



## Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

### Um método baseado em tensão para detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição

IGOR KURSANCEW KHAIRALLA(1); MIGUEL MORETO(2); ARLAN LUIZ BETTIOL(3); DOUGLAS BARBONAGLIA SATHLER FIGUEIREDO(3); CELESC(1); UFSC(2); A VERO DOMINO(3);

#### RESUMO

Este trabalho aborda a detecção de faltas de alta impedância em redes elétricas de distribuição com base em um método de detecção através de sinais de tensão, que utiliza a transformada de Park para agregação dos sinais das três fases em apenas um sinal (tensão de eixo direto) e posterior análise de transitório com a transformada *wavelet*. A partir deste ponto, o sinal em destaque é avaliado por um algoritmo adaptativo, o qual é responsável por determinar se há ou não a ocorrência de falta de alta impedância, diferenciando-a principalmente dos transitórios envolvendo os aspectos de qualidade de energia elétrica.

#### PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de distribuição, detecção de faltas de alta impedância, transformada *wavelet*, transformada de Park.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) encontram-se constantemente sujeitos a condições que possibilitam a ocorrência de faltas. Estas faltas comumente provocam um aumento considerável da corrente fornecida ao sistema que, em geral, pode ser detectado por relés convencionais (eletromecânicos e/ou digitais) de sobrecorrente. Porém, uma Falta de Alta Impedância (FAI) consiste em um tipo particular de curto-circuito na rede elétrica, caracterizado pelo contato de um condutor energizado com uma superfície de elevada resistência elétrica, que resulta em correntes pouco significativas para a atuação dos dispositivos de proteção por sobrecorrente. A maior incidência de FAIs ocorre em sistemas elétricos com tensões menores ou iguais a 15 kV. Os problemas relacionados à ocorrência de FAI são menores em sistemas elétricos com níveis de tensão superiores a 25 kV, mas podem ocorrer igualmente em sistemas elétricos com tensão superiores. Por esta razão, o escopo deste trabalho é dirigido aos sistemas de distribuição de energia elétrica, particularmente aos sistemas de Média Tensão de distribuição aéreos, cujos níveis de tensão no Brasil são de 13,8 a 34,5 kV.

Sabe-se que as faltas de alta impedância são de grande interesse para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, pois, apesar da vasta literatura disponível, o problema ainda não pode ser considerado como tecnicamente resolvido, dada a dificuldade de se detectar as correntes de baixas magnitudes ocasionadas por esse tipo de ocorrência. Com isso, os dispositivos tradicionais de proteção empregados nos alimentadores de distribuição não são capazes de detectar esses defeitos. Como consequência direta das FAI, podem-se citar os riscos à população, aos seres vivos e às propriedades devido à presença de condutores energizados em contato com o solo ou objetos (em geral, galhos de árvores). A relevância do tema em estudo é ilustrada na Figura 1.



FIGURA 1 – Conductor rompido energizado em contato com asfalto, caracterizando uma FAI.

## 2.0 - DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

### 2.1 Modelagem da falta de alta impedância

O modelo de FAI foi adotado segundo a proposta de EMANUEL *et al.* (1990), cujo trabalho baseou-se na realização de testes de campo e de laboratório. Em tais testes foram medidas, com um oscilógrafo, as tensões e correntes produzidas por FAI controladas, sendo que, a partir destes experimentos, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A corrente de falta não é simétrica, já que o semiciclo positivo é maior do que o semiciclo negativo;
- Uma assimetria é notada na tensão de arco, sendo menor no semiciclo positivo do que no semiciclo negativo;
- Uma assimetria também sempre que a presença de arco elétrico no solo foi detectada, estas características são mantidas para quaisquer valores de corrente.

Visando reproduzir as características acima citadas, foi idealizado o modelo apresentado na Figura 2. Neste modelo, o arco é modelado com duas fontes DC de valores  $V_P$  e  $V_N$  conectadas em forma antiparalela por meio de dois diodos ideais. Durante o semiciclo positivo, a corrente flui por  $V_P$  enquanto que no semiciclo negativo passa por  $V_N$ . Para os propósitos práticos, os valores de  $V_P$  e  $V_N$  são independentes, tanto da geometria do eletrodo em contato com o solo quanto do seu material (cobre, alumínio ou ferro). Entretanto, a compactação, porosidade e umidade do solo possuem um efeito notável sobre os valores de  $V_P$  e  $V_N$ . Solos secos e/ou menos densos dão lugar a valores maiores destas grandezas.

