

Detecção de Ilhamento em Sistemas de Distribuição Utilizando Técnicas de Processamento de Sinais

Ramon R. S. de Oliveira, Renato R. Aleixo
Leandro R. M. Silva
Carlos A. Duque
Danton D. Ferreira
Universidade Federal de Juiz de Fora
ramonrsd@gmail.com

Paulo F. Ribeiro
Universidade Federal de Itajubá
pfribeiro@ieee.org

Resumo — O fenômeno de ilhamento não-intencional ocorre quando um gerador distribuído (GD) continua a fornecer energia para a rede quando o fluxo de alimentação da fonte central da concessionária foi interrompido. Este fenômeno pode resultar em ferimentos graves para os técnicos que estão tentando resolver o problema de falta de energia. Várias técnicas têm sido propostas no passado para evitar tal ocorrência. O presente trabalho utiliza os princípios de duas técnicas, Wavelet Transform (WT) e S-Transform (ST), para a detecção tanto de ilhamento quanto de afundamento de tensão. A diferença entre essas duas situações é analisada através da energia das transformadas do módulo da tensão de sequência negativa, medida no ponto de conexão do GD. Os resultados obtidos mostram que foi possível identificar o ilhamento de um afundamento de tensão através da energia das transformadas, tanto para as situações em que o sinal contém ruído quanto para as que não contém. Os resultados mostraram melhor performance da S-Transform em relação à Wavelet Transform nesse processo de identificação desses distúrbios.

Palavras-chaves — Geração Distribuída, Ilhamento, Afundamento de tensão, Processamento de sinais.

I. INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia elétrica estão, a cada dia, mais preocupadas com a crescente quantidade dos geradores distribuídos, já que esses vêm se mostrando como boas alternativas para resolver problemas ambientais, para lidar com o aumento dos preços da energia e também com os custos de construção de uma usina. A geração distribuída pode, também, contribuir para melhorar a qualidade da energia, minimizar as cargas de pico e eliminar a necessidade de margem de reserva. Muitos GDs podem ser conectados em paralelo e fornecer energia tanto para a rede quanto para cargas locais. No entanto, esses geradores devem operar de maneira segura e fornecer energia para a rede somente se a concessionária estiver conectada ao sistema. Esse tipo de evento, altamente indesejado pelas concessionárias de energia elétrica, é conhecido como ilhamento não intencional, e neste artigo será referido simplesmente como ilhamento [1]. Essa situação, descrita no parágrafo anterior, deve ser detectada precisa e rapidamente para aprimorar a operação dos GDs no sistema.

Esse trabalho teve o suporte da Universidade Federal de Juiz de Fora, da CAPES, CNPq e FAPEMIG.

Alguns dos mais importantes problemas que a operação ilhada dos geradores distribuídos pode trazer ao sistema são [2]:

- . Ameaça à segurança do pessoal técnico da operação e manutenção dos sistemas elétricos, uma vez que após a perda do suprimento da concessionária, parte da rede elétrica permanece energizada sem o conhecimento da mesma;
- . A concessionária, usualmente, não tem controle da tensão e frequência dentro do sistema ilhado;
- . Os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos existentes dentro da ilha podem perder completamente a coordenação entre si;
- . O subsistema ilhado pode apresentar aterramento inadequado para sua operação;
- . Ilhas energizadas podem interferir na restauração manual ou automática do suprimento de energia aos consumidores.

Recentemente, muitos estudos vêm aparecendo com técnicas locais para detectar ilhamento. Essas técnicas são classificadas em dois grupos: ativas e passivas. As técnicas ativas requerem que o GD injete sinais que provoquem pequenos distúrbios no sistema elétrico, sob os quais o sistema apresentará um comportamento diferente entre as condições de operação interligada com a concessionária e operação quando estiver isolado. Já as técnicas passivas são baseadas em medidas de grandezas elétricas no ponto de interconexão entre o gerador distribuído e o sistema elétrico, sendo que o ilhamento é identificado se houver variações significativas das grandezas medidas [3].

