laterais e são resultado do cálculo da TDF perto das bordas do sinal no domínio do tempo, onde a transição entre o início e o fim da janela é descontínua. Para reduzir estes lóbulos, que podem influenciar os componentes adjacentes de frequência, será utilizada no lugar da janela retangular, a janela de Blackman (Harris, 1978), que suaviza esta descontinuidade. A Figura 3 mostra o mesmo sinal analisado na Figura 2, agora calculado com a janela de Blackman, aplicada antes do *zero-padding* e da TDF.

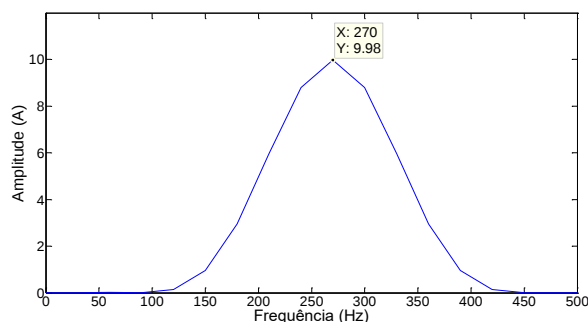


Figura 3. TDF do sinal de 270 Hz, concatenado com 512 zeros, com resolução de 30 Hz em janela de Blackman de 1 ciclo.

Apesar do erro introduzido pela janela, neste caso 0,2% na amplitude do sinal, os lóbulos laterais foram reduzidos.

4.2 Aplicação em Faltas de Alta Impedância

Para completar o objetivo deste trabalho será desenvolvida a aplicação das ferramentas apresentadas com o propósito de analisar sinais de corrente resultantes de faltas de alta impedância. Para este fim, será gerado um sinal sintético contendo frequências harmônicas e inter-harmônicas presentes em faltas de alta impedância estudados na seção 2. Os valores de frequências e amplitudes do sinal são, respectivamente: 30 Hz/4 A, 60 Hz/100 A, 80 Hz/5 A, 120 Hz/6 A, 150 Hz/3 A, 180 Hz/15 A, e 300 Hz/4,5 A. Ainda, será adicionada a frequência de 212 Hz /3 A, com a intenção de forçar a necessidade de maior detalhe em frequência.

Para que a TDF deste sinal possa se correlacionar com todos estes sinais é necessária uma resolução em frequência de 2 Hz, que é o máximo divisor comum das frequências. Segundo a Equação 3 são necessários 30 ciclos do sinal para atingir esta resolução. Esta janela será reduzida para 15 ciclos. A resolução seria então de 4 Hz. Para atingir a resolução desejada (2 Hz) serão concatenados 7680 zeros à janela lida. A Equação 5 mostra o cálculo da resolução.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{512 \cdot 60}{512 \cdot 15 + 7680} = 2 \text{ Hz} \quad (5)$$

Como previsto, a resolução de 2 Hz é alcançada. Ainda, como no sinal de 270 Hz, será aplicada a janela de Blackman para a redução dos lóbulos laterais. A Figura 4 exibe o resultado da TDF do sinal.

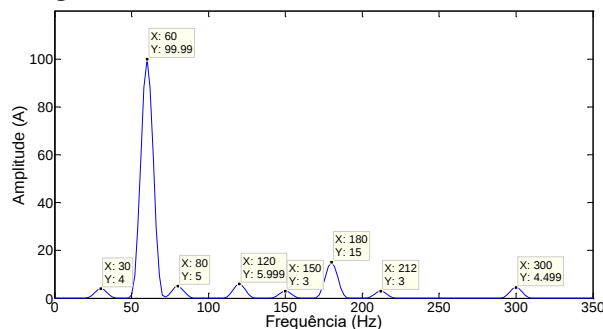


Figura 4. TDF do sinal de FAI, concatenado com 7680 zeros, com resolução de 2 Hz em janela de Blackman de 15 ciclos.

Com o uso das técnicas apresentadas, a decomposição espectral do sinal sintético de falta de alta impedância apresentou valores de frequência exatos. A amplitude apresentou pequenos desvios, sendo o maior erro relativo de 0,022%, para a frequência de 300 Hz.