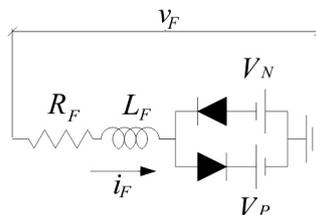


FIGURA 2 – Modelo de falta de alta impedância utilizado.

### 2.2 Algoritmo desenvolvido para detecção de faltas de alta impedância

O algoritmo proposto neste trabalho para detecção de falta de alta impedância está ilustrado na Figura 3 e é composto por três blocos:

- Bloco 1 – Filtragem do Sinal: representa a utilização das técnicas de filtragem dos sinais em estudo, através das transformadas de Park e wavelet;
- Bloco 2 – Algoritmo adaptativo: representa a parte principal do método proposto, o qual é responsável por determinar se há a ocorrência de falta de alta impedância a partir do sinal  $dt$ , que é o sinal de saída do Bloco 1 e está composto principalmente por transitórios em destaque;
- Bloco 3 – Definição da seletividade: através da detecção da falta de alta impedância do Bloco 2, parte-se então para identificação se a falta de alta impedância detectada está na zona de proteção do equipamento de proteção em análise.

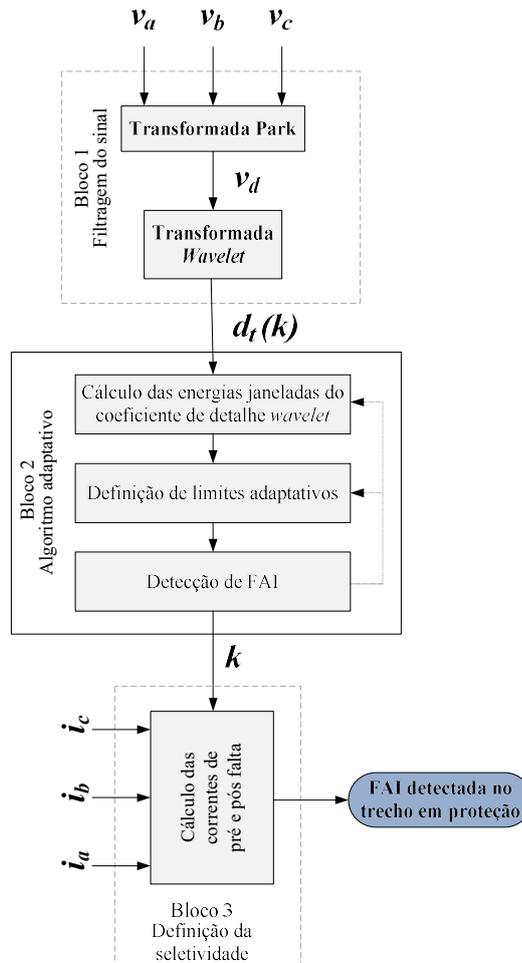


FIGURA 3 – Algoritmo adaptativo proposto.

### 2.2.1 Bloco 1 – Filtragem do Sinal

As variáveis de entrada são os sinais de tensão das três fases ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ) obtidos através de simulações de equipamento de proteção do sistema de distribuição, cujos respectivos valores são calculados em sistema por unidade (pu), utilizando como base o valor RMS (*root mean square*) dos dois primeiros ciclos do sinal da fase B. A primeira etapa destaca-se pela utilização da transformada de Park dos sinais de tensão das fases, resultando em novos sinais ( $v_d$  - tensão de eixo direto,  $v_q$  - tensão de eixo em quadratura), dos quais apenas o sinal  $v_d$  será aproveitado, conforme detalhado anteriormente. Logo, como o sinal  $v_d$  possui harmônicos indesejados devido ao desbalanceamento do sistema e/ou interferências eletromagnéticas de sinais, é necessário incluir uma etapa de filtragem para destacar apenas os transitórios e o ruído inerente aos sinais monitorados. Utiliza-se então a transformada wavelet discreta, que com a utilização da função base *db 4*, realizará a filtragem do sinal  $v_d$ , resultando em dois sinais, o de aproximação  $a1$  e o de detalhe  $dt$ . Apenas o segundo sinal será utilizado prosseguindo com o processo, visto que é o sinal que destacará a presença de transitórios comuns ao SEP.