Nesse estudo serão abordadas duas técnicas passivas de detecção de ilhamento que foram abordadas em [4] e [5], são elas: *wavelet transform* (WT) e *S-Transform* (ST). Essas técnicas consistem em utilizar as transformadas WT e ST no sinal de tensão de sequência negativa e a partir delas, calcular a energia do sinal. Se a energia for maior que um limiar pré-estabelecido, está caracterizado o ilhamento, se não, outro tipo de problema de qualidade de energia ocorreu. A dificuldade dessas técnicas é justamente a escolha desse limiar para que o ilhamento não seja confundido com outro tipo de distúrbio, como afundamento de tensão, por exemplo. O objetivo aqui, então, será aplicar essas técnicas nos casos de afundamento de tensão e ilhamento, e através de um limiar pré-estabelecido, identificar tais eventos.

Na segunda seção será apresentada a modelagem do sistema utilizado nesse estudo. Na terceira seção será mostrada uma breve explicação de cada técnica de processamento de sinais utilizado. Na quarta seção será mostrado a metodologia aqui utilizada bem como uma discussão sobre os resultados obtidos e por último, na quinta seção, será feito uma conclusão desse trabalho.

II. MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

Essa seção apresenta uma breve descrição dos métodos de processamento de sinais usados na diferenciação do ilhamento de um afundamento de tensão, os quais são: *Discrete Wavelet Transform* (DWT) e *Discrete S-Transform* (DST).

Esses métodos foram aplicados nos sinais de tensão extraídos do ponto de acoplamento comum a fim de obter as características do sinal no domínio da frequência. Feito isso, calculou-se a energia das transformadas e comparou-se as energias em casos de ilhamento e em casos de afundamento de tensão.

Uma breve descrição de cada método, bem como o cálculo da energia, será demonstrada a seguir.

A. Discrete Wavelet Transform

Nesse estudo, o sinal de tensão de sequência negativa é usado como sinal de entrada do algoritmo da transformada wavelet e a Daubechies4 (dB4) foi a wavelet-mãe utilizada, uma vez que ela tem demonstrado melhor performance em detecção de problemas, desse tipo, relacionados à qualidade de energia.

O modelo de decomposição da transformada wavelet, utilizado nesse estudo, pode ser visualizado na figura 1. O sinal de tensão passa por uma série de filtros passa-altas, para analisar as altas frequências, e também por uma série de filtros passa-baixas, para analisar as baixas frequências. Assim, o sinal se decompõe em dois tipos: aproximação (A) e detalhe (D). A aproximação tem uma escala maior, contendo as componentes de baixa frequência do sinal. Por sua vez, o detalhe tem uma escala menor, contendo as componentes de alta frequência do sinal. O processo de decomposição pode ser repetido, com sucessivas aproximações de modo que o sinal seja dividido em diversos componentes de baixa resolução, que é chamado de árvore de decomposição wavelet, vide Figura 1. Como as decomposições são feitas em níveis mais elevados, os componentes de frequência mais baixa são filtrados progressivamente.

A transformada wavelet não só decompõe um sinal em bandas de frequências, mas também, ao contrário da transformada de Fourier, fornece uma divisão não uniforme do domínio da frequência, isto é, essa transformada usa janelas curtas em altas frequências e janelas longas para componentes de baixa frequência.

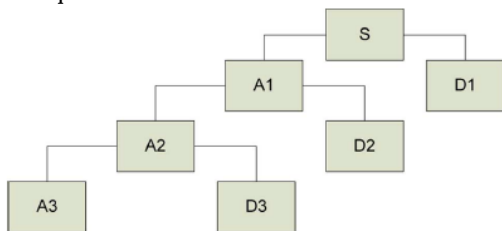


Figura 1: Árvore de decomposição wavelet [5].

Nesse estudo, a decomposição do sinal foi até a sexta aproximação (A6) e o sexto detalhe (D6), a fim de obter melhores resultados, principalmente se o sinal de tensão tiver ruído.

B. Discrete S-Transform

Pode-se dizer que a *S-Transform* (ST) é uma transformada de Fourier de tempo curto (STFT, do inglês *Short-Time Fourier Transform*) com uma janela Gaussiana, ou uma extensão da transformada wavelet.

A expressão da transformada wavelet é representada por (1).

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t - \tau, d)dt \quad (1)$$

Onde t denota o tempo, $h(t)$ é a função no domínio do tempo, τ denota a localização do espectro no tempo, d é a largura da wavelet $w(t, d)$ que controla a resolução de frequência e $w(t, d)$ é uma cópia em escala da wavelet mãe fundamental. Ainda, $w(t, d)$ deve ter média zero.