5 Conclusão

O resultado da aplicação da técnica de *zero-padding* em conjunto com a transformada discreta de Fourier demonstrou a capacidade do método em observar componentes cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência de resolução imposta pela janela analisada. Como consequência, foi possível analisar frequências harmônicas e inter-harmônicas com o uso de uma janela reduzida, no caso, para a metade do comprimento, apresentando maior erro relativo de 0,022% para a maior frequência (300 Hz). Este resultado indica a técnica como sendo uma ferramenta útil na detecção de faltas de alta impedância, a qual pode servir como base de estudo para futuros trabalhos e investigações.

Sua aplicação em sinais reais pode necessitar de etapas de pré-processamento do sinal, a exemplo da utilização de filtros. Estes sinais serão objeto de futuros estudos, nos quais se pretende investigar o uso do *zero-padding* aplicado a sinais medidos em experimentos de faltas reais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à fundação CAPES e ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (EESC/USP).

Referências Bibliográficas

- Arias, J.C.G., (2015). Identificação de Faltas de Alta Impedância em Redes Aéreas Multiterradas. Universidade de São Paulo.
- Aucoin, B.M. & Russell, B.D., (1989). Detection of incipient and low current faults in electric distribution systems (of spacecraft). *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, pp.153–158.
- Aucoin, M., (1985). Status of High Impedance Fault Detection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(3), pp.637–644.
- Aucoin, M. & Russell, B.D., (1987). Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals near 60 HZ. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(2), pp.342–348.
- Benner, C., Carswell, P. & Don Russell, B., (1989). Improved algorithm for detecting arcing faults using random fault behavior. *Electric Power Systems Research*, 17(1), pp.49–56.
- Carvalho, D. et al., (2015). Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(16), pp.2593–2601.
- Chen, J.C. et al., (2013). Study on high impedance fault arcing current characteristics. *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, (October), pp.1–6.
- Depew, A.C. et al., (2006). Field Experience with High-Impedance Fault Detection Relays. *2005/2006 PES TD*, pp.868–873.
- Emanuel, A.E. et al., (1990). 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*, 5(2), pp.676–686.
- Fanucchi, R.Z., (2014). A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais. , p.176.
- Girgis, A.A., Chang, W. & Makram, E.B., (1990). Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(4), pp.1714–1724.
- Harris, F.J., (1978). On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proc. IEEE*, 66(1), pp.51–83.
- Kim, C.J. & Don Russell, B., (1988). Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. *Electric Power Systems Research*, 14(3), pp.219–225.
- Mai, W., Phung, B.T. & Ambikairajah, E., (2012). Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks. *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, pp.562–567.
- Nakagomi, R.M., (2006). Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição.

- Nam, S.R. et al., (2001). A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting.*, 2(C), pp.1175–1180 vol.2.
- Oliveira Junior, D.A. de, (2006). Faltas De Alta Impedância: Detecção E Localização De Rompimento De Condutores Em Circuito Primário De Redes Aéreas De Distribuição Baseado Em Desequilíbrio De Tensão.
- Oppenheim, A. V., Schafer, R.W. & Buck, J.R., (1999). *Discrete-Time Signal Processing* Second., New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Russell, B.D., Chinchali, R.P. & Kim, C.J., (1988). Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(4), pp.1485–1492.
- Sedighi, A.-R. et al., 2005. High Impedance Fault Detection Based on Wavelet Transform and Statistical Pattern Recognition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(4), pp.2414–2421.
- Sedighizadeh, M., Rezazadeh, A. & Elkalashy, N.I., (2010). Approaches in High Impedance Fault Detection - A Chronological Review. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 10(3), pp.114–128.
- Sultan, A.F., Swift, G.W. & Fedirchuk, D.J., (1994). Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1), pp.461–470.
- Weeks, M., (2012). *Processamento Digital de Sinais Utilizando Matlab e Wavelets*. 2nd Ed., LTC.