### 2.2.2 Bloco 2 – Algoritmo adaptativo

O Bloco 2 representa a etapa principal do trabalho. Esta etapa é responsável por determinar se há a ocorrência de falta de alta impedância a partir do sinal  $dt$ , que está composto unicamente por ruído e transitórios. Vale ressaltar que se inexistisse ruído no sinal, a detecção seria simples visto que qualquer valor diferente de zero seria um transitório. Entretanto, como nos casos práticos reais o ruído é inevitável, o algoritmo de detecção deve considerar obrigatoriamente esta característica, a qual é geralmente feita pela fixação de algum limiar. O problema que decorre ao se considerar um limiar fixo é que previamente deve ser realizado um estudo visando conhecer os níveis normais de ruído presentes no sistema, porém ainda assim, se este nível de ruído varia por alguma razão, o limiar fixado pode não funcionar como deveria. Portanto, a definição de um limiar confiável é de primordial importância no desenvolvimento de um método de detecção, sendo neste algoritmo definido um limiar que automaticamente se adapta aos níveis de ruído presentes no sinal de detecção. Desta forma, o método proposto pelo algoritmo adaptativo conta com as seguintes situações:

- Calcular a energia da janela da amostra do sinal  $d_t$ , seguindo COSTA *et al.* (2009) conforme equação (1):

$$\varepsilon(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\frac{\Delta k}{2}} d_t^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \frac{\Delta k}{2} \\ \sum_{n=k-\frac{\Delta k}{2}+1}^k d_t^2(n), & \text{se } \frac{\Delta k}{2} \leq k \leq \frac{k_T}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

onde  $k = \{1, 2, \dots, k_T/2\}$ ,  $k_T$  é o número total de amostras do sinal original, e  $\Delta k$  é o tamanho da janela, que é definido pela divisão da frequência de amostragem do sinal ( $f_s = 15360 \text{ Hz}$ ) pela frequência fundamental do sinal original ( $f = 60 \text{ Hz}$ ). Isso corresponde a uma janela de um ciclo da frequência fundamental;

- b. Com base nos valores das energias das janelas das amostras dos dois primeiros ciclos, o algoritmo adaptativo calcular os limiares adaptativos para o valor limite da máxima energia em regime normal de operação (SANTOS *et al.*, 2013) e o valor considerado para variação brusca de energia:

$$\varepsilon_{M\acute{a}xima} = (1 + \delta) \cdot \max\{\varepsilon_{anteriores}\}, \quad (21)$$

$$\Delta\varepsilon(k) = \max\{\varepsilon_{anteriores}\} - \min\{\varepsilon_{anteriores}\}, \quad (2)$$

onde  $\max(\varepsilon_{anteriores})$  é o máximo valor e  $\min(\varepsilon_{anteriores})$  é o mínimo valor do conjunto de energias das janelas das amostras calculadas nos dois primeiros ciclos e  $\delta$  é a margem de tolerância, a qual é fixada neste trabalho em 10%;

- c. A cada novo valor de energia da janela da amostra calculada, verifica-se a diferença de energia entre valores consecutivos e o valor limite de variação, conforme a equação (4):

$$\Delta\varepsilon(k) = \varepsilon(k) - \varepsilon(k - 1) \quad (4)$$

- d. Então, varrem-se as amostras do sinal em estudo e continuamente verifica-se se os valores de energia da janela e da diferença de energias da amostra  $k$  ultrapassam os limiares definidos pelo regime normal de operação. Caso seja verificada esta situação, é definida a amostra  $k$  em análise:
- Logo, realiza-se novo cálculo da energia da janela da amostra de um ciclo após a detecção do transitório;
  - Tal valor é comparado com energias das janelas das amostras de um ciclo, não deslizantes, após 200 milissegundos da amostra de detecção do transitório;
  - Devido às características intrínsecas da falta de alta impedância, se os valores de energia da janela da amostra calculada são superiores de um coeficiente de confiança, definido em 50%, considera-se que é uma FAI. Esta metodologia proposta também condiz com as características obtidas por SANTOS *et al.* (2013).