Em seguida, a ST é definida como uma transformada wavelet com uma wavelet-mãe específica multiplicada pelo fator de fase

$$S(\tau, f) = e^{-2\pi f t} W(\tau, d) \quad (2)$$

Sendo a wavelet-mãe definida por

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} \quad (3)$$

Onde o fator d é o inverso da frequência f .

No entanto, a wavelet-mãe em (3) não satisfaz a propriedade de média zero, portanto, essa transformada não é igual a transformada wavelet, que é dada por (4).

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} dt \quad (4)$$

Se a ST é uma representação do espectro local, podemos mostrar a relação dela e a transformada de Fourier como (5).

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau = H(f) \quad (5)$$

Onde $H(f)$ é a transformada de Fourier de $h(t)$. Logo, $h(t)$ é definida como (6).

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \right\} e^{j2\pi f t} df \quad (6)$$

A relação entre a ST e a transformada de Fourier pode ser escrita como (7).

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{j2\pi f t} d\alpha \quad f \neq 0 \quad (7)$$

Ao tomar a vantagem da eficiência da transformada rápida de Fourier e o teorema de convolução, o análogo discreto de (7) pode ser usado para calcular a ST discreta.

Seja $h[kT], k = 0, 1, \dots, N-1$ uma série temporal discreta correspondente a $h(t)$, com intervalo de amostragem de tempo T . A transformada de Fourier discreta é mostrada em (8).

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (8)$$

Usando (7) e (8), fazendo $f \rightarrow n/NT$ e $\tau \rightarrow jT$, a série de tempo discreto da ST, $h[kT]$, é mostrada em (9).

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad n \neq 0 \quad (9)$$

Onde j, m e $n = 0, 1, \dots, N-1$. Se $n = 0$, é igual a constante definida em (10).

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad (10)$$

A *S-Transform*, no entanto, é uma transformada que mostra o módulo do sinal para cada frequência, enquanto que a *Wavelet Transform* decompõe o sinal em vários níveis, mostrando os módulos do sinal em cada nível, não especificando a frequência.

C. Energia

A determinação da energia da transformada de um sinal é baseada no "Teorema de Parseval", que indica que a energia de um sinal continua a ser a mesma, quer seja calculada no domínio do sinal (tempo) ou no domínio da transformada do sinal (frequência). Assim, podemos expressar o conteúdo de energia em um sinal como:

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)|^2 dt = \sum_{n=0}^N |V[n]|^2 \quad (11)$$

Onde T e N são o período e o tamanho do sinal, respectivamente, e $V[n]$ é a transformada de Fourier do sinal.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

O presente trabalho visa analisar o sinal de tensão de sequência negativa no ponto de acoplamento comum (PAC) entre o gerador distribuído e o sistema, utilizando técnicas de processamentos de sinais, a fim de detectar ilhamento e afundamento de tensão.

Para a obtenção dos sinais de tensão de sequência negativa foi utilizado o sistema de potência de 15 barras do IEEE que se encontra em ambiente de simulação Matlab/Simulink [6]. O diagrama unifilar desse sistema pode ser visualizado na Figura 2.

IV. METODOLOGIA E RESULTADOS

O ilhamento neste sistema é caracterizado, em linhas gerais, quando a subestação é retirada do sistema e o gerador distribuído continua conectado ao mesmo. Nesse caso, o gerador estará fornecendo energia para uma parte do sistema que não está conectada à subestação, ou seja, estará operando em modo "ilhado".

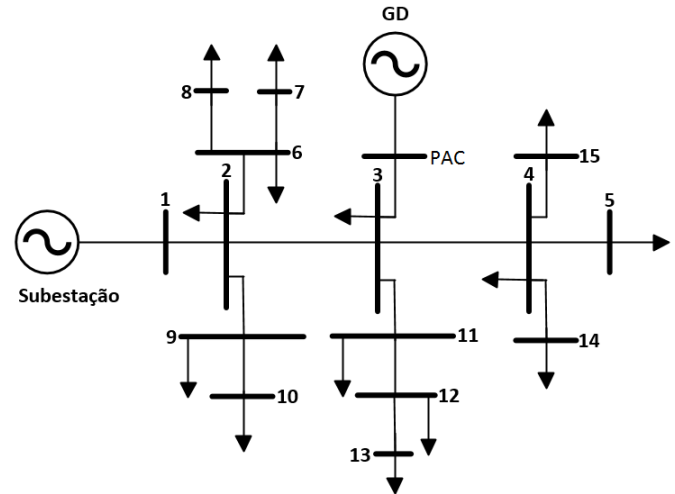


Figura 2: Diagrama unifilar do sistema de potência de 15 barras do IEEE.

