

TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAL E CLASSIFICADORES INTELIGENTES UTILIZADOS PARA A DETECÇÃO DE ILHAMENTO NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Data de aceite: 01/12/2023

Viviane Barrozo da Silva

Dra. Professora do Departamento de Engenharia Elétrica - Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR
Porto Velho – RO
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

Antonio Carlos Duarte Ricciotti

Dr. Professor do Departamento de Engenharia Elétrica - Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR
Porto Velho – RO
<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

Me. Professor do Departamento de Engenharia Elétrica - Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR
Porto Velho – RO
<http://lattes.cnpq.br/2255311473963948>

Fabrcio Moraes de Almeida

Dr. Professor do Departamento de Engenharia Elétrica - Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR
Porto Velho – RO
<http://lattes.cnpq.br/5959143194142131>

alta qualidade de energia, eficiência e baixas emissões de carbono no sistema de energia. No entanto, a detecção de ilhamento eficiente e a desconexão imediata da GD são essenciais para evitar danos ao equipamento, interferência na proteção da rede e riscos à segurança das equipes de manutenção. As técnicas de detecção de ilhamento são classificadas principalmente em técnicas remotas, ativas, passivas e híbridas. Destas, as técnicas passivas são mais vantajosas devido à menor degradação da qualidade da energia, menor custo e uso mais difundido pelas concessionárias de energia. No entanto, as principais limitações dessas técnicas são que elas possuem grandes zonas de não detecção (ZND) e requerem configuração de limite. Várias técnicas de processamento de sinal e classificadores inteligentes têm sido usados para superar as limitações da técnica passiva. As técnicas de processamento de sinais, em particular, são adotadas devido à sua versatilidade, estabilidade, economia e facilidade de modificação. Este capítulo apresenta análise das técnicas de processamentos de sinais aplicadas para otimizar as técnicas comuns de detecção de ilhamento passivo, demonstrando a comparação de desempenho entre as

RESUMO: A alta penetração da geração distribuída (GD) na rede de distribuição oferece muitos benefícios em termos de

técnicas de detecção de ilhamento com base em processamento de sinal utilizando as técnicas existentes. Além disso, descreveremos as vantagens e limitações relativas das técnicas de processamento de sinal.

PALAVRAS-CHAVE: Ilhamento, Geração distribuída, Rede de distribuição, Processamento de Sinal, Classificadores Inteligentes.

SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES AND INTELLIGENT CLASSIFIERS USED FOR ISLANDING DETECTION DISTRIBUTED NETWORK GENERATION

ABSTRACT: The high penetration of distributed generation (DG) in the distribution network offers many benefits in terms of high energy quality, efficiency and low carbon emissions in the energy system. However, efficient islanding detection and immediate GD disconnection are essential to prevent equipment damage, interference with network protection and safety risks for maintenance personnel. Islanding detection techniques are classified mainly into remote, active, passive and hybrid techniques. Of these, passive techniques are the most advantageous due to less degradation in energy quality, lower cost and greater use by energy utilities. However, the main limitations of these techniques are that they have large zones of non-detection (ZND) and require threshold configuration. Various signal processing techniques and intelligent classifiers have been used to overcome the limitations of the passive technique. Signal processing techniques, in particular, are adopted due to their versatility, stability, economy and ease of modification. This article presents a comprehensive review of the signal processing techniques used to improve common passive islanding detection techniques. A performance comparison between island processing techniques based on signal processing with existing techniques will also be addressed. We will also describe the relative advantages and limitations of signal processing techniques.

KEYWORDS: Islanding, Distributed generation, Distribution network, Signal Processing, Smart Classifiers.

1 | INTRODUÇÃO

A alta penetração da geração distribuída na rede de distribuição oferece muitos benefícios em termos de qualidade de energia, eficiência e baixas emissões de carbono no sistema de energia. No entanto, uma detecção de ilhamento eficiente e uma desconexão imediata da GD são essenciais para evitar danos aos equipamentos entre outros riscos.

A condição de ilhamento ocorre quando parte do sistema de distribuição, à qual a GD está conectada, encontra-se eletricamente isolada da rede da concessionária, mas pode apresentar-se energizada pela geração distribuída e esta é conhecida como operação ilhada.

A Figura 1.0 exibe a condição de ilhamento de uma rede de distribuição conectada a três geradores distribuídos.

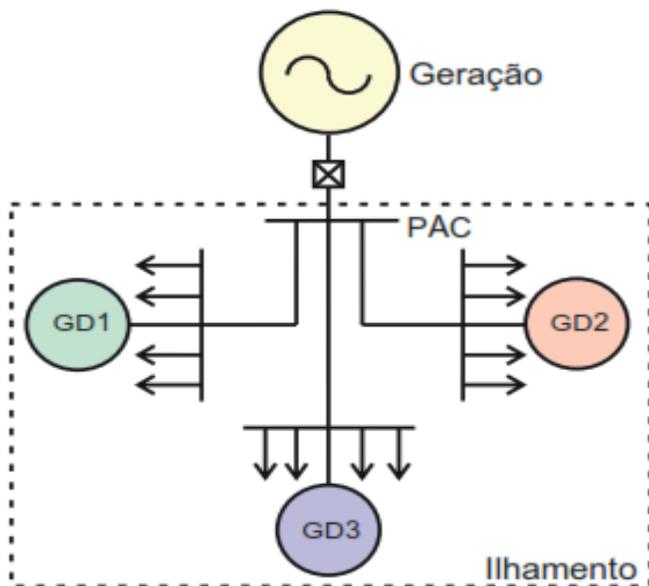


Figura 1.0 - Condição de ilhamento em uma rede de distribuição conectada a três GD.

Fonte: Autora

A operação ilhada de geradores distribuídos, se não detectada e eliminada em tempo hábil, apresenta riscos, tais como: degradação da qualidade de energia, risco de vida das equipes de manutenção das concessionárias, perdas de sincronismo durante a operação de religamento pelo religador automático, perda da coordenação das proteções de sobrecorrente, aterramento inadequado entre outros, conforme apresentados em (MARCHESAN, 2016), (VELASCO et al., 2010), (YU; MATSUI; YU, 2010) e (GOMES et al., 2018), Devido a estas graves consequências, os padrões existentes, como IEEE 1547, IEC 62116, IEEE 929-2000 e AS 4777.3-2005, não permitem que a geração distribuída operem em modo ilhado (ZEINELDIN et al., 2007). De acordo com o padrão IEEE 1547, a condição de ilhamento deve ser detectada e desconectada em até 2 segundos da rede de distribuição, esse tempo pode não ser suficientemente pequeno para permitir a desconexão da GD, antes da tentativa de religamento após um disparo na curva rápida do religador.

O tempo morto para religamento adotado pelas concessionárias normalmente varia entre 20 e 60 ciclos da frequência fundamental. Nesse caso, é necessário aumentar o tempo morto de religamento e instalar dispositivos que bloqueiam o religador, para o caso de presença de tensão na linha de distribuição (MARCHESAN, 2016).

Este artigo apresenta os métodos de detecção de ilhamento e uma visão abrangente das técnicas de processamento de sinais. As técnicas de processamento de sinais quando aliadas as técnicas comuns de detecção de ilhamento passivo podem resultar em uma

boa metodologia de detecção de ilhamento. Uma comparação de desempenho entre as técnicas de detecção de ilhamento baseadas em processamento de sinais com as técnicas existentes também será abordada.

2 | CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO

As técnicas de detecção de ilhamento são classificadas em remotas e locais, sendo que os métodos locais são divididos em técnicas ativas, passivas, híbridas (que possuem características das técnicas ativas e passivas), e técnicas com base em processamento de sinais, conforme pode ser notado na Figura 2.0. Dessas, as técnicas passivas são mais vantajosas devido à menor degradação da qualidade da energia, menor custo e uso difundido pelas concessionárias de energia.

No entanto, as principais limitações dessas técnicas são que elas possuem grandes zonas de não detecção e requerem configuração de limites. Por outro lado, várias técnicas de processamento de sinal e inteligência artificial tem sido usadas para superar as limitações do método passivo. As técnicas de processamento de sinais, em particular, são adotadas devido à sua versatilidade, estabilidade, economia e facilidade de modificação.

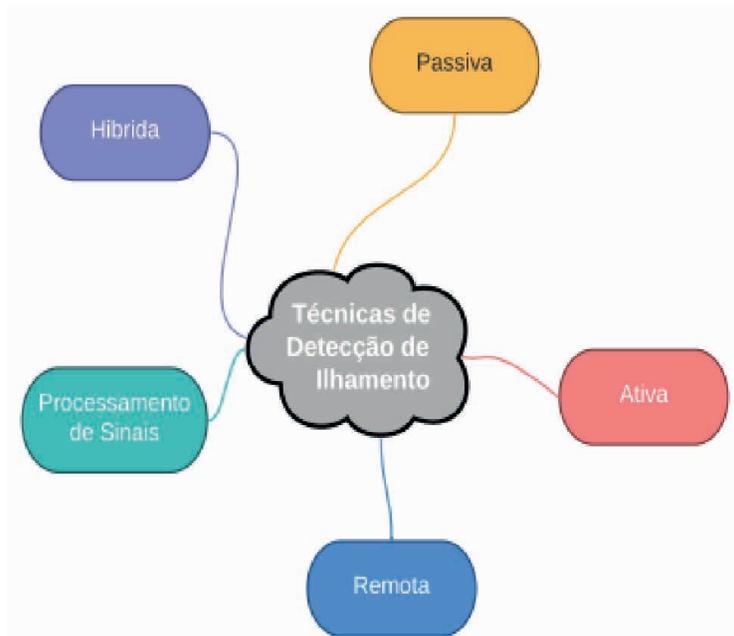


Figura 2.0 – Categorização das técnicas de detecção de ilhamento.

Fonte: Autora

2.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO REMOTOS

As técnicas de detecção de ilhamento remoto funcionam com base no princípio da comunicação entre a concessionária e a GD. Essas técnicas apresentam alta confiabilidade, não possui ZND, o tempo de resposta é mais rápido, impacto zero na qualidade da energia e funcionam de forma eficaz em vários sistemas de GDs. No entanto, as técnicas remotas são muito caras para implementação e necessitam de um sistema de comunicação rápido e confiável. Os exemplos de técnicas remotas são discutidos em (MARCHESAN, 2016), (VELASCO et al., 2010), (YU; MATSUI; YU, 2010), (RAZA et al., 2015) e (MISHRA; CHANDAK; ROUT, 2019) e são apresentados a seguir: Técnicas baseadas em Sistema com *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA): Utilizam um sistema supervisão para monitorar o estado de todas as chaves e disjuntores do Sistema Elétrico de Potência. O estado dos disjuntores indicará a porção do sistema que se encontra isolado, caso haja as GDs que continuem alimentando a porção ilhada, os esquemas de Teleproteção podem ser utilizados. É uma técnica confiável., entretanto pouco empregada em redes de distribuição devido ao elevado custo de implementação, que cresce com o aumento da complexidade do sistema.