As Figuras 4 e 5 ilustram o desenvolvimento e a análise do algoritmo proposto:

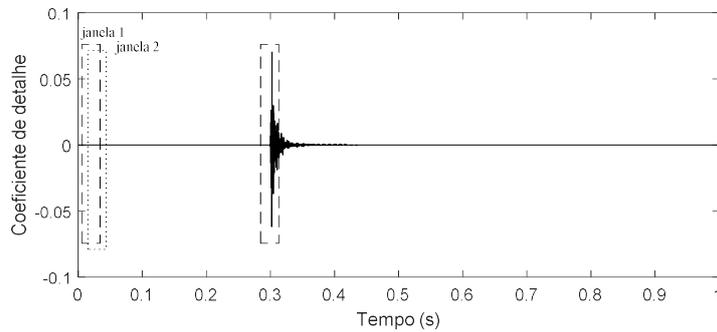


FIGURA 4 - Obtenção da energia da janela da amostra.

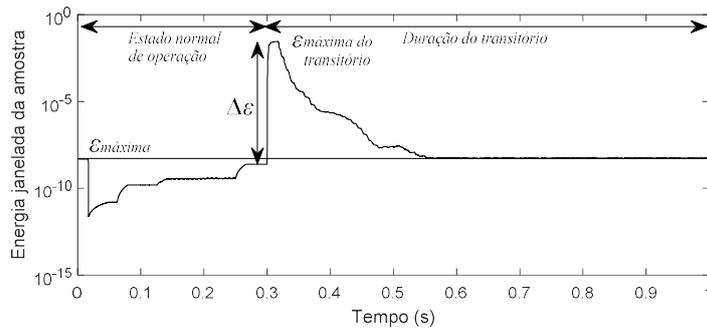


FIGURA 5 – Análise do algoritmo através da energia da janela da amostra.

Como a proteção proposta baseia-se em sinais de tensão, resta agora apenas saber se a ocorrência da FAI está na área determinada pela proteção do equipamento (neste caso, a jusante do alimentador).

### 2.2.3 Bloco 3 – Definição da seletividade

Para atender a característica de seletividade, muito importante na filosofia de proteção, a qual traduz se o equipamento de proteção atuará em sua respectiva área e objetivo de proteção, o algoritmo desenvolvido neste trabalho utilizou-se de cálculos RMS (*root mean square*) das correntes das fases A, B e C, nos períodos pré falta e pós falta, em janelas de um ciclo.

No caso da detecção de um transitório, através do algoritmo proposto, é conhecida a amostra  $k$ , a qual é tomada como o ponto de início do transitório. A partir daí, calculam-se as correntes das fases A, B e C pré-falta de um ciclo anterior e as mesmas correntes pós falta de um ciclo posterior.

A comparação entre os valores calculados determina se a falta ocorreu no alimentador sob análise. Caso seja verificado aumento das correntes, traduzindo em contribuição para corrente de curto circuito, considera-se que o alimentador está em falta. A Figura 6 ilustra o fluxograma do método adotado e que representa o Bloco 3 – Definição da seletividade:

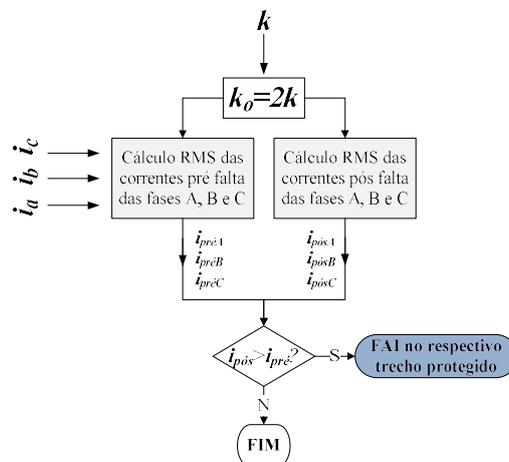


FIGURA 6 – Método para determinar se há falta no alimentador.

## 2.3 Resultados obtidos

Para a validação do algoritmo adaptativo proposto, foram simuladas várias situações comuns ao sistema de distribuição, os quais podemos citar:

- Falta de baixa impedância – implementado através de uma resistência de  $0,001 \Omega$  à terra;
- Falta de alta impedância – implementado conforme modelo descrito anteriormente;
- Abertura e fechamento de banco de capacitores – implementado através de banco de capacitores de 1,2 Mvar;
- Energização e desenergização de ramal – basicamente realizadas através de operação das chaves disponíveis dos ramos, o que gera muitos distúrbios e transitórios devido à energização de grande número de cargas.

### 2.3.1 Sistema de distribuição teste – IEEE 34 barras

A Figura 7 ilustra o circuito alimentador de distribuição, sem geração distribuída, a ser implementado no *software* ATP® e simulado em todas as condições e tipos de faltas, para posterior aplicação nos métodos de localização de faltas propostos.