Com a finalidade de simular essa situação, foi inserida uma chave entre a subestação e a barra 1, a qual abrirá após o terceiro ciclo da forma de onda da tensão (aproximadamente 0,05 segundos) e permanecerá aberta até o fim da simulação. O tempo simulado foi de 0,2 segundos.

O afundamento de tensão ocorre, geralmente, quando há a inserção de uma carga, relativamente grande, em algum lugar do sistema de potência. Após essa inclusão de carga, como a potência do gerador é constante, a corrente que sai do gerador aumenta, consequentemente a tensão diminui de valor, desequilibrando o sistema.

Para simular essa situação, foi inserido no sistema uma carga de 3,2 MW e 1,9 MVar, a qual simboliza uma grande máquina. Essa "máquina" foi introduzida em diferentes barras e com diferentes porcentagens de carga, variando de 30 a 100%. Tanto a barra quanto a porcentagem de carga foram escolhidos de maneira aleatória através de um código no Matlab. A carga foi inserida no terceiro ciclo da tensão e permanecia até o fim da simulação.

Como existe um número enorme de possibilidades de como o sistema estará operando no momento da abertura da chave ou no momento da inserção da "máquina", foi construído um código em Matlab para "sortear" a porcentagem de cada carga do sistema entre os valores de 30 a 100% antes de rodar a simulação.

A tensão de sequência negativa é monitorada no PAC, pois é a barra onde o gerador distribuído está conectado. A forma de onda do módulo dessa tensão é coletada, para cada situação de carga, para fazer as transformadas (WT e ST) e calcular as energias das mesmas.

O valor da tensão de sequência negativa é zero antes da chave ser aberta ou da carga, que representa uma grande máquina, ser inserida no sistema em 0,05s, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4. Isso já era de se esperar já que o sistema se encontra equilibrado. No momento em que ocorre o ilhamento ou um afundamento trifásico, o sistema se desequilibra, aparecendo assim componente de tensão negativa, a qual retorna a zero depois de um certo tempo, ou seja, o sistema se

equilibra novamente. Já para o afundamento monofásico e bifásico, a tensão de sequência negativa não retorna a zero, pois o sistema permanece desequilibrado.

As imagens ilustrativas das situações de afundamento de tensão serão dos afundamentos monofásicos, não serão mostradas, portanto, imagens dos afundamentos bifásicos e trifásicos.

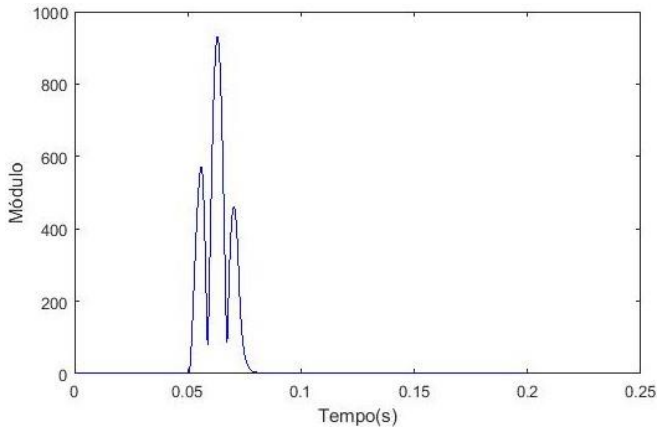


Figura 3: Tensão de sequência negativa no ilhamento.

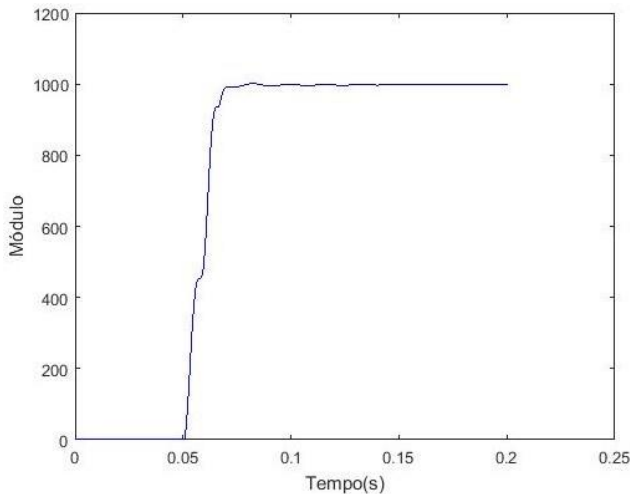


Figura 4: Tensão de sequência negativa no afundamento monofásico.