2.1.1 Técnicas baseadas em Sistemas Power Line Carrier Communication (PLCC)

Utilizam a estrutura existente de linhas do sistema elétrico como canal de comunicação. Monitora os sinais que são continuamente transmitidos dos alimentadores de distribuição para os geradores distribuídos equipados com receptores. Se em algum ponto do sistema o sinal for interrompido, não sensibilizando os receptores instalados nos geradores distribuídos, o ilhamento será identificado. Nesse caso, não há as mesmas implicações, discutidas para os sistemas SCADA, quanto a mudanças na estrutura do sistema elétrico, pois dependem apenas do enlace de comunicação entre os geradores distribuídos e a concessionária. Embora seja uma técnica com elevada confiabilidade, caso haja a interrupção momentânea do sinal de tensão da rede, o sistema poderá desconectar os geradores distribuídos indevidamente.

2.1.2 Técnica baseada na Inserção de Impedância

Um pequeno valor de impedância (geralmente um banco de capacitores) é inserido no momento do ilhamento na GD. A inserção do capacitor regula a potência reativa, o que afeta indiretamente o equilíbrio de potência entre a geração e a carga. Além disso, a tensão e a frequência também são afetadas devido à potência reativa obtida do banco de capacitores. A distorção de frequência relacionada é detectada pelo relé de frequência localizado no lado da rede com o propósito de detectar o ilhamento. A Figura 3.0 descreve a técnica de inserção de impedância para detectar o ilhamento. Existem, algumas

desvantagens, como o custo do capacitor, baixo tempo de resposta e atraso na comutação do relé.

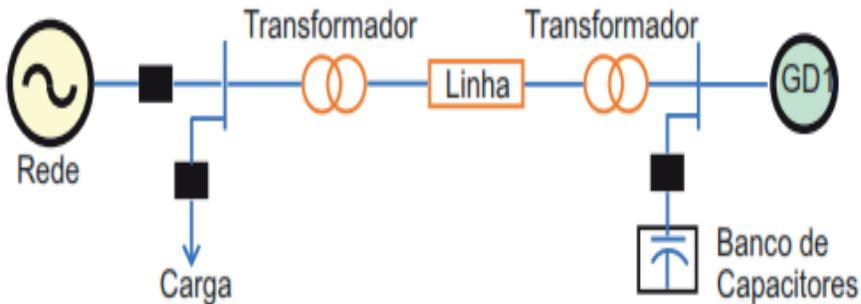


Figura 3.0 – Técnica baseada na Inserção de Impedância.

Fonte: Adaptado de (RAZA et al., 2015).

2.1.3 Técnicas baseadas em Unidades de Medidas Fasoriais (PMU)

Representado na Figura 4.0, onde o ilhamento é detectado comparando-se a diferença entre o ângulo sincro fasores do lado da rede e do lado da carga com o ângulo limite predefinido. Uma ZND muito pequena é obtido por esse tipo de técnica. A complexidade do projeto e o alto custo de implementação são as principais desvantagens da técnica baseada em PMU.

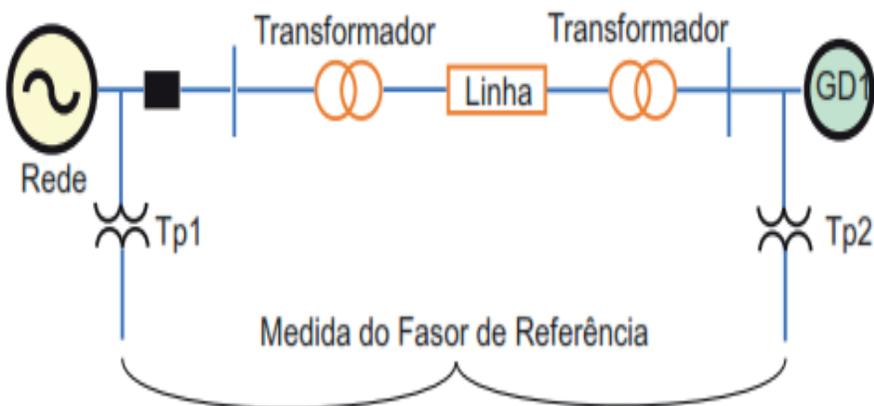


Figura 4.0 – Técnica baseada em Unidades de Medidas Fasoriais.

Fonte: Adaptado de (RAZA et al., 2015).

2.1.4 Transferência Direta de Disparo

Nesta técnica, uma unidade de controle central é usada para monitorar todo o disjuntor.

No momento do ilhamento, o algoritmo central regula a condição de operação dos geradores (permanecendo ligados ou desligados) de acordo com o sinal recebido do sistema SCADA integrado. A complexidade do projeto e o alto custo de implementação são os deméritos dos esquemas de Transferência Direta de Disparo. O princípio de operação do esquema de Transferência Direta de Disparo é ilustrado na Figura 5.0.

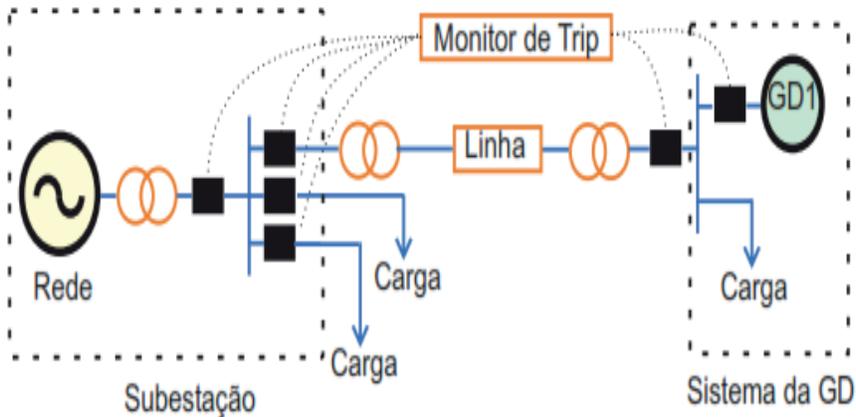


Figura 5.0 – Técnica baseada na Transferência Direta de Disparo.

Fonte: Adaptado de (RAZA et al., 2015).

2.2 MÉTODOS LOCAIS

A operação dos métodos locais utiliza as medidas de tensão, corrente, frequência, ângulo de fase, potência e distorção harmônica no local de instalação do gerador distribuído para identificar a condição de ilhamento. Esses métodos são divididos em técnicas ativas, passivas e híbridas. As técnicas ativas utilizam os sinais do Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e inserem perturbações controladas para facilitar a detecção do ilhamento; as técnicas passivas utilizam apenas os sinais disponíveis no PAC e as técnicas híbridas que são uma combinação de ambas as técnicas locais, passivas e ativas, para a detecção do ilhamento.

2.2.1 Técnicas Locais Ativas

Os métodos ativos de detecção de ilhamento inserem no sistema de distribuição uma condição instável que é estabilizada pela conexão com o sistema principal, ou

provocam uma perturbação que é absorvida pelo sistema interligado. Quando ocorre o ilhamento, a conexão com o sistema interligado é perdida e os parâmetros das gerações distribuídas (tensão, frequência, impedância, entre outros) sofrem uma variação que é utilizada para a detecção de ilhamento. Em geral esses métodos não apresentam zona de não detecção. Por outro lado, geralmente causam a deterioração da qualidade da energia elétrica e estão associados a geradores que utilizam inversores para a conexão com a rede elétrica (MARCHESAN, 2016). Algumas das técnicas ativas mais comuns são Detecção do Erro da Potência Reativa Exportada (em inglês *Reactive Power Export Error Detection RPEED*) (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009), Medição de Impedância (Ku Ahmad; SELVARAJ; RAHIM, 2013) e (O’Kane; Fox, 1997), *Slip Mode Frequency Shift Method* (SMS) (Lopes; Huili Sun, 2006) e (Liu et al., 2010), *Active Frequency Drift* (AFD) (De Mango et al., 2006), *Frequency Jump* (FJ) (LI et al., 2014), *Active Frequency Drift with Positive Feedback* (AFDPF) (Ropp; Begovic; Rohatgi, 1999), *Sandia Frequency Shift* (SFS) (Zeineldin; Kennedy, 2009), (Ku Ahmad; SELVARAJ; RAHIM, 2013), *Sandia Voltage Shift* (SVS) (VELASCO et al., 2010), Variação da Potência Ativa e Reativa (VELASCO et al., 2010), (LI et al., 2014) e (De Mango et al., 2006), Injeção de Corrente de Sequência Negativa (ICSN) (Karimi; Yazdani; Iravani, 2008) e (VELASCO et al., 2010), Injeção de Sinal de Alta Frequência (ISAF) (Reigosa et al., 2012) e (Reigosa et al., 2014), Capacitor Virtual (CHIANG; JOU; WU, 2012), Indutor Virtual (Jou; Chiang; Wu, 2007) e Método de Perturbação de Fase (em inglês *Phase Perturbation Method-PLL*) (VELASCO et al., 2010).

A maioria dessas técnicas são utilizadas para GDs do tipo inversor. Além disso, as características dessas técnicas estão resumidas na Tabela 1.0 (RAZA et al., 2015).

Técnicas	Tempo de Detecção	Taxa de Erro de Detecção	Impacto na Qualidade de Energia	ZND
RPEED	2 s	Baixo	Degrada	Pequeno
Medição de Impedância	0,77 – 0,95 s	Baixo	Degrada	Pequeno
SMS	0,4 s	Baixo	Degrada	Pequeno
AFD	Até 2 s	Alto	Degrada	Grande se o valor de Q for alto
FJ	75 ms	Baixo	Degrada	Pequeno
AFDPF	1 s	Menor que AFD	Degrada pouco	Menor que AFD
SFS	0,5 s	Baixo	Degrada pouco	Muito pequeno
SVS	0,5 s	Baixo	Degrada pouco	Muito pequeno
Variação da Potência Ativa e Reativa	0,3 – 0,75 s	Alto	Degrada	Muito pequeno
Injeção de Corrente de Sequência Negativa	60 ms	Baixo	Degrada	Nenhum
Injeção de Sinal de Alta Frequência	Pouco ms	Baixo	Degrada pouco	Muito pequeno
Capacitor Virtual	20 – 51 ms	Baixo	Degrada pouco	Muito pequeno
Indutor Virtual	13 – 59 ms	Baixo	Degrada pouco	Muito pequeno

Método de Perturbação de Fase	120 ms	Baixo	Insignificante	Muito pequeno
-------------------------------	--------	-------	----------------	---------------

Tabela 1 . Características das diferentes técnicas ativas

Dessa forma, as técnicas ativas reduzem ZND e diminuem a taxa de detecção de erro. Por outro lado, ao injetar perturbações nos sistemas de potência surgem a necessidade de adicionar controladores/equipamentos eletrônicos de potência. Dessa forma, a complexidade do sistema é aumentada e a qualidade da energia é reduzida. Além disso, é necessário um tempo de detecção adicional para observar a resposta do sistema de potência mediante às perturbações. Conseqüentemente, a estabilidade do sistema é degradada.

