



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VINÍCIUS ALMEIDA DE OLIVEIRA

**UM MÉTODO BASEADO NA TRANSFORMADA DE STOCKWELL PARA
DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE EM BAIXA TENSÃO**

**CAMPINA GRANDE, PB
2021**

© VINÍCIUS ALMEIDA DE OLIVEIRA

**UM MÉTODO BASEADO NA TRANSFORMADA DE
STOCKWELL PARA DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM
BAIXA TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em Universidade Federal de Campina Grande, pertencente a linha de pesquisa Sistemas Elétricos e área de concentração Processamento da Energia como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica .

Orientador:

Prof. Núbia S. D. Brito, D.Sc.

Orientador:

Prof. Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

**CAMPINA GRANDE, PB
2021**

Vinícius Almeida de Oliveira

**Um método baseado na transformada de Stockwell para
detecção de ilhamento em sistemas fotovoltaicos
conectados à rede baixa tensão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em Universidade Federal de Campina Grande, pertencente a linha de pesquisa Sistemas Elétricos e área de concentração Processamento da Energia como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 18/03/2021

**NUBIA SILVA DANTAS
BRITO**

Digitally signed by NUBIA SILVA
DANTAS BRITO

Date: 2021.08.02 08:57:19 -03'00'

Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc., UFCG

Orientadora

Documento assinado digitalmente



Karcus Marcelus Colaco Dantas

Data: 02/08/2021 15:42:00-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D. Sc., UFCG

Coorientador

Alexandre Cunha Oliveira

Digitally signed by Alexandre Cunha Oliveira

DN: CN = Alexandre Cunha Oliveira, C = US, O = Universidade
Federal de Campina Grande, OU = UFCG

Date: 2021.08.04 08:50:37 -03'00'

Alexandre Cunha Oliveira, D. Sc., UFCG

Membro Interno

Digitally signed by Tarso Vilela Ferreira
DN: cn= Tarso Vilela Ferreira, c=BR, o=Universidade
Federal de Sergipe, ou=Departamento de Engenharia
Elétrica, email=tarso@ufs.br
SN: c=BR, E=tarso@ufs.br, CN= Tarso Vilela Ferreira
O= Universidade Federal de Sergipe OU= Departamento
de Engenharia Elétrica
Reason: Attestó a precisão e integridade deste documento
Location: São Cristóvão
Date: 2021.08.03 10:18:19 -0300

Tarso Vilela Ferreira, D. Sc., UFCG

Membro Externo

O48m

Oliveira, Vinícius Almeida de.

Um método baseado na transformada de Stockwell para detecção de ilhamento em sistemas fotovoltaicos conectados à rede em baixa tensão / Vinícius Almeida de Oliveira. – Campina Grande, 2021.

66 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2021.

"Orientação: Profa. Dra. Núbia Silva Dantas Brito, Prof. Dr. Karcus Marcelus Colaço Dantas".

Referências.

1. Sistemas Fotovoltaicos. 2. Ilhamento – Sistemas Fotovoltaicos. 3. Métodos Passivos. 4. Transformada de Stockwell. 5. Norma NBR ABNT IEC 62116. 6. Sistemas de Energia Elétrica. 7. Multi-inversores. I. Brito, Núbia Silva Dantas. II. Dantas, Karcus Marcelus Colaço. III. Título.

CDU 621.311(043)

Agradecimentos

Agradeço:

A Deus, pela saúde, disposição e oportunidade para atingir os meus objetivos, pois mesmo em momentos difíceis vale lembrar o que Ele disse: "Neste mundo terei aflições; contudo, tenham ânimo! Eu venci o mundo".

A meus pais Danilo e Stella, pelo incentivo constante, paciência e esforço para proporcionar que as melhores oportunidades me fossem dadas.

Aos meus demais familiares e amigos, por sempre estarem de prontidão para me apoiar em qualquer que seja a dificuldade ou alegria.