Um ruído de 40dB foi introduzido no sinal a fim de tornar as medições mais próximas da realidade, já que na prática aparece um ruído devido aos componentes eletrônicos nos aparelhos de medição.

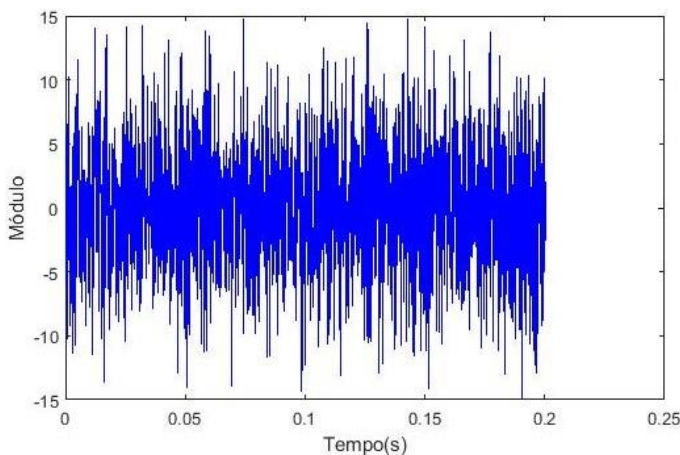


Figura 5: Primeiro detalhe, com ruído, no ilhamento.

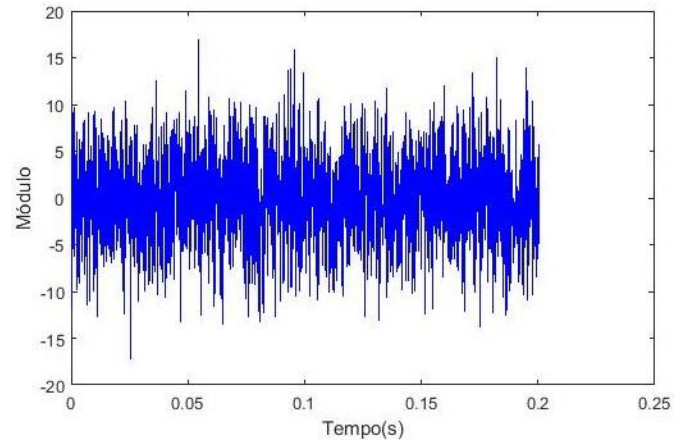


Figura 6: Primeiro detalhe, com ruído, no afundamento monofásico.

As Figuras 5 e 6 mostram, nessa ordem, dois exemplos do primeiro detalhe da WT para o caso do ilhamento e do afundamento de tensão monofásico, na presença do ruído.

Percebe-se que o primeiro detalhe não foi suficiente para detectar o momento em que acontece tanto o ilhamento quanto o afundamento de tensão, por isso, foi realizado mais decomposições na árvore de decomposição wavelet para verificar qual detalhe conseguiria identificar tais eventos. Nesse estudo foi escolhido o sexto detalhe para identificação do ilhamento e do afundamento, pois os cinco primeiros não foram capazes de identificar essas situações na presença de ruído.

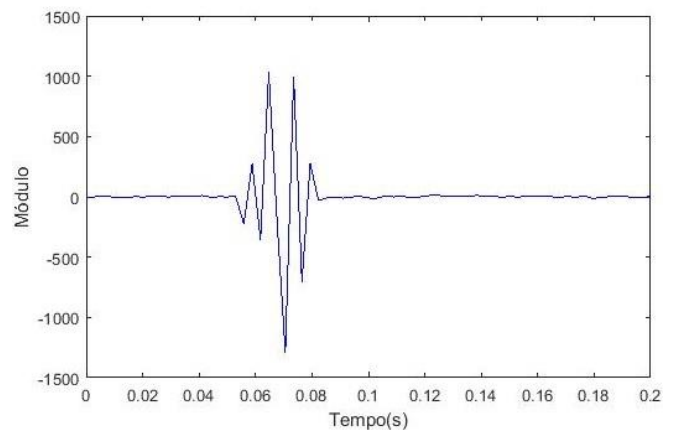


Figura 7: Sexto detalhe, com ruído, no ilhamento.