2.2.2 Técnicas Locais Passivas

As técnicas de detecção de ilhamento passiva monitoram basicamente os parâmetros do sistema, como frequência, tensão e taxa de distorção harmônicas no ponto de acoplamento comum ou nos terminais de GD, e os comparam com um valor limite predeterminado para detecção de ilhamento. As técnicas de detecção de ilhamento passiva não causam nenhuma perturbação no sistema, não deteriora a qualidade de energia. São mais utilizadas por apresentar custo reduzido para sua implementação, principalmente os métodos baseados em frequência. Contudo, no caso da potência produzida pela GD seja semelhante a potência consumida pelas cargas, o ilhamento pode não ser detectado, apresentando grandes ZNDs (MARCHESAN, 2016) e (VELASCO et al., 2010). Algumas das técnicas passivas mais comuns foram discutidas em (MARCHESAN, 2016), (VELASCO et al., 2010), (Zamani; Golshan, 2018), (Bekhradian; Davarpanah; Sanaye-Pasand, 2019) e (LI et al., 2014).

2.2.2.1 Sub/Sobrefrequência

Durante a operação conectada da GD com o sistema interligado, a frequência é controlada pelo sistema, e as variações das cargas e gerações locais não propiciam alterações perceptíveis na frequência devido ao alto momento de inércia do sistema interligado. No caso de um ilhamento, a abertura da conexão com o sistema interligado produz uma variação de potência. Esta variação de potência não é compensada pelos geradores ilhados resultando em uma variação da frequência que é identificada pelo relé ANSI 81. Quando o fluxo de potência no ponto de desconexão com o sistema interligado é baixo, a variação de frequência é muito pequena e insuficiente para sensibilizar o relé de sub/sobrefrequência, surgindo assim uma ZND. O tamanho da ZND está diretamente associado com os limites ajustados no relé ANSI 81. Ajustes de limites mais próximos à frequência nominal tendem a diminuí-la, entretanto, outros eventos tais como curtos-

circuitos e chaveamento de grandes blocos de carga podem gerar disparos indesejáveis para ajustes muito sensíveis (MARCHESAN, 2016).

2.2.2.2 Sub/Sobretensão

A proteção Sub/Sobretensão (ANSI 27/59) fundamenta-se pela determinação do valor eficaz da tensão na barra ao qual estão conectados, e considerando uma janela de medida de alguns ciclos elétricos sobre a forma de onda dessa tensão. Antes de ser processado o sinal é filtrado para eliminar imprecisões na medida. A proteção Sub/Sobretensão são os mais empregados nos esquemas que utilizam medidas da tensão (VIEIRA JÚNIOR, 2006).

2.2.2.3 Deslocamento de Fase ou Salto Vetorial (Vector Shift)

Quando uma corrente flui entre a GD e o Sistema de Distribuição provoca uma queda de tensão sobre a impedância equivalente entre eles. A ocorrência de ilhamento gera uma brusca alteração na corrente, provocando uma variação na fase da tensão que é detectada pelo relé de Salto vetorial (ANSI 78). Esse relé possui desempenho semelhante aos relés baseados em frequência (MARCHESAN, 2016).

Os relés de Deslocamento de Fase medem a duração de um ciclo elétrico e iniciam uma nova medição toda vez que a forma de onda da tensão passar por zero. A duração medida desse ciclo é então comparada com a duração do ciclo anterior, que permanece armazenada no relé. Essa variação da duração do ciclo é proporcional ao deslocamento de fase, que é o sinal de entrada do relé. Caso esse sinal seja maior que um valor ajustado no relé, esse opera enviando outro sinal que comanda a abertura do disjuntor do gerador (VIEIRA JÚNIOR, 2006). Para os relés de Deslocamento de fase recomenda-se um ajuste de $\pm 6^\circ$, entretanto no caso de geradores distribuídos em redes com baixas potências de curto-circuito no ponto de interligação, recomenda-se um ajuste de $\pm 12^\circ$ para minimizar casos de falsa operação do relé quando correm chaveamentos de grandes blocos de carga (VIEIRA JÚNIOR, 2006).

2.2.2.4 Taxa de variação da frequência (Rate of Change of Frequency, ROCOF)

Esta técnica é considerada como confiável para detectar a condição de ilhamento quando existe variação de frequência que é moderadamente lenta, o que acontece quando o desbalanço de potência ativa entre a geração e a carga é pequeno demais no sistema isolado. O desbalanço entre a potência ativa gerada e consumida durante o ilhamento faz com que a frequência varie com uma certa taxa por segundo. O relé que monitora a taxa de variação da frequência com o tempo é o ANSI 81R que calcula a derivada da frequência no tempo, e se esta exceder um limiar, o sistema é considerado ilhado (MARCHESAN, 2016) e (Velasco et al., 2011). A faixa de ajustes típica disponível nos relés comerciais é 0,1

Hz/s a 10 Hz/s e seus ajustes típicos, quando instalados em geradores distribuídos para a detecção de ilhamentos estão na faixa de 0,10 a 1,20 Hz/s. As ZNDs estão relacionadas com os limiares e podem ocorrer disparos falsos devido a curtos-circuitos (VIEIRA JÚNIOR, 2006).

2.2.2.5 Taxa de variação de frequência sobre variação de potência

No decorrer da operação normal do sistema interligado, as variações de potência não acarretam grandes variações de frequência, pois o momento de inércia de todo o sistema interligado é muito grande. Portanto, nessas condições, a variação da frequência em relação à variação da potência é pequena. Entretanto, durante a operação ilhada a constante de inércia é muito menor, assim, pequenas variações de potência causam grandes variações de frequência, resultando em valores maiores de (MARCHESAN, 2016) e (VELASCO et al., 2010).

2.2.2.6 Medição de Harmônicos

A distorção harmônica total da tensão é medida no PAC e compara com um valor limite definido para a desconexão do inversor. No modo de rede conectada, a tensão no PAC é considerada a tensão da rede e a THD medida correspondente é considerada relativamente insignificante. Porém, no modo de ilhamento, a corrente harmônica extra gerada pelo inversor é comunicada à carga. Além disso, a impedância de carga geralmente tem um valor mais alto do que a impedância da rede. A tensão harmônica é medida pela interação da corrente harmônica e a impedância da rede. A condição de ilhamento é detectada quando a distorção harmônica total da tensão excede um valor limite predefinido. Essa técnica pode falhar em caso de carga com alto fator de qualidade e fortes características de filtro passa-baixa (De Mango et al., 2006).

2.2.2.7 Mudança de Impedância

A impedância da seção ilhada é maior do que a impedância da rede elétrica. Quando uma parte da rede é desconectada da concessionária, a impedância daquela seção aumenta (O’Kane; Fox, 1997) e (Hopewell; Jenkins; Cross, 1996). Assim, o ilhamento pode ser detectado monitorando a mudança de impedância no lado GD.

2.2.2.8 Desequilíbrio de Tensão

No modo de operação ilhado, A GD compartilha as cargas locais na área ilhada à medida que a rede é desconectada. Se a diferença de energia entre as GDs e as cargas locais for grande, o ilhamento pode ser detectado facilmente monitorando a mudança nos parâmetros no final da GD ou no PAC. Por outro lado, se for pequeno, a chance de falhar na detecção é alta (MISHRA; CHANDAK; ROUT, 2019).

2.2.2.9 Assinaturas Harmônicas

O método proposto por Merino et al. (2015) analisa as alterações da magnitude da tensão do 5º harmônico no PAC antes e depois da ocorrência da condição de ilhamento. O método foi aplicado em uma microrrede em escala de laboratório. Os resultados obtidos demonstram a redução das zonas de não detecção. Mesmo que o uso da tensão de 5º harmônico possa ser extrapolado para outras microrredes, um estudo preliminar análogo deve ser realizado para estabelecer os limites de trip, que dependerão das características específicas dos harmônicos de tais microrredes.

2.2.2.10 Desenvolvimento de Estimadores Dinâmicos

Os autores Al Hosani, Qu e Zeineldin (2015) propuseram um novo método no qual a ocorrência de ilhamento é estimada dinamicamente. A amplitude e o ângulo de fase do sinal de corrente no PAC e o sinal de tensão na extremidade das GDs são estimados pelos estimadores dinâmicos modelados. Um algoritmo de dois níveis é utilizado para estimar e detectar a ocorrência de ilhamento para os sistemas contendo GDs únicas e múltiplas. A análise transiente é realizada para corrigir a ZND. O resultado da simulação comprovou a eficiência para detecção de ilhamento em sistema de microrrede.

2.2.3 Técnicas Locais Híbridas

Este tipo técnica emprega dois princípios diferentes baseados em técnicas ativas e passivas ao mesmo tempo com o objetivo de suprimir a limitação de uma técnica incorporando as vantagens da outra. Os métodos híbridos utilizam uma técnica passiva para realizar uma primeira avaliação do estado do sistema de distribuição. Quando uma anormalidade é detectada, um método ativo é empregado para forçar o sistema a uma condição que caracterize um ilhamento (MARCHESAN, 2016). A Figura 6.0 mostra o princípio de funcionamento das técnicas híbridas.

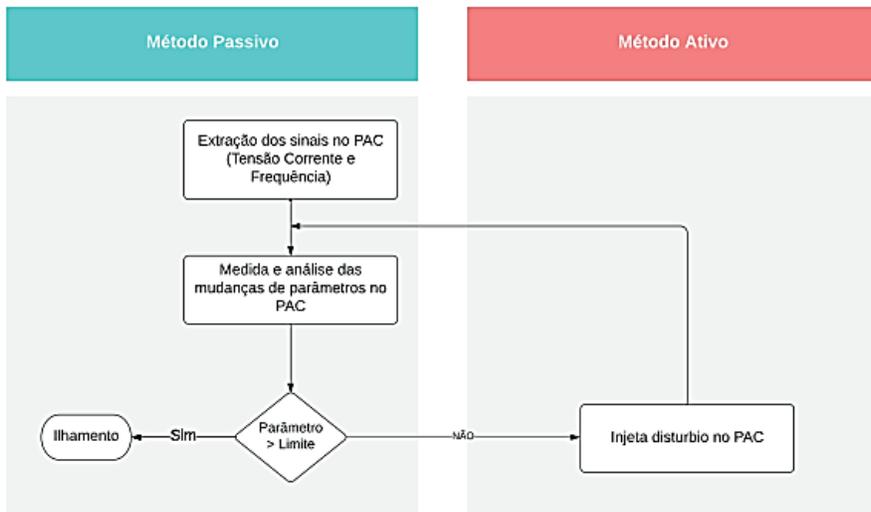


Figura 6.0 Princípio de funcionamento das técnicas híbridas.

Fonte: Adaptado de (Raza et al., 2015).

2.2.3.1 Realimentação positiva e Desequilíbrio de Tensão

A técnica de Realimentação Positiva é um método ativo (em inglês *Positive Feedback* (PF) e a técnica de Desequilíbrio de Tensão é um método passivo (em inglês *Voltage Imbalance* - VU). A ideia por trás desta técnica é monitorar a tensão nas três fases para determinar o desbalanço das tensões. Se ultrapassado o valor ajustado como limiar de VU, então o ajuste de frequência da GD será alterado pela realimentação positiva. Caso o ilhamento ocorra, a frequência do sistema irá variar com a perturbação inserida (Menon; Nehrir, 2007).