O sistema do alimentador simulado é o IEEE 34 barras que corresponde a um modelo de alimentador no estado do Arizona (EUA) com carga total instalada de 2054 kVA, que garante a simulação da rede de distribuição de modo a possuir características desejáveis aos estudos desenvolvidos: características de não-homogeneidade, desbalanceamento significativo e derivações laterais diversas (mono-, bi- e trifásicas). A tensão nesta rede de distribuição é 24,9 kV, entre fases com conexão estrela aterrado e o comprimento total do tronco principal do alimentador é de 57,771 km (entre a subestação e o nó 840).

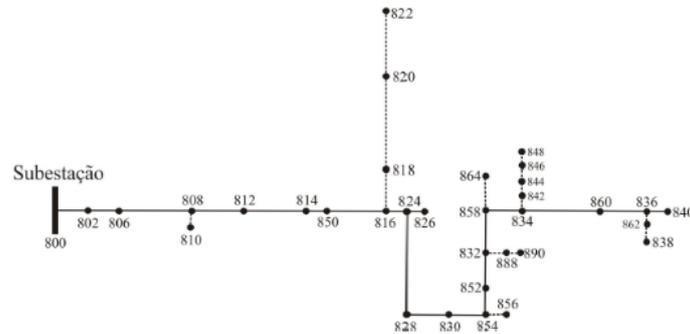


FIGURA 7 – Arquitetura do alimentador teste IEEE 34 barras simulado (KERSTING, 2001).

### 2.3.2 Simulações realizadas

Para validar o algoritmo desenvolvido neste trabalho, são feitas as seguintes simulações na rede de distribuição teste, vide Tabela 1:

TABELA 1 – Pontos de simulação na rede teste IEEE 34 barras.

#	Situação	Barra
1	Energização de ramal	818
2	Desenergização de ramal	818
3	Falta de baixa impedância	824
4	Falta de baixa impedância	838
5	Falta de alta impedância	802
6	Falta de alta impedância	822
7	Falta de alta impedância	824
8	Falta de alta impedância	838
9	Falta de alta impedância	842
10	Abertura de banco capacitor	830
11	Fechamento de banco capacitor	830
12	Falta de baixa impedância em outro alimentador	-
13	Falta de alta impedância em outro alimentador	-

Para a representação de falta de baixa impedância e de alta impedância em outro alimentador, é realizada a duplicação da rede elétrica em teste e conexão em paralelo, realizado as respectivas faltas na barra de 824 deste outro alimentador.

### 2.3.3 Análise da falta de baixa impedância

Para representar as características e resultados comuns em relação às ocorrências de faltas de baixa impedância, utilizam-se os dados obtidos através da simulação da situação nº 4 – falta de baixa impedância na barra 838. Logo, verificam-se os gráficos da tensão na Figura 8, lembrando que a falta ocorre em 0,3 ms.

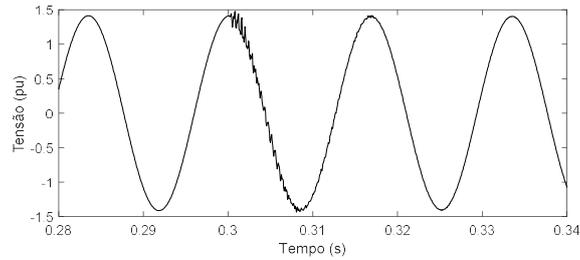


FIGURA 8 – Detalhamento do transiente no sinal de tensão.

Aplica-se então a transformada de Park, a qual replica as características de transientes dos sinais das três fases em apenas um, a tensão de eixo direto. O sinal resultante  $v_d$  contém ruídos e transientes indesejados, necessitando a aplicação de filtragem. Desta forma, foi escolhida a transformada *wavelet* para esta função, através da *wavelet* mãe *db4*, resultando no sinal da Figura 9, contendo os transientes.

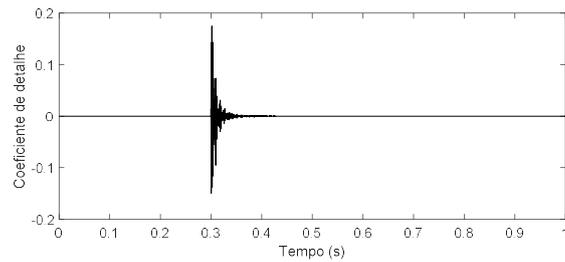


FIGURA 9 1 - Coeficiente de detalhe *wavelet* do sinal de tensão em falta de baixa impedância.