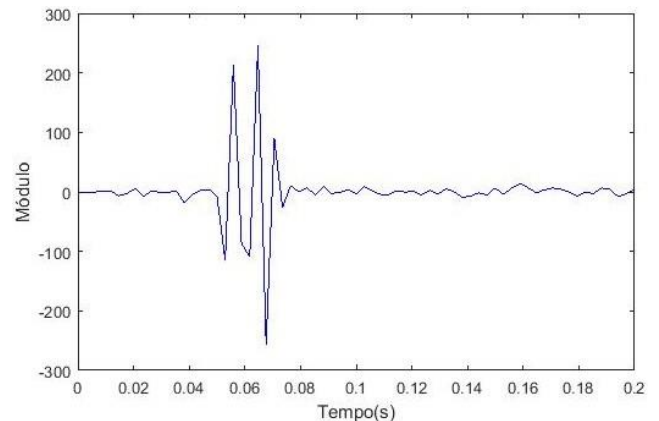


Figura 8: Sexto detalhe, com ruído, no afundamento monofásico.

Nas Figuras 7 e 8 é possível ver que o sexto detalhe conseguiu identificar o momento de ocorrência do ilhamento e do afundamento de tensão, respectivamente. Sem a presença

de ruído foi verificado que o terceiro detalhe era suficiente para identificar esses acontecimentos, porém, para manter um padrão, já que na prática dificilmente não terá ruído, foi utilizado o sexto detalhe também na situação sem ruído.

As Figuras 9 e 10 mostram os “voices” de 375 Hz da S-Transform do módulo da tensão de sequência negativa, com o ruído, para os casos de ilhamento e de afundamento de tensão, respectivamente. Já as figuras 11 e 12 mostram os mesmos “voices”, porém sem ruído no sinal. O “voice” mostra o perfil do sinal, durante o tempo, para uma frequência específica.

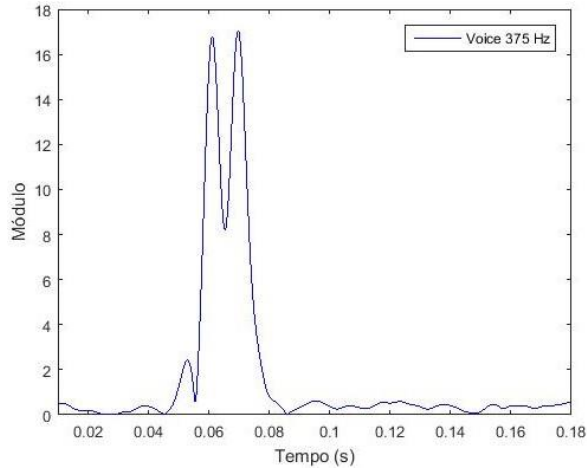


Figura 9: Voice de 375 Hz da S-Transform, com ruído, no ilhamento.

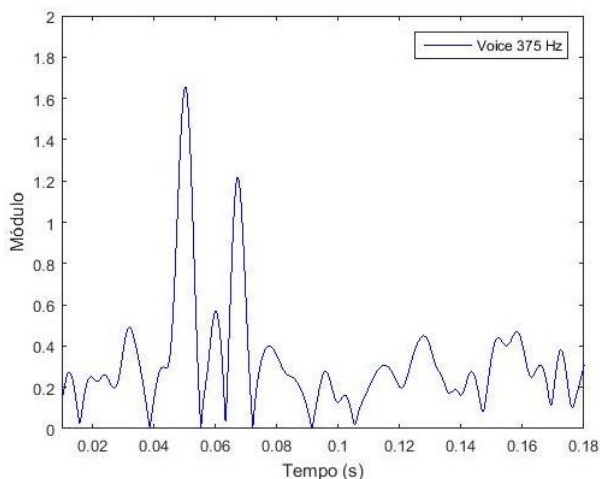


Figura 10: Voice de 375 Hz da S-Transform, com ruído, no afundamento.