2.2.3.2 Tensão e deslocamento adaptativo de potência reativa - Adaptive Reactive Power Shift - (ARPS)

A taxa de variação da tensão em relação ao tempo é calculada para obter o valor de covariância necessário para essa abordagem. Esse valor é usado posteriormente para iniciar um algoritmo baseado em um método ativo secundário ARPS. Se ultrapassado o valor ajustado como limiar de covariância, então será inserida uma perturbação na corrente de eixo d (direto) da transformada de Park. Caso o ilhamento ocorra, a ação de deslocamento de fase é acelerada, levando a rápidos deslocamentos de frequência. (Yin; Chang; Diduch, 2006).

2.3 Técnicas de Processamento de Sinal para Detecção de Ilhamento

As técnicas de processamento de sinal (PS) são comumente usadas para melhorar o desempenho das técnicas de detecção de ilhamento passivo. As propriedades de versatilidade, estabilidade, economia e facilidade de modificação das técnicas de processamento de sinal ajudam os pesquisadores a extrair as características ocultas dos sinais medidos para detecção de ilhamento. Com base nessas características extraídas, pode-se decidir se o ilhamento ocorreu ou não. A Figura 7.0 apresenta as etapas básicas envolvidas na detecção de ilhamento utilizando as técnicas de processamento de sinal.

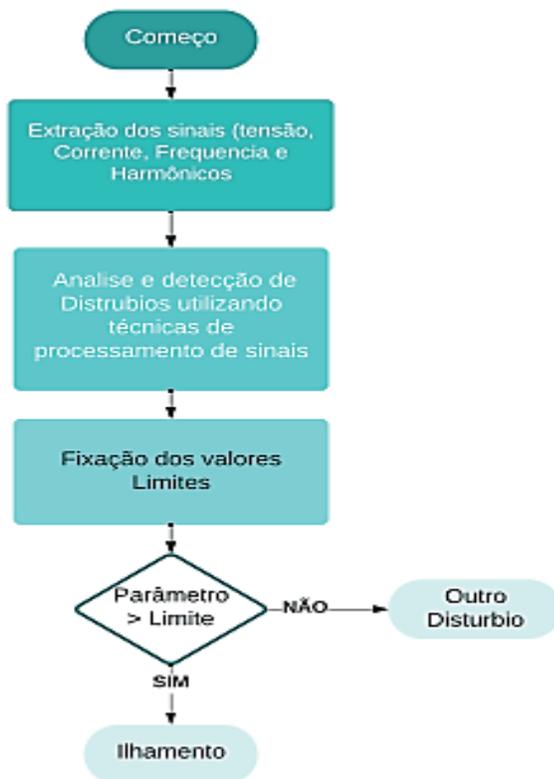


Figura 7.0 – Princípio de funcionamento das técnicas de processamento de sinais.

As ferramentas básicas de processamento de sinal, tais ferramentas são a transformada de Fourier, a transformada S, a transformada Hilbert-Huang, a transformada Wavelet e a transformada TT entre outras, que são empregues na detecção de ilhamento. A descrição dessas ferramentas de processamento de sinal usadas nas técnicas de detecção de ilhamento serão discutidas a seguir.

2.3.1 Técnicas de detecção de ilhamento baseadas na Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é a técnica mais comum na análise no domínio da frequência. Basicamente, representa um sinal como um somatório de termos sinusoidais de diferentes frequências. Ele extrai as características do sinal estacionário em frequências específicas, mas é incapaz de detectar a distribuição de tempo de diferentes frequências. Também não é capaz de resolver qualquer informação momentânea associada a flutuações (Karimi; Mokhtari; Iravani, 2000). Portanto, a análise tempo-frequência é proposta. A transformada janelada de Fourier (em inglês *Short-Time Fourier Transform* - STFT) é a modificação da transformada de Fourier. Ela divide o sinal em pequenos quadros, onde cada quadro pode ser considerado estacionário. Esses numerosos quadros do sinal são avaliados pela janela fixa e móvel. Esta janela móvel identifica a relação entre o tempo e a mudança na frequência (Dash et al., 2003). Porém, o STFT não pode analisar o sinal não estacionário devido à limitação da largura da janela fixa (Gu; Bollen, 2000). A transformada discreta de Fourier (em inglês *Discrete Fourier Transform* - DFT) é uma técnica muito dominante para a análise no domínio da frequência de sinais de tempo discretos. Ele transforma a sequência de tempo discreta de comprimento finito em sequência de frequência discreta de comprimento finito. A transformada rápida de Fourier (em inglês *Fast Fourier Transform* - FFT) também fornece resultados semelhantes aos da DFT, embora em menor quantidade de tempo. No entanto, não é adequado para a análise de sinais não estacionários, devido ao fato de retratar aqueles valores espectrais que não existem no sinal original.

Kim (2012) apresenta uma técnica passiva para detecção de ilhamento baseada em DFT para a extração dos recursos desejados. O algoritmo de detecção de ilhamento passivo para inversores é baseado nos componentes harmônicos da rede. Ele utiliza o fato de que os componentes harmônicos equivalentes no PAC são alterados de acordo com o *status* da conexão à rede. Esse método mostra uma ZND reduzida e tempo de detecção rápido em comparação com a abordagem convencional. A modelagem matemática é realizada e verificada por resultado experimental usando um processador digital de sinais (em inglês *Digital Signal Processors* - DSP) de alto desempenho. A fim de superar o problema de computação lenta e reduzir o tempo da DFT, o algoritmo de Goertzel é usado. É basicamente um tipo de transformada de Fourier discreta, cuja técnica é mais rápida de detecção de pitch em comparação com FFT e DFT. Ele funciona da perspectiva da operação de filtragem em uma frequência especificada, ou da perspectiva da DFT obtida em um curto período de tempo do sinal. Calculando diretamente a amplitude e a fase da frequência desejada do sinal de entrada, o que acaba reduzindo o tempo computacional (Gonzalez; Garcia-Retegui; Benedetti, 2007) , (Jacobsen; Lyons, 2003) e (Sozanski, 2006).

(Kim et al., 2011) Utilizam o algoritmo de Goertzel para reduzir o tempo de detecção de ilhamento em sistema fotovoltaico. No sistema proposto, o inversor injeta a corrente

de saída com um nono componente harmônico na rede e detecta a mesma em tensão no ponto de acoplamento comum. A ZND não existe nesse método, mesmo sob combinação perfeita de potência e carga. O impacto na qualidade da energia também é insignificante e o ilhamento é detectado em 2 ciclos.

2.3.2 Técnicas de detecção de ilhamento baseadas na transformada Wavelet

A transformada Wavelet (WT) também é usada para a análise do sinal. É um modelo matemático baseado na integral quadrada e na teoria dos grupos, semelhante ao FT. Ele decompõe um sinal em suas componentes em diferentes escalas de frequência (Habibi, 1995) e (Chen, 2005). A WT representa um sinal nos domínios do tempo e da frequência. Portanto, é adequado para examinar os sinais nas aplicações onde a resolução tempo-frequência é considerada necessária. Tem sido amplamente utilizado em aplicações de sistemas de potência, como detecção de distúrbios na qualidade de energia elétrica, extração de recursos, proteção de sistemas de potência e eliminação de ruído (Daubechies, 1990), (Santoso et al., 1996) e (Santoso; Powers; Grady, 1997).

A transformada Wavelet é mais vantajosa em comparação com as transformadas baseadas em Fourier (STFT, FFT e DFT). Isso se deve ao fato de que o tamanho da janela é fixo na transformada baseada em Fourier, mas varia na transformada Wavelet. Consequentemente, as resoluções de tempo-frequência não são comprometidas. Além disso, a transformada Wavelet determina as informações de tempo e frequência simultaneamente para baixas e altas frequências por janelas longas e curtas, respectivamente (MORSI; EL-HAWARY, 2010). A transformada Wavelet é categorizada em contínua (CWT) e transformada wavelet discreta (DWT). A CWT é usada na detecção de ilhamento através da análise da tensão GD. A decomposição de Mallat também é usada para extrair e eliminar o ruído do sinal (Yanping Zhu et al., 2008). Esse método reduz a eficiência computacional, introduzindo os numerosos coeficientes. Esse problema desvia a atenção dos pesquisadores para o DWT.

Pigazo et al. (2007) e Pigazo et al. (2009), utilizam a DWT para analisar o sinal de tensão de um sistema fotovoltaico monofásico. O método proposto usa Bi ortogonal 1,5 e 5 níveis de decomposição para detecção de ilhamento. A redução do número de sensores, minimização da carga computacional e complexidade são algumas das vantagens associadas a esta técnica. O DWT baseado na Wavelet mãe de Daubechies é usado em (HSIEH; LIN; HUANG, 2008). Examinando as variações de tensão e frequência. As características desse método são a simplicidade na programação, o aprimoramento da capacidade de detecção de ilhamento e a observação simultânea de perfis de qualidade de energia. O esquema proposto é testado e verificado em diversos cenários com flexibilidade, viabilidade e robustez.

Samantaray, Pujhari e Subudhi (2009) Utilizam a sequência negativa de sinais de

corrente e tensão são considerados pela DWT baseado em Daubechies db4. O desvio padrão e a mudança nos coeficientes de energia discriminam entre ilhamento e outras condições de perturbação. No método proposto, o ilhamento é detectado em 1 ciclo usando o primeiro nível de energia e desvios padrão. O método proposto utiliza as propriedades de compactação e localização do Daubechies db4 na diminuição da ZND. O método proposto é comparado com uma técnica passiva (sobretensão / subtensão e frequência) e é considerado muito eficiente e eficaz em todas as condições de trabalho (Hanif et al., 2010).

Karegar e Sobhani (2012) utilizaram a DWT para detecção de ilhamento em usinas eólicas. Os perfis de tensão são examinados pelo db5. O método proposto provou ser confiável sob diferentes condições de carga.

Hanif, Basu e Gaughan (2012) propuseram uma técnica baseada em DWT baseada na wavelet mãe db4 para ser utilizada nas GDs fotovoltaicas (em inglês *Photovoltaic PV*) conectados à rede. As mudanças espectrais nos componentes de alta frequência da tensão são analisadas para detecção de ilhamento. O esquema proposto é considerado muito eficaz e detectou condições de ilhamento em 0,05 s.

Sharma; Singh, (2012) utilizam a propriedade de localização e compactação da transformada wavelet diádica para detecção de ilhamento. Verificou-se que o esquema proposto discrimina os cenários de ilhamento e não ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede em mais de 1 ciclo.

LIU et al. (2005) apresentam o esquema de detecção de ilhamento baseado em WT para a operação autônoma da GD. As principais desvantagens associadas ao DWT são a integração das altas frequências e a medição de várias grandezas elétricas. Portanto, a Transformada de Pacote Wavelet (em inglês *Wavelet Packet Transform - WPT*) é proposta em (MORSI; EL-HAWARY, 2010). Esse esquema propõe um novo índice denominado taxa de variação do nó do índice de potência. Esse índice calcula a mudança da potência em cada sub banda da WPT. A base do WPT é db10, pois possui menos coeficientes Wavelet.

Shariatinasab e Akbari (2010) utilizaram a Wavelet mãe (Haar) para detecção de ilhamento. Esse tipo de Wavelet mãe requer os menores níveis de decomposição, portanto, possui o menor tempo de detecção. Esse método calcula o sinal de corrente no PAC e detecta o ilhamento dentro de 5,5 ms. O método proposto também é aplicável para ambientes com multi GDs.