A partir deste ponto, o sinal é analisado pelo algoritmo adaptativo, o qual gera apenas um resultado final, se há ou não falta de alta impedância. O algoritmo proposto pode ser verificado e validado pelo gráfico das energias das janelas das amostras demonstrado na Figura 10.

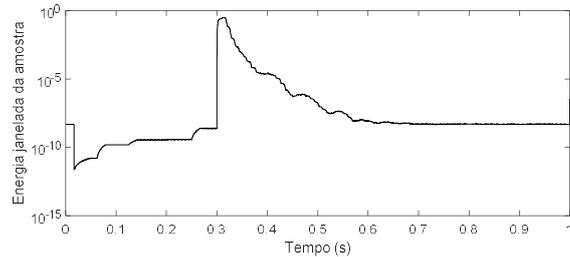


FIGURA 10 - Energias das janelas das amostras do sinal em falta de baixa impedância.

O resultado do algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi negativo, o que pode ser validado pela energia das amostras decaírem após alguns ciclos da ocorrência do transiente, o que não acontece com a falta de alta impedância que é demonstrada a seguir.

#### 2.3.4 Análise da falta de alta impedância

Para representar as características e resultados comuns em relação às ocorrências de faltas de alta impedância, utilizam-se os dados obtidos através da simulação da situação nº 6 – falta de alta impedância na barra 838. Logo, os gráficos da tensão podem ser vistos na Figura 11, lembrando que a falta ocorre em 0,3 ms.

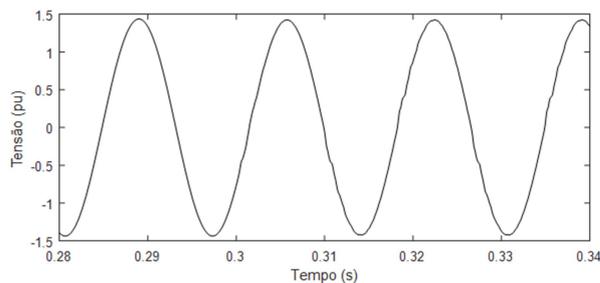


FIGURA 11 – Detalhamento do transiente no sinal de tensão.

Verifica-se que o sinal de tensão contém pequenas variações, muito menos perceptíveis em relação à falta de baixa impedância. Novamente, aplica-se a transformada de Park. Apesar do sinal de tensão aparentemente não apresentar grandes variações, o sinal  $v_d$  carrega valores elevados e oscilatórios, provenientes principalmente das características intrínsecas da falta de alta impedância. Ainda assim contém ruídos e transitórios indesejados, os quais são ignorados pela filtragem *wavelet*, vide Figura 12 FIGURA 12.

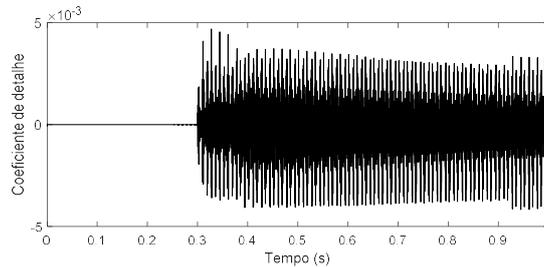


FIGURA 12 - Coeficiente de detalhe *wavelet* do sinal de tensão em FAI.

Logo, o sinal é analisado pelo algoritmo adaptativo, o qual gera apenas um resultado final, se há ou não falta de alta impedância. O algoritmo proposto pode ser verificado e validado pelo gráfico das energias das janelas das amostras demonstrado na Figura 13 FIGURA 132.

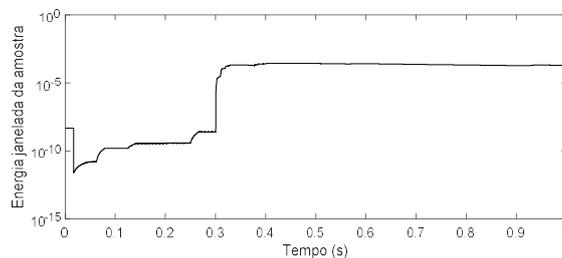


FIGURA 132 - Energias das janelas das amostras do sinal em FAI.