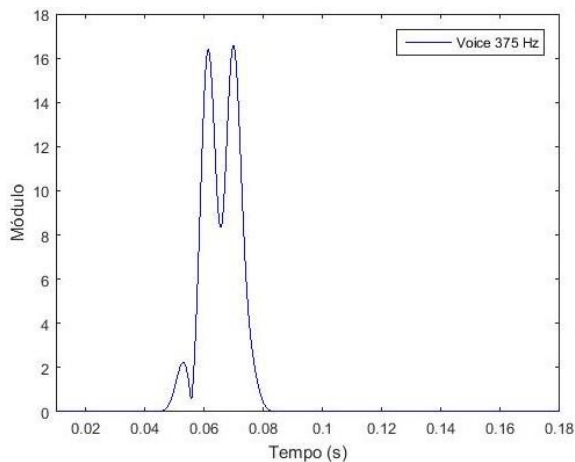


Figura 11: Voice de 350 Hz da S-Transform, sem ruído, no ilhamento.

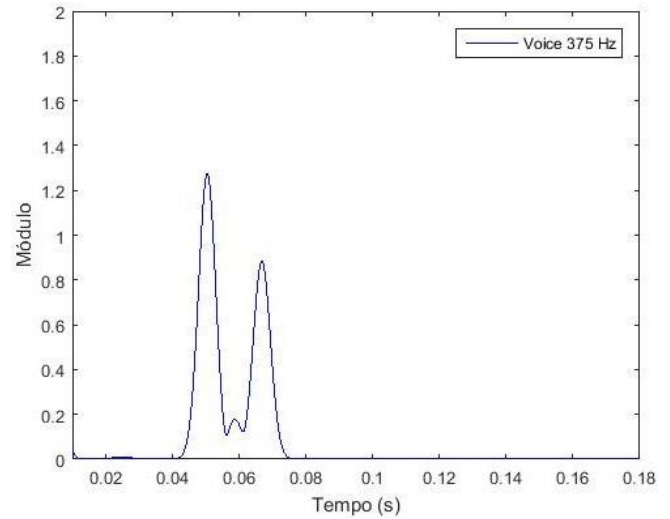


Figura 12: Voice de 350 Hz da S-Transform, sem ruído, no afundamento

Nota-se que no instante em que ocorreu o problema de qualidade de energia o módulo da tensão de sequência negativa aumenta para um valor bem acima dos demais, tanto para o caso com ruído quanto para o caso sem ruído.

Então, é possível perceber que a WT e a ST conseguem identificar o momento em que ocorre o ilhamento ou o afundamento de tensão.

A distinção do ilhamento para um afundamento de tensão (Sag), aqui nesse estudo, é feita através da energia das transformadas do módulo da tensão de sequência negativa.

Inicialmente, utilizando o sinal com ruído, para se aproximar da realidade, foi definido um limiar de separação para essas duas situações. Tal limiar foi escolhido rodando as rotinas do ilhamento e do afundamento de tensão (mono, bi e trifásico) 100 vezes e armazenando todos os valores de energia, tanto da WT quanto da ST. De posse desses valores, foi verificado quais foram os valores de energia mínimo e máximo para o ilhamento e para cada um dos afundamentos. Tais valores podem ser vistos na tabela I.

TABELA I. ENERGIA MÍNIMA E MÁXIMA DAS TRANSFORMADAS PARA DETERMINAÇÃO DO LIMIAR.

Situação	WT (10^6)		ST (10^9)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Ilhamento	2,943	4,848	0,138	0,166
Sag Monofásico	0,080	0,431	1,246	6,903
Sag Bifásico	0,320	1,593	1,262	7,506
Sag Trifásico	0,702	3,620	0,036	0,150

Através desses valores, foi verificado que seriam necessários dois limiares de energia, um inferior e outro superior, pois existia energias para afundamento de tensão abaixo do menor valor e acima do maior valor para ilhamento.

Os limiares escolhidos para WT foram $3,28 \times 10^6$ e 6×10^6 . Já os limiares para ST foram $0,13 \times 10^9$ e $0,683 \times 10^9$. Os valores dentro desses limiares seriam considerados ilhamento e fora deles seriam considerados afundamento.

Outra informação que pode ser extraída da tabela é que a ST pode identificar se um afundamento é trifásico ou não, por exemplo, se a energia da ST estiver abaixo do limiar inferior, esse afundamento é trifásico, se a energia da ST estiver acima do limiar superior, esse afundamento será de outro tipo.