Ning e Wang (2012) propuseram uma nova técnica de extração de características para detecção de ilhamento. Esse trabalho examinou as variações nos perfis de harmônicos para sistemas GD baseados em inversores, e é basicamente uma extensão de (Pigazo et al., 2009). A técnica de análise multi-resolução baseada na transformada Wavelet é empregada para extração de características, decompondo a tensão de saída em várias escalas. Cada escala produz uma sequência de coeficientes Wavelet com base na largura de banda de frequência. A mudança na proporção dos coeficientes Wavelet é usada para

detecção de ilhamento. Os resultados da simulação provam que o esquema proposto é bem-sucedido na detecção de ilhamento em todas as condições operacionais.

(Samui; Samantaray, 2012) e (Samui; Samantaray, 2013) propuseram uma nova técnica para detecção de ilhamento baseada na entropia singular Wavelet (em inglês *Wavelet Singular Entropy* - WSE). A WSE integra as vantagens da transformada Wavelet, decomposição de valor singular e entropia de Shannon. No esquema proposto, a Transformada Wavelet analisa o sinal de tensão trifásico e produz os coeficientes detalhados. A matriz de valor singular é calculada a partir desses coeficientes detalhados para determinar o WSE para cada fase. Finalmente, o índice WSE é produzido pela adição de todas as fases do WSE. O esquema proposto é comparado com os dois esquemas existentes ROCOF e taxa de mudança de potência (ROCOP) o esquema proposto detecta a condição de ilhamento efetivamente dentro de 10 ms.

2.3.3 Técnicas de detecção de ilhamento baseadas em transformada S

A transformada Wavelet extrai os recursos desejados do sinal dos domínios do tempo e da frequência. No entanto, o processamento em lote e a sensibilidade ao ruído são as desvantagens associadas a essa técnica. Para superar esses problemas, Stockwell, Mansinha e Lowe (1996) propõem a transformada S, Nesta técnica, as propriedades da STFT e WT são combinadas. É uma técnica de tempo-frequência com uma janela variável de STFT e uma expansão de WT. É baseado em uma janela gaussiana de localização escalável e fornece a resolução dependente da frequência (Ventosa et al., 2008), (Stockwell; Mansinha; Lowe, 1996) e (Dash et al., 2003). Fornecendo uma multi-resolução e mantendo a fase de cada componente de frequência inalterada. Transformando o sinal do domínio do tempo em domínios de frequência bidimensionais. As características espectrais locais são examinadas pelo espectro de frequência de amplitude e tempo ou pelo espectro de frequência de tempo de fase. Nessa ferramenta, a senoide é fixada em relação ao eixo do tempo e a janela gaussiana escalável localizada examina a forma mais abrangente dilatando a frequência de fase (DEHGhani, 2009) e (Mishra; Bhende; Panigrahi, 2008). A transformada S (ST) fornece resultados consideráveis na detecção e localização de perturbações devido ao ilhamento ou qualquer outra condição.

Ray et al. (2010), Apresentam uma técnica de detecção de ilhamento usando transformada S para um sistema híbrido. Nesse, foi Demonstrado que a transformada S em comparação com a transformada Wavelet para detecção de ilhamento pode ser melhor aproveitada.

Ray, Kishor e Mohanty (2010) extraíram a tensão de sequência negativa para detecção de ilhamento. Os autores, também compararam a WT e a ST em condições com ruído. Com base nos resultados da simulação, descobriu-se que a transformada S se mostrou mais eficiente para detecção de ilhamento em relação a WT. Uma nova técnica

que se baseia no detector de soma cumulativa baseado na transformada S (CUSUM) é proposta em (Samantaray; Samui; Chitti Babu, 2010). Nesta técnica, os conteúdos de energia espectral dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa são usados para cálculo. Foi verificado que a técnica proposta detecta a condição de ilhamento em 25 ms com uma precisão de mais de 92%.

O problema associado à ST é que seu desempenho enfraquece em certas situações operacionais, como transientes. A ST é modificada para a transformada S hiperbólica (em inglês *Hyperbolic S Transform* - HST) para superar o efeito adverso dos transientes e realizar uma técnica de processamento de sinal superior (BISWAL; DASH; PANIGRAHI, 2009) e (Huang; Xu; Liu, 2010). Em comparação com a ST, a HST tem uma janela hiperbólica pseudo Gaussiana. Possui dependência de frequência em sua forma em integração com sua largura e altura. Essa janela assimétrica fornece melhor resolução tanto no tempo quanto na frequência, tanto em frequências altas como nas baixas.

Mohanty et al. (2012), utilizaram a HST para detectar a condição de ilhamento. A mudança na energia e no desvio padrão do sinal de tensão no PAC é resolutivo, e com base nesses valores um limite adequado é usado para detectar o ilhamento. Os resultados revelam as vantagens do esquema proposto para detecção de ilhamento em ambientes com ruído e sem ruído.

2.3.4 Técnicas de Detecção de Ilhamento Baseadas em Transformada Tempo-Tempo

Muitas técnicas de frequência variável no tempo são usadas para processar sinais não estacionários. Algumas das técnicas mais comuns são STFT, WT e ST. No entanto, essas transformadas introduzem redundância, passando de um sinal de tempo 1-D (unidimensional) para um sinal de frequência de tempo (ou escala de tempo) 2-D. Em 2003, uma técnica incipiente baseada na transformada S é proposta, chamada de transformada tempo-tempo (em inglês *time-time transform* - tt). Inclui redundância no tempo passando de um sinal de tempo 1-D para um sinal de tempo-tempo 2-D (PINNEGAR; MANSINHA, 2003) e (Simon; Schimmel; Danobeitia, 2008).

Khamis, Shareef e Wanik (2012) propuseram uma nova ferramenta de processamento de sinal, isto é, transformada TT para detecção de ilhamento. Os resultados do esquema proposto foi capaz de detectar o cenário de ilhamento de forma precisa e ágil, pois cada evento possui padrões distintos e únicos.

Mohanty et al. (2012) utilizaram a transformada TT para extrair os recursos para a detecção de ilhamento. Os resultados obtidos são comparados com Wavelet e transformada S. Verifica-se que a técnica proposta é superior para detecção de ilhamento em todas as condições.

2.3.5 Técnicas de Detecção de Ilhamento Baseadas na Transformada de Hilbert-Huang

A transformada de Hilbert-Huang (em inglês *Hilbert-Huang Transform* - HHT) é uma nova técnica de processamento de sinais que permite a separação de componentes dos mesmos baseados em interpolação cúbica e extração de valores médios. O método, denominado Modo de Decomposição Empírico (em inglês *Empirical Mode Decomposition* EMD) faz a separação dos sinais utilizando uma metodologia denominada “peneiramento” e cada componente retirada do sinal é denominada Função de Modo Intrínseco (em inglês *Intrinsic Mode Function* - IMF). O método básico de extração de cada IMF é realizado detectando-se os valores dos picos superiores e inferiores do sinal, seguido da aplicação de método de interpolação cúbica, que gera uma envoltória superior para os valores de pico superiores e uma envoltória inferior relacionada aos valores de pico inferiores. No passo seguinte uma função correspondente ao valor médio pontual entre as duas envoltórias é obtido, o sinal resultante dessa média passa por um critério de parada simplificado onde o número de picos pode diferir no máximo de um em relação ao número de cruzamentos por zero, quando isto ocorre obtém-se uma função de modo intrínseco. No caso, o critério de parada não ser obtido, extrai-se do sinal atual em análise, a função correspondente ao valor médio pontual. O sinal correspondente a essa diferença é então submetido novamente a entrada do algoritmo na busca de uma das IMFs que compõem o sinal. Nesse aspecto o método é perfeitamente adaptativo (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1964) e (Drummond; Sutanto, 2010). O domínio dessa técnica de processamento de sinais sobre as outras técnicas, como: WT, STFT e a ST, foi apresentado na literatura (PENG; TSE; CHU, 2005), (DONNELLY, 2006) e (Ayenu-Prah; Attoh-Okine, 2009).

(Mohammadzadeh Niaki; AFSHARNIA, 2014) apresentaram um esquema de detecção de ilhamento passivo incipiente para GDs baseados em inversores que utiliza HHT para extração de características. Os resultados da simulação mostraram que o esquema proposto pode detectar eficazmente o ilhamento em menos de dois ciclos. Além disso, a simplicidade, eficácia, rapidez e robustez da técnica contra ruído são verificadas em sistemas multi-GD.

2.3.6 Técnicas de Detecção de Ilhamento Baseadas em Processamento de Sinal com Classificador Inteligente

As técnicas de detecção de ilhamento baseadas exclusivamente nas ferramentas de processamento de sinal foram discutidas. Em técnicas de detecção de ilhamento baseadas em processamento de sinal, os recursos desejados são extraídos do sinal de entrada e comparados a um valor limite. A seleção do valor limite é uma tarefa bastante difícil. Se seu valor for definido como alto, o ilhamento não será detectado, enquanto se for definido como muito baixo, ele desarma a GD mesmo no caso de distúrbios. Para superar esse

problema, classificadores inteligentes foram combinados com técnicas de detecção de ilhamento baseadas em processamento de sinal. Classificadores inteligentes comumente usados em técnicas de detecção de ilhamento baseadas em processamento de sinal são árvore de decisão (em inglês *Decision Tree* - DT), rede neural artificial (em inglês Artificial Neural Network - ANN), rede neural probabilística (em inglês Probabilist Neural Network - PNN), sistema de inferência neuro difuso adaptativo (em inglês *Adaptative Neuro Fuzzy Inference System* - ANFIS), floresta aleatória (em inglês *Random Florest* RF), máquina de vetor de suporte (em inglês *Support Vector Machine* - SVM) e controle de lógica *Fuzzy*. Esses classificadores inteligentes aumentam a eficiência, velocidade, precisão e podem detectar a condição de ilhamento sem usar nenhuma configuração de limite, como no caso de técnicas passivas baseadas em processamento de sinal comuns. O princípio de funcionamento básico é mostrado na Figura 8.0.



Figura 7.0 – Diagrama de blocos básico da técnica baseada em PS com classificador inteligente.

Guiliang Yin (2005) apresentou uma nova técnica para detecção de ilhamento baseada em FFT para extração de características e sistema imune artificial (em inglês *Artificial Immune System* - AIS) como classificador inteligente, respectivamente. Com base

nos resultados da simulação, verificou-se que o esquema proposto é muito eficiente e requer um processador digital de sinais muito avançado para sua implementação.