O resultado do algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi **positivo**, ou seja, uma FAI foi detectada na rede elétrica em estudo, o que pode ser validado pela energia das amostras manterem-se constantes após alguns ciclos da ocorrência do transitório, estando de acordo também com estudos de SANTOS *et al.* (2013).

### 2.3.5 Resumo dos resultados obtidos

A seguir, apresenta-se a Tabela 2 contendo os resultados do algoritmo adaptativo proposto para a detecção de falta de alta impedância.

Foram criadas duas colunas para maior detalhamento do resultado do algoritmo:

- a primeira chamada transitório, demonstra se o sinal em análise foi capaz de ultrapassar a energia da janela da amostra máxima e o limite de diferença abrupta de energia, previamente calculados;
- a segunda chamada FAI, demonstra se as energias das janelas das amostras do sinal em análise continuam constantes e dentro de um valor confiável em relação à energia da janela da amostra de primeiro ciclo pós falta, para determinar se corresponde a uma falta de alta impedância. Caso positivo, também é realizada a análise de seletividade do alimentador, se a FAI ocorre ou não neste trecho em proteção.

TABELA 2 - Resultados das simulações realizados do algoritmo proposto.

#	Situação	Barra	Transitório	FAI
1	Energização de ramal	818	Sim	Não
2	Desenergização de ramal	818	Sim	Não
3	Falta de baixa impedância	824	Sim	Não
4	Falta de baixa impedância	838	Sim	Não
5	Falta de alta impedância	824	Sim	<b>Sim</b>
6	Falta de alta impedância	838	Sim	<b>Sim</b>
7	Falta de alta impedância	822	Sim	<b>Sim</b>
8	Falta de alta impedância	848	Sim	<b>Sim</b>
9	Falta de alta impedância	802	Sim	<b>Sim</b>
10	Abertura de banco capacitor	830	Não	Não
11	Fechamento de banco capacitor	830	Sim	Não
12	Falta de baixa impedância em outro alimentador	-	Sim	Não
13	Falta de alta impedância em outro alimentador	-	Sim	Não

Em relação ao objetivo do trabalho proposto, que é a detecção de falta de alta impedância, o algoritmo detectou corretamente as ocorrências de FAI, e principalmente não teve respostas de falsos positivos. Logo, o algoritmo adaptativo para detecção de falta de alta impedância através da transformada de Park e *wavelet* correspondeu ao objetivo proposto.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Este algoritmo se diferencia pela aplicabilidade em quaisquer situações e características da rede elétrica, podendo ser aplicado em vários níveis de tensão e em locais de proteção digital, como em religador ao longo do próprio alimentador. Assim, através dos resultados obtidos, poderá ser testado na proteção em tempo real de sistemas de distribuição, visto que detectou as FAls simuladas e não apresentou situações de falso positivo (ações indevidas).

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COSTA, F. B. et al. A Wavelet-Based Method for Detection and Classification of Single and Crosscountry Faults in Transmission Lines. In Internacional Conference on Power Systems Transients (IPST'09). Kyoto, Japan. June 3-6, 2009.
- (2) 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, [Piscataway], v.5, n.2, p.676-686, Apr, 1990.
- (3) KERSTING, W. H. Radial distribution test feeder. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. Proceedings... . Piscataway: IEEE, 2001. p.908-912.
- (4) SANTOS, W. C. et al. High Impedance Fault Detection and Location Based on Electromagnetic Transient Analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, Vancouver. Proceedings... [s.l.]: IPST, 2013. p.1-6.

### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Igor Kursancew Khairalla

Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

Engenheiro Eletricista no Grupo Celesc, desde 2012.

Miguel Moreto

Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, 2011

Professor efetivo no Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, desde 2014.

Arlan Luiz Bettiol

Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina

Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina

Doutorado (Doctorat en Sciences Appliquées) pela Université de Liège, Bélgica

Proprietário e diretor técnico-comercial das empresas A VERO DOMINO CONSULTORIA E PESQUISA LTDA. e NEO DOMINO PESQUISA EM SISTEMAS ELÉTRICOS LTDA.

Douglas Barbonaglia Sathler Figueiredo

Graduação em Engenharia de Computação na UNIVALI, 2008.

Formação de Designers de Circuito Integrado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

Pesquisador na NEO DOMINO PESQUISA EM SISTEMAS ELÉTRICOS LTDA.