Para testar essa metodologia e esses limiares de separação, rodaram-se as rotinas do ilhamento e do afundamento de

tensão, como anteriormente, 1000 vezes e verificou-se a quantidade de acertos e erros como pode ser verificado na tabela II. Essa tabela mostra os resultados para o sinal ruidoso.

TABELA II. QUANTIDADE DE ACERTO E DE ERRO DO MÉTODO COM RUÍDO.

Situação	WT		ST	
	Acerto	Erro	Acerto	Erro
Ilhamento	922	78	1000	0
Sag Monofásico	1000	0	1000	0
Sag Bifásico	1000	0	1000	0
Sag Trifásico	969	31	959	41

Através da tabela II percebe-se que para a situação de ilhamento a WT obteve um acerto de 92,2% e para as situações de afundamento, ela conseguiu identificar, em 100% das situações, os afundamentos monofásicos e bifásicos, e em 96,9% o trifásico. Já a ST teve uma porcentagem de acerto de 100% para todas as situações menos para o afundamento trifásico, o qual ela obteve um acerto de 95,9%.

Para testar se essa metodologia também funcionaria em condições do sinal sem ruído, foi realizado novamente o mesmo experimento, rodando-se as rotinas de ilhamento e de afundamentos 1000 vezes. Os resultados estão na tabela III.

TABELA III. QUANTIDADE DE ACERTO E DE ERRO DO MÉTODO SEM RUÍDO.

Situação	WT		ST	
	Acerto	Erro	Acerto	Erro
Ilhamento	904	96	931	69
Sag Monofásico	1000	0	1000	0
Sag Bifásico	1000	0	1000	0
Sag Trifásico	963	37	989	11

O índice de acerto da WT para o caso de ilhamento foi de 90,4%, e da ST foi de 93,1%, ambos os índices menores que o anterior, o que faz algum sentido já que os limiares foram escolhidos com o sinal ruidoso. Para o afundamento de tensão, ambas as transformadas acertaram em todos os casos os afundamentos mono e bifásicos e para o afundamento trifásico, a WT e a ST acertaram 96,3% e 98,9% dos casos, respectivamente.

V. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi apresentado um estudo sobre a detecção de ilhamento e afundamento de tensão no sistema de energia de 15 barras do IEEE usando técnicas como a WT e a ST em alguns cenários operacionais. Casos como detecção de ilhamento e afundamento de tensão em decorrência de chaveamento de uma carga de valor elevado, foram estudados.

A análise utilizando WT e ST sugeriu as suas capacidades de detectar eventos de ilhamento e afundamento em situações em que há e não há ruído. A acurácia da detecção foi testada em termos de índices de desempenho de cada transformada, isto é, a porcentagem de acertos na identificação dos diferentes problemas de qualidade de energia.

Os resultados qualitativos e quantitativos mostram os méritos da ST frente à WT na detecção desses distúrbios e também na obtenção do limiar de energia, pois a diferença de energia entre as duas situações, ilhamento e afundamento de tensão, utilizando a ST é maior do que utilizando a WT.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sung-Il, J., & Kwang-Ho, K. (2 de April de 2004). An Islanding Detection Method for Distributed Generations Using Voltage Unbalance and Total Harmonic Distortion of Current. IEEE Transactions on Power Delivery , 19, pp. 1-8.
- [2] Walling, A. R., & Miller, N. W. (2002). Distributed Generation islanding – implications on power system dynamic performance. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING , pp. 92-96.
- [3] XU, W., Zhang, G., Li, C., & Wang, W. (July de 2007). A Power Line Signaling Based Technique for Anti-Islanding Protection of Distributed Generators-Part I: Scheme and Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery , 22, pp. 1758-1766.
- [4] Mohanty, S. R., Kishor, N., Ray, P. K., & Catalão, J. (January de 2015). Comparative Study of Advanced Signal Processing Techniques for Islanding Detection in a Hybrid Distributed Generation System. IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY , 6.
- [5] Prakash, R. K., Kishor, N., & Mohanty, S. R. (September de 2012). Islanding and Power Quality Disturbance Detection in Grid-Connected Hybrid Power System Using Wavelet and -Transform. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID , 3.
- [6] <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48104-ieee-15-bus-radial-system>.