Os pesquisadores Kar e Samantaray (2013) e Abd-Elkader, Allam e Tageldin (2014) utilizaram um classificador inteligente, juntamente com o DFT para verificar a eficiência e confiabilidade do sistema. (KAR; SAMANTARAY, 2013), deriva 27 recursos por meio do pré-processador DFT para treinar o modelo de mineração de dados. O modelo de mineração de dados consiste em árvore de decisão (DT), floresta aleatória (RF) e máquina de vetor de suporte (SVM). O esquema proposto é testado levando em consideração o inversor e uma micro rede síncrono. esse artigo comparou a precisão desses classificadores inteligentes. A precisão do SVM e RF é muito próxima ao DT, mas a implementação do DT no DSP/FPGA é bastante fácil em comparação ao SVM e RF. O esquema proposto detecta a condição de ilhamento em menos de 1,5 ciclos. Esse modelo DT também é comparado com (Far; Rodolakis; Joos, 2012), que levou em consideração 11 recursos para detecção de ilhamento. Conclui-se que o esquema proposto é mais abrangente na realização de avaliações e impacta seriamente os limites de decisão. O esquema proposto também fornece uma solução mais generalizada para GD síncrona e baseada em inversor em comparação com os modelos anti-ilhamento inteligentes existentes baseados apenas em GD síncrona (Samantaray et al., 2010).

Abd-Elkader, Allam e Tageldin (2014) processaram os sinais de tensão e corrente com DFT para extrair os componentes do 2° harmônico. Esses componentes são alimentados por redes neurais artificiais (RNA) para tomada de decisão. Esse esquema passivo proposto para geração eólica com DFIG detecta a condição de ilhamento em 2 ciclos e não tem ZND se os valores de carga estiverem dentro dos limites estabelecidos.

Arachchige e Rajapakse (2011) propuseram uma nova abordagem de reconhecimento de padrões para detecção rápida de ilhamento. Uma DWT é usada para extrair os recursos desejados dos sinais transientes de tensão e corrente e para treinar o classificador da árvore de decisão (DT) para detecção de ilhamento. O esquema proposto é testado em um sistema de distribuição de média tensão com vários GDs e detecta ilhamento em 24 ms. O mesmo esquema foi testado em (Lidula; Rajapakse, 2010), para GDs síncronos e de indução. Nesse caso, ele detecta a condição de ilhamento em dois ciclos, com mais de 98% de precisão. O método proposto é novamente verificado para GD baseado em conversor de fonte de tensão (em inglês *Voltage Source Converter* - VSC) e gerador de indução. Nesse cenário, o ilhamento é detectado em 3 ciclos. Além disso, também é robusto, apesar do fato de que os perfis de tensão e corrente estejam com muitos sinais de ruído.

Uma nova técnica foi proposta por (SHAYEGHI; SOBHANI, 2014) com base no classificador ANFIS e DWT baseado em wavelet mãe 'Haar'. A técnica proposta reduz completamente a ZND dentro dos limites estabelecidos.

Heidari, Seifossadat e Razaz (2013) utilizaram a DWT e a DT para examinar o sinal transiente de tensão para detecção de ilhamento. Verifica-se que o esquema proposto

detecta a condição de ilhamento dentro de um ciclo. Simplicidade, velocidade, baixo custo e alta precisão são os méritos associados a essa técnica.

DWT e Rede Neural Artificial (RNA) foram utilizadas por Fayyad e Osman (2010) para a detecção de ilhamento. O método proposto detecta a condição de ilhamento com alta precisão. Além disso, também é comprovado que a técnica proposta é superior às técnicas passivas comumente utilizadas, por exemplo: sub/sobretensão e sub/sobrefrequência.

Embora a ST tenha o potencial de avaliar as perturbações dos sinais de potência, ela requer mais tempo computacional para processar o sinal. Existem alguns métodos que reduzem o tempo computacional para o cálculo da ST discreto, como a transformada generalizada da família de Fourier (em inglês *Generalized Fourier Family Transform* - GFT) (Brown; Lauzon; Frayne, 2010). A formulação discreta e não redundante dessa transformada, bem como os algoritmos para calcular as transformadas direta e inversa, também são desenvolvidos. Esses utilizam amostragem eficiente do plano de tempo-frequência e têm a mesma complexidade computacional da FFT. Quando configurado apropriadamente, esse novo algoritmo mostra o espectro contínuo da transformada S de forma eficiente e não redundante, permitindo que os sinais sejam transformados em milissegundos em vez de dias, em comparação com o algoritmo original da transformada S.

Dash, Padhee e Panigrahi (2012) propuseram um método de detecção de ilhamento incipiente baseado no sistema da transformada S rápida discreta (em inglês *Discrete Fast S Transform* - DFST) e *Fuzzy*. Tanto a tensão de sequência negativa quanto as correntes são quantificadas no local GD, que são utilizadas como entradas para o módulo de processamento da DFST, resultando em recursos como energia espectral e desvio padrão. Para detectar ilhas de energia, as características da DFST exibem as flutuações que são fornecidas como entradas para o classificador *Fuzzy* para o diferenciar um evento de ilhamento e não-ilhamento. Ao utilizar o esquema proposto em diferentes redes de distribuição, Verifica-se que o tempo de detecção é menor que um ciclo.

Um estudo comparativo sobre algumas das técnicas de processamento de sinal para detecção de ilhamento foi apresentado em (Mohanty et al., 2015). O esquema proposto extrai os componentes de sequência negativa do sinal de tensão usando métodos HST, TT e morfologia matemática. A decisão entre as condições de ilhamento e não-ilhamento é feita pela SVM. É apresentado que os métodos de HST, TT e morfologia matemática são mais precisos em comparação com ST e WT comumente usados. Além disso, a técnica proposta também funciona de forma eficaz em ambientes com ruído e sem ruído.

Khamis e Shareef (2013) utilizaram classificadores de função de base radial (em inglês *Radial Basis Function* - RBF) e PNN para tomada de decisão em combinação com a técnica de espaço de fase. Com base nos resultados, verifica - se que o PNN pode ser uma boa opção e funciona com mais eficiência que o RBF.

Khamis et al. (2015) avaliaram o desempenho entre a rede neural de função de base radial (em inglês *Radial Basis Function Neural Network* - RBFNN) e a PNN usando

a técnica de espaço de fase como um extrator de sinal. Os resultados comprovaram que o classificador PNN se mostraram superiores ao RBFNN com precisão de 100 %.

(ZEINELDIN et al., 2007) apresentaram um novo método de detecção de ilhamento com base no monitoramento da frequência do gerador. A frequência de oscilação e o fator de amortecimento da forma de onda de saída de frequência do gerador são extraídos usando a estimativa de mínimos quadrados totais de parâmetros de sinal via algoritmo de técnicas de invariância rotacional. O método proposto foi testado em vários cenários, como mudança de carga, curto-circuito e chaveamento de capacitor. A vantagem do método foi apresentar uma ZND reduzida.

A Tabela 2 resume as técnicas de detecção de ilhamento baseadas em processamento de sinal com classificadores inteligentes.

PS	Referência	CI	Tipo de DG	Tempo de detecção	Méritos e Deméritos
FFT	Guiliang	AIS	Baseado em inversor	Os autores não apresentaram	Muito eficiente, mas a implementação requer DSP avançado devido à alta complexidade computacional
DFT	Kar	Modelo de mineração de dados (DT, RF, SVM)	Síncronos e baseados em inversores	Menos de 1,5 ciclos	Muito rápido
DFT	Abd-Elkader	ANN	Parque Eólico DFIG	Dentro de 2 ciclos	ZND ocorrerá se o valor da carga estiver longe dos limites prescritos
DWT	Shayeghi	ANFIS	Conversor de fonte de tensão baseado em GDs	1 s aprox.	Supera o problema de definir o limite
DWT	Arachchige	Árvore de decisão	Múltiplos GDs	24 ms	Muito rápido
DWT	Lidula	Árvore de decisão	Geradores de indução e síncronos	Abaixo de 2 ciclos	A precisão é mais de 98%
DWT	Lidula	Árvore de decisão	Fonte DC baseada em VSC e gerador de indução	Abaixo de 3 ciclos	Alta confiabilidade, maior segurança, tempo de resposta mais rápido, menos sensibilidade ao desequilíbrio de carga e robusto contra ruído
DWT	Heidari	Árvore de decisão	Geradores de indução e síncronos	Inferior a 1 ciclo	Simplicidade, velocidade, menor custo e maior precisão (98%)
DWT	Fayyad	ANN	Painel fotovoltaico conectado ao inversor trifásico	Os autores não apresentaram	Alta precisão, mostra excelente desempenho para cargas Q altas.
DFST	Dash	Classificador baseado em regras difusas	Gerador síncrono, turbinas eólicas DFIG, sistema fotovoltaico e CHP	Menos de um ciclo	Alta precisão, confiabilidade, taxa de detecção e sensibilidade

Técnica de espaço de fase	Khamis	PNN	1200Vdc GDs	0,2 s	100% de precisão
---------------------------	--------	-----	-------------	-------	------------------

Tabela 2 Técnicas de Processamento de Sinais (PS) com Classificadores Inteligentes (CI)

3 | CONCLUSÃO

Este capítulo do livro apresenta uma revisão abrangente sobre as técnicas de processamentos de sinais utilizadas nas detecções de ilhamentos. Em primeiro lugar, foi fornecido uma visão geral das técnicas convencionais, delineando suas vantagens e fragilidades. Isso é seguido por uma descrição de técnicas de processamento de sinal bem conhecidas que foram incorporadas aos métodos convencionais para melhorar seu desempenho e superar suas limitações inerentes. A aplicação de classificadores inteligentes, junto com técnicas de processamento de sinal para atingir uma precisão ainda maior, detecção mais rápida e melhor compatibilidade também foram discutidos.

Vale ressaltar que a aplicação de ferramentas de processamento de sinais e classificadores inteligentes não acarreta efeitos colaterais negativos na qualidade da energia e na confiabilidade do sistema. Para técnicas de detecção de ilhamento passivo, a incorporação de ferramentas de processamento de sinal e classificadores inteligentes poderá superar suas limitações de grande zona de não detecção e configuração de limite. Técnicas eficientes de detecção de ilhamento baseada em processamento de sinal desempenham um papel importante para uma operação de ilhamento bem-sucedida nas Gds. Dessa forma, sua implementação pode aumentar a confiabilidade e a qualidade da energia do sistema. Assim, técnicas baseadas em processamento de sinais têm grande potencial para serem utilizadas em aplicações de tempo real.

REFERÊNCIAS

A. Habibi, “**Introduction to wavelets,**” Proceedings of MILCOM ‘95, San Diego, CA, USA, 1995, pp. 879-885 vol.2, doi: 10.1109/MILCOM.1995.483653.

A. Pigazo, M. Liserre, R. A. Mastromauro, V. M. Moreno and A. Dell’Aquila, “**Wavelet-Based Islanding Detection in Grid-Connected PV Systems,**” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4445-4455, Nov. 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.928097.

A. Pigazo, V. M. Moreno, M. Liserre and A. Dell’Aquila, “**Wavelet-Based Islanding Detection Algorithm for Single-Phase Photovoltaic (PV) Distributed Generation Systems,**” 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, 2007, pp. 2409-2413, doi: 10.1109/ISIE.2007.4374984.

A. Rostami, A. Jalilian, S. Zabih, J. Olamaei e E. Pouresmaeil, “**Islanding Detection of Distributed Generation Based on Parallel Inductive Impedance Switching**”, em IEEE Systems Journal , vol. 14, n. 1, pp. 813-823, march de 2020, doi: 10.1109 / JSYST.2019.2923289.