Aos professores Núbia Brito e Karcius Marcelus, pela dedicação, ensinamentos e paciência para conduzir trabalhos de excelência em qualidade e conteúdo. Aos Doutorandos Érica Lima e Rodrigo Coelho, pelas disponibilidades e disposição para sempre ajudar academicamente, e pessoalmente, no desenvolvimento deste trabalho. Aos professores Alexandre Cunha e Tarso Vilela por disporem de suas habilidades, conhecimentos e especialidades para contribuir com as sugestões para melhoria da dissertação.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte, informações e dedicação na prestação de seus serviços. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos que me ajudaram de alguma forma e contribuíram para minha formação.

Resumo

Um método para detecção de ilhamento em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em baixa tensão é proposto nessa dissertação. O método aplica a transformada de Stockwell para extrair características tempo-frequência das componentes de sequência negativa, estimadas a partir das tensões trifásicas no ponto de acoplamento comum do sistema. A partir de uma lógica de detecção simples, com uso de limiares adaptativos, o método proposto é capaz de distinguir o ilhamento de outros eventos. O desempenho do método foi avaliado via simulação de circuitos, considerando os cenários propostos pela Norma ABNT NBR IEC 62116:2012 em distintas condições de operação. Além disso, avaliou-se o método em cenários com a operação de múltiplas fontes de geração distribuída fotovoltaica no momento do ilhamento. Nos casos de ilhamento propostos pela norma, obteve-se 100% de acerto com tempo médio de detecção de 64,9 ms em cenários com e sem ruído. Nos casos multi-inversores obteve-se uma taxa de acerto de 65%. Ao final, o método resultou em uma taxa de acerto de 94,40% dos casos da base de dados.

Palavras-chave: Ilhamento, Métodos passivo, transformada de Stockwell, Norma NBR ABNT IEC 62116, Sistemas fotovoltaicos, Multi-inversores

Abstract

A method for islanding detection in photovoltaic systems connected to the low power grid is proposed. The method applies the Stockwell transform to extract time-frequency characteristics of the amplitude of the component of negative sequence of voltage signals at the common coupling point. From simple detection logic, with the use of adaptive thresholds, the proposed method is capable of distinguish the island from other events. The performance of method was evaluated by circuit simulation, considering scenarios proposed by Standard ABNT NBR IEC 62116:2012. In addition, the method was evaluated in scenarios with the operation of multiple sources of distributed photovoltaic generation at the time of islanding. In islanding events proposed by Standard, it was obtained an accuracy of 100% with an average detection time of 64.9 ms in scenarios with, and without, noise. In multi-inverter cases, a hit rate of 65% was obtained. In the end, the method presented an accuracy of 94, 40% of the data base.

Keywords: Islanding, Passive Methods, Stockwell transform, Standard NBR ABNT IEC 62116, Photovoltaic systems, Multi-inverters

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Publicações	4
1.4 Organização do texto	5
2 Fundamentação Teórica	6
2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede	6
2.2 Ilhamento	10
2.3 Métodos de detecção de ilhamento	12
2.3.1 Métodos remotos	13
2.3.2 Métodos ativos	15
2.3.3 Métodos passivos	16
2.4 Fundamentos da transformada de Stockwell	17
3 Revisão Bibliográfica	23
3.1 Análise dos trabalhos mais relevantes	23
3.2 Resumo da revisão bibliográfica	26
4 Metodologia	30
4.1 Sistema-Teste	31
4.2 Construção da base de dados	33
4.3 Análise dos sinais monitorados	34
4.4 Análise dos critérios de decisão	37
4.5 Método proposto	42
4.6 Síntese do capítulo	44
5 Resultados	45
5.1 Desempenho do método para diversos cenários	46
5.2 Análise de sistemas desequilibrados	52
5.3 Sistemas Multi-Inversores	55

5.4 Síntese dos resultados	58
6 Conclusões	59
Referências Bibliográficas	61

Lista de Figuras

Figura 1	Projeções de potência instalada para GD fotovoltaica.	2
Figura 2	Sistema de GD conforme estabelece a REN nº 482/2012 da ANEEL. . .	7
Figura 3	Sistema fotovoltaico conectado à rede.	8
Figura 4	Configuração típica de um sistema de distribuição com fontes de GD. .	10
Figura 5	Circuito equivalente: rede principal e