- A. Samui and S. R. Samantaray, “**Performance assessment of wavelet transform based islanding detection relay,**” 2012 Annual IEEE India Conference (INDICON), Kochi, 2012, pp. 545-550, doi: 10.1109/INDCON.2012.6420678.
- A. Samui and S. R. Samantaray, “**Wavelet Singular Entropy-Based Islanding Detection in Distributed Generation,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 1, pp. 411-418, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2220987.
- A. Y. Ayenu-Prah & N. O. Attoh-Okine (2009) **Comparative study of Hilbert–Huang transform, Fourier transform and wavelet transform in pavement profile analysis,** *Vehicle System Dynamics*, 47:4, 437-456, DOI: 10.1080/00423110802167466.
- A.H. Mohammadzadeh Niaki, S. Afsharnia, **A new passive islanding detection method and its performance evaluation for multi-DG systems,** *Electric Power Systems Research*, Volume 110, 2014, Pages 180-187, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2014.01.016>.
- Ahmad G. Abd-Elkader, Dalia F. Allam, Elsayed Tageldin, **Islanding detection method for DFIG wind turbines using artificial neural networks,** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 62, 2014, Pages 335-343, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.052>.
- Aziah Khamis HS, Wanik MZC. **Pattern recognition of islanding detection using tt-transform.** *J Asian Sci Res* 2010;2:607–13.
- Aziah Khamis, Hussain Shareef, Azah Mohamed, Erdal Bizkevelci, **Islanding detection in a distributed generation integrated power system using phase space technique and probabilistic neural network,** *Neurocomputing*, Volume 148, 2015, Pages 587-599, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.07.004>.
- B. Biswal, P.K. Dash, B.K. Panigrahi. **Non-stationary power signal processing for pattern recognition using HS-transform,** *Applied Soft Computing*, Volume 9, Issue 1, 2009, Pages 107-117, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.03.004>.
- Byunggyu Yu, Mikihiko Matsui, Gwonjong Yu, **A review of current anti-islanding methods for photovoltaic power system,** *Solar Energy*, Volume 84, Issue 5, 2010, Pages 745-754, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.018>.
- C. F. Drummond and D. Sutanto, “**Classification of Power Quality disturbances using the iterative Hilbert Huang Transform,**” *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, Bergamo, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625326.
- C. Simon, M. Schimmel and J. J. Danobeitia, “**On the TT-Transform and Its Diagonal Elements,**” in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 56, no. 11, pp. 5709-5713, Nov. 2008, doi: 10.1109/TSP.2008.929670.
- C.R. Pinnegar, L. Mansinha, A method of time–time analysis: **The TT-transform, Digital Signal Processing**, Volume 13, Issue 4, 2003, Pages 588-603, ISSN 1051-2004, [https://doi.org/10.1016/S1051-2004\(03\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S1051-2004(03)00022-8).
- Canbing Li, Chi Cao, Yijia Cao, Yonghong Kuang, Long Zeng, Baling Fang, **A review of islanding detection methods for microgrid,** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 35, 2014, Pages 211-220, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.026>.

Cheng-Tao Hsieh, Jeu-Min Lin, Shyh-Jier Huang, **Enhancement of islanding-detection of distributed generation systems via wavelet transform-based approaches**, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 30, Issue 10, 2008, Pages 575-580, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2008.08.006>.

D. Donnelly, **“The Fast Fourier and Hilbert-Huang Transforms: A Comparison,”** The Proceedings of the Multiconference on “Computational Engineering in Systems Applications”, Beijing, 2006, pp. 84-88, doi: 10.1109/CESA.2006.4281628.

D. Reigosa, F. Briz, C. B. Charro, P. Garcia and J. M. Guerrero, **“Active Islanding Detection Using High-Frequency Signal Injection,”** in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 5, pp. 1588-1597, Sept.-Oct. 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2209190.

D. Reigosa, F. Briz, C. Blanco, P. García and J. Manuel Guerrero, **“Active Islanding Detection for Multiple Parallel-Connected Inverter-Based Distributed Generators Using High-Frequency Signal Injection,”** in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 3, pp. 1192-1199, March 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2263845.

D. Velasco, C. Trujillo, G. Garcera and E. Figueres, **“An Active Anti-Islanding Method Based on Phase-PLL Perturbation,”** in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1056-1066, April 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2089643.

D. Velasco, C.L. Trujillo, G. Garcera, E. Figueres, **Review of anti-islanding techniques in distributed generators, Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 14, Issue 6, 2010, Pages 1608-1614, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.011>

Dehghani, M.. **“Comparison of S-transform and Wavelet Transform in Power Quality Analysis.”** International Journal of Electrical and Computer Engineering 3 (2009): 225-228.

E. A. P. Gomes, J. C. M. Vieira, D. V. Coury and A. C. B. Delbem, **“Islanding detection of synchronous distributed generators using data mining complex correlations,”** in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 17, pp. 3935-3942, 30 9 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1722.

E. Jacobsen and R. Lyons, **“The sliding DFT,”** in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 20, no. 2, pp. 74-80, March 2003, doi: 10.1109/MSP.2003.1184347.

F. De Mango, M. Liserre, A. Dell'Aquila and A. Pigazo, **“Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods,”** 2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz, 2006, pp. 1878-1883, doi: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778679.

F. Liu, Y. Kang, Y. Zhang, S. Duan, X. Lin **Improved SMS islanding detection method for grid-connected converters** IET Renew Power Gen, 4 (2010), pp. 36-42.

Guiliang Yin, **“A Distributed Generation Islanding Detection Method Based on Artificial Immune System,”** 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, 2005, pp. 1-4, doi: 10.1109/TDC.2005.1547072.

H. G. Far, A. J. Rodolakis and G. Joos, **“Synchronous Distributed Generation Islanding Protection Using Intelligent Relays,”** in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1695-1703, Dec. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2208659.

H. H. Zeineldin and S. Kennedy, “**Sandia Frequency-Shift Parameter Selection to Eliminate Non detection Zones,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 486-487, Jan. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005362.

H. Karimi, A. Yazdani and R. Iravani, “**Negative-Sequence Current Injection for Fast Islanding Detection of a Distributed Resource Unit,**” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 1, pp. 298-307, Jan. 2008, doi: 10.1109/TPEL.2007.911774

H. Kazemi Karegar, B. Sobhani. **Wavelet transform method for islanding detection of wind turbines,** *Renewable Energy*, Volume 38, Issue 1, 2012, Pages 94-106, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.002>.

H.H. Zeineldin, T. Abdel-Galil, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, **Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT,** *Electric Power Systems Research*, Volume 77, Issue 2, 2007, Pages 155-162, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2006.02.010>.

H.H. Zeineldin, T. Abdel-Galil, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, **Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT,** *Electric Power Systems Research*, Volume 77, Issue 2, 2007, Pages 155-162, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2006.02.010>.

H.H. Zeineldin, S. Conti. **Sandia frequency shift parameter selection for multi-inverter systems to eliminate non-detection zone.** *IET Renew Power Gen*, 5 (2011), pp. 175-183. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2010.0096>.

Hopewell, P. D., Jenkins, N., & Cross, A. D. (1996). **Loss-of-mains detection for small generators.** *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 143(3), 225. doi:10.1049/ip-epa:19960286 <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0019>.

I. Daubechies, “**The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis,**” in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 36, no. 5, pp. 961-1005, Sept. 1990, doi: 10.1109/18.57199.

Il-Song Kim, **Islanding Detection Technique using Grid-Harmonic Parameters in the Photovoltaic System,** *Energy Procedia*, Volume 14, 2012, Pages 137-141, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.908>.

J. Kim, J. Kim, Y. Ji, Y. Jung and C. Won, “**An Islanding Detection Method for a Grid-Connected System Based on the Goertzel Algorithm,**” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1049-1055, April 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2107751.

J. Merino, P. Mendoza-Araya, G. Venkataramanan and M. Baysal, “**Islanding Detection in Microgrids Using Harmonic Signatures,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 5, pp. 2102-2109, Oct. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2383412.

J. Ning and C. Wang, “**Feature extraction for islanding detection using Wavelet Transform-based Multi-Resolution Analysis,**” 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345061.

J. Yin, L. Chang and C. Diduch, “**A new hybrid anti-islanding algorithm in grid connected three-phase inverter system,**” 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006, pp. 1-7, doi: 10.1109/pesc.2006.1711989.

K. P. Sozanski, “**Sliding DFT control algorithm for three-phase active power filter,**” Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., Dallas, TX, 2006, pp. 7 pp.-, doi: 10.1109/APEC.2006.1620695.

Khamis, A. and H. Shareef. “**An Effective Islanding Detection and Classification Method Using Neuro-Phase Space Technique.**” World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering 7 (2013): 711-719.

Ku Nurul Edhura Ku Ahmad, Jeyraj Selvaraj, Nasrudin Abd Rahim, **A review of the islanding detection methods in grid-connected PV inverters,** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 21, 2013, Pages 756-766, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.018>.

L. W. Arachchige and A. Rajapakse, “**A pattern recognition approach for detecting power islands using transient signals – Part I: Design and implementation,**” 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-1, doi: 10.1109/PES.2011.6038901.

LIMA, R.L., **Metodologias para Determinar a Viabilidade Técnica do Ilhamento Intencional de Geradores Distribuídos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 142 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

Liu YH, Luor TS, Huang SJ, Lin JM. **Method and system for detecting standalone operation of a distributed generating system** (US20050146224 A1). Patents; 2005.

Lopes LAC, Huili S. **Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods.** IEEE Trans Energy Convers 2006;21:171–80.

M. Al Hosani, Z. Qu and H. H. Zeineldin, “**Development of Dynamic Estimators for Islanding Detection of Inverter-Based DG,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 428-436, Feb. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2348654.

M. E. Ropp, M. Begovic and A. Rohatgi, “**Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention,**” in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 810-816, Sept. 1999, doi: 10.1109/60.790956.

M. Hanif, M. Basu and K. Gaughan, “**Development of EN50438 compliant wavelet-based islanding detection technique for three-phase static distributed generation systems,**” in IET Renewable Power Generation, vol. 6, no. 4, pp. 289-301, July 2012, doi: 10.1049/iet-rpg.2011.0290.

M. Hanif, U. D. Dwivedi, M. Basu and K. Gaughan, “**Wavelet based islanding detection of DC-AC inverter interfaced DG systems,**” 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, Wales, 2010, pp. 1-5.

M. J. Afroni, D. Sutanto and D. Stirling, “**Analysis of Nonstationary Power-Quality Waveforms Using Iterative Hilbert Huang Transform and SAX Algorithm,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2134-2144, Oct. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2264948.

M. Karimi, H. Mokhtari and M. R. Iravani, “**Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1212-1220, Oct. 2000, doi: 10.1109/61.891505.

M. Mishra, M. Sahani, P.K. Rout, **An islanding detection algorithm for distributed generation based on Hilbert–Huang transform and extreme learning machine**, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 9, 2017, Pages 13-26, ISSN 2352-4677, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.11.002>.

Manohar Mishra, Sheetal Chandak, Pravat Kumar Rout, **Taxonomy of Islanding detection techniques for distributed generation in microgrid**, *Renewable Energy Focus*, Volume 31, 2019, Pages 9-30, ISSN 1755-0084, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.09.001>.

MARCHESAN, G., **Detecção de Ilhamento em Sistemas de Distribuição com Geração Síncrona Distribuída**. 129 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

Masoud Ahmadipour, Hashim Hizam, Mohammad Lutfi Othman, Mohd Amran Mohd Radzi, Nikta Chireh, **A novel islanding detection technique using modified Slantlet transform in multi-distributed generation**, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 112, 2019, Pages 460-475, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.008>.

Mehrdad Heidari, Ghodrattollah Seifossadat, Morteza Razaz, **Application of decision tree and discrete wavelet transform for an optimized intelligent-based islanding detection method in distributed systems with distributed generations**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 27, 2013, Pages 525-532, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.047>.

Mollah Rezaul Alam, Tapan K. Saha, **Detection of DG-islanding employing decision boundary of polarization ellipse parameters**, *Electric Power Systems Research*, Volume 188, 2020, 106536, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106536>.

MR Alam, MTA Begum e B. Mather, **“Islanding Detection of Distributed Generation Using Electrical Variables in Space Vector Domain,”** em *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, n. 2, pp. 861-870, April de 2020, doi: 10.1109 / TPWRD.2019.2929784.

N. Huang, D. Xu and X. Liu, **“Power Quality Disturbances Recognition Based on HS-transform,”** 2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications, Harbin, 2010, pp. 311-314, doi: 10.1109/PCSPA.2010.82

N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, **“A Pattern Recognition Approach for Detecting Power Islands Using Transient Signals—Part I: Design and Implementation,”** in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 3070-3077, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2053724

N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, **“A Pattern-Recognition Approach for Detecting Power Islands Using Transient Signals—Part II: Performance Evaluation,”** in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1071-1080, July 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2187344.

O’Kane P, Fox B. **Loss of mains detection for embedded generation by system impedance monitoring**. In: Sixth international conference on developments in power system protection (Conf Publ No 434); 1997. p. 95–8.

P. K. Dash, B. K. Panigrahi and G. Panda, **“Power quality analysis using S-transform,”** in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 406-411, April 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.809616.

- P. K. Dash, B. K. Panigrahi, D. K. Sahoo and G. Panda, “**Power quality disturbance data compression, detection, and classification using integrated spline wavelet and S-transform,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, pp. 595-600, April 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2002.803824.
- P. K. Ray, N. Kishor and S. R. Mohanty, “**S-transform based islanding detection in grid-connected distributed generation based power system,**” 2010 IEEE International Energy Conference, Manama, 2010, pp. 612-617, doi: 10.1109/ENERGYCON.2010.5771754.
- P. K. Ray, S. R. Mohanty, N. Kishor and H. C. Dubey, “**Coherency determination in grid-connected distributed generation based hybrid system under islanding scenarios,**” 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, Kuala Lumpur, 2010, pp. 85-88, doi: 10.1109/PECON.2010.5697562.
- P.K. Dash, Malhar Padhee, T.K. Panigrahi, **A hybrid time–frequency approach based fuzzy logic system for power island detection in grid connected distributed generation,** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 42, Issue 1, 2012, Pages 453-464, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.003>.
- Prakash K. Ray, Soumya R. Mohanty, Nand Kishor, **Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and S-transform,** Electric Power Systems Research, Volume 81, Issue 3, 2011, Pages 805-819, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.eprs.2010.11.011>.
- R. A. Brown, M. L. Lauzon and R. Frayne, “**A General Description of Linear Time-Frequency Transforms and Formulation of a Fast, Invertible Transform That Samples the Continuous S-Transform Spectrum Non redundantly,**” in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 1, pp. 281-290, Jan. 2010, doi: 10.1109/TSP.2009.2028972.
- R. Bekhradian, M. Davarpanah e M. Sanaye-Pasand, “**Nov Approach for Secure Islanding Detection in Synchronous Generator Based Microgrids**”, em IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 34, n° 2, pp. 457-466, April de 2019, doi: 10.1109 / TPWRD.2018.2869300.
- R. G. Stockwell, L. Mansinha and R. P. Lowe, “**Localization of the complex spectrum: the S transform,**” in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 44, no. 4, pp. 998-1001, April 1996, doi: 10.1109/78.492555.
- R. Nale, K. Venkatanagaraju, S. Biswal, M. Biswal e N. Kishor, “**Islanding detection in distributed generation system using intrinsic time decomposition**”, em IET Generation, Transmission & Distribution , vol. 13, n. 5, pp. 626-633, 12.3.2019, doi: 10.1049 / iet-gtd.2018.5645.
- R. Shariatinasab and M. Akbari, “**New islanding detection technique for DG using Discrete Wavelet Transform,**” 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, Kuala Lumpur, 2010, pp. 294-299, doi: 10.1109/PECON.2010.5697593.
- R. Sharma and P. Singh, “**Islanding detection and control in grid based system using wavelet transform,**” 2012 IEEE Fifth Power India Conference, Murthal, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/PowerI.2012.6479557.
- R. Zamani e MEH Golshan, “**Islanding Detection of Synchronous Machine – based Distributed Generators using Signal Trajectory Pattern Recognition**”, 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG) , Istanbul, 2018, pp. 91-95, doi : 10.1109 / SGCF.2018.8408949.

Reza Zamani, Mohammad Esmail Hamedani Golshan, Hassan Haes Alhelou, Nikos Hatziaargyriou, **A novel hybrid islanding detection method using dynamic characteristics of synchronous generator and signal processing technique**, Electric Power Systems Research, Volume 175, 2019, 105911, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105911>.

S. A. Gonzalez, R. Garcia-Reguei and M. Benedetti, **“Harmonic Computation Technique Suitable for Active Power Filters,”** in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 2791-2796, Oct. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.894789.

S. Chen, **“Feature selection for identification and classification of power quality disturbances,”** IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco, CA, 2005, pp. 2301-2306 Vol. 3, doi: 10.1109/PES.2005.1489187.

S. Kar and S. R. Samantaray, **“Data-mining-based intelligent anti-islanding protection relay for distributed generations,”** in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 4, pp. 629-639, April 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0494.

S. Mishra, C. N. Bhende and B. K. Panigrahi, **“Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using S-Transform and Probabilistic Neural Network,”** in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, pp. 280-287, Jan. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2007.911125.

S. Murugesan e V. Murali, **“Active Unintentional Islanding Detection Method for Multiple-PMSG-Based DGs”**, em IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 56, n. 5, pp. 4700-4708, set.-Out. 2020, doi: 10.1109 / TIA.2020.3001504.

S. R. Mohanty, N. Kishor, P. K. Ray and J. P. S. Catalão, **“Islanding detection in a distributed generation based hybrid system using intelligent pattern recognition techniques,”** 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465689.

S. R. Mohanty, N. Kishor, P. K. Ray and J. P. S. Catalo, **“Comparative Study of Advanced Signal Processing Techniques for Islanding Detection in a Hybrid Distributed Generation System,”** in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, no. 1, pp. 122-131, Jan. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2362797

S. R. Samantaray, A. Samui and B. Chitti Babu, **“S-transform based cumulative sum detector (CUSUM) for islanding detection in Distributed Generations,”** 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India, New Delhi, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2010.5712397.

S. R. Samantaray, K. El-Arroudi, G. Joós and I. Kamwa, **“A Fuzzy Rule-Based Approach for Islanding Detection in Distributed Generation,”** in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1427-1433, July 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2042625.

S. R. Samantaray, T. M. Pujhari and B. D. Subudhi, **“A new approach to islanding detection in distributed generations,”** 2009 International Conference on Power Systems, Kharagpur, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPWS.2009.5442689.

S. Santoso, E. J. Powers and W. M. Grady, “**Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 3, pp. 1250-1257, July 1997, doi: 10.1109/61.637001.

S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady and P. Hofmann, “**Power quality assessment via wavelet transform analysis,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, pp. 924-930, April 1996, doi: 10.1109/61.489353

S. Shadpey, B. Shadpey e G. Babaabasi, “**A Novel Method for Islanding Detection in Synchronous-Based Distributed Generation System Using Magnetomotive Force Changes and k-NN classifier**”, 2019 International Power System Conference (PSC) , Teerã, Irã, 2019, pp. 757-763, doi: 10.1109 / PSC49016.2019.9081461.

S. Ventosa, C. Simon, M. Schimmel, J. J. Danobeitia and A. Manuel, “**The S-Transform From a Wavelet Point of View,**” in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 56, no. 7, pp. 2771-2780, July 2008, doi: 10.1109/TSP.2008.917029.

S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, P.A. Crossley, **Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generators: A comprehensive survey**, Electric Power Systems Research, Volume 79, Issue 6, 2009, Pages 984-992, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2008.12.012>.

Safdar Raza, Hazlie Mokhlis, Hamzah Arof, J.A. Laghari, Li Wang, **Application of signal processing techniques for islanding detection of distributed generation in distribution network: A review**, Energy Conversion and Management, Volume 96, 2015, Pages 613-624, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.029>.

Shayeghi, B. Sobhani, **Zero NDZ assessment for anti-islanding protection using wavelet analysis and neuro-fuzzy system in inverter based distributed generation**, Energy Conversion and Management, Volume 79, 2014, Pages 616-625, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.062>.

Sung-II Jang and Kwang-Ho Kim, “**An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current,**” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, pp. 745-752, April 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.822964.

V. Menon and M. H. Nehrir, “**A Hybrid Islanding Detection Technique Using Voltage Unbalance and Frequency Set Point,**” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 442-448, Feb. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2006.887892.

VIEIRA JÚNIOR, José Carlos de Melo, **Metodologias para ajuste e avaliação do desempenho de relés de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos**. 207 p. Tese de Doutorado - UNICAMP,2006.

W. G. Morsi, C. P. Diduch and L. Chang, “**A new islanding detection approach using wavelet packet transform for wind-based distributed generation,**” The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, 2010, pp. 495-500, doi: 10.1109/PEDG.2010.5545860.

W.-J. Chiang , H.-L. Jou , J.-C. Wu **Virtual inductor-based islanding detection method for grid-connected power inverter of distributed power generation system** Int J Electr Power , 42 (2012) , pp. 158 – 166. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg:20070018>

Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary. **Novel power quality indices based on wavelet packet transform for non-stationary sinusoidal and non-sinusoidal disturbances**, Electric Power Systems Research, Volume 80, Issue 7, 2010, Pages 753-759, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.11.005>.

Wen-Jung Chiang, Hurng-Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, **Active islanding detection method for inverter-based distribution generation power system**, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 42, Issue 1, 2012, Pages 158-166, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.03.038>.

Y. Fayyad and A. Osman, “**Neuro-wavelet based islanding detection technique**,” 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference, Halifax, NS, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPEC.2010.5697180.

Y. H. Gu and M. H. J. Bollen, “**Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances**,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1279-1284, Oct. 2000, doi: 10.1109/61.891515.

Yanping Zhu, Qiuxia Yang, Junjuan Wu, Dezhong Zheng and Yuexin Tian, “**A novel islanding detection method of distributed generator based on wavelet transform**,” 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, 2008, pp. 2686-2688.

Z.K. Peng, Peter W. Tse, F.L. Chu, **A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing**, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 19, Issue 5, 2005, Pages 974-988, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.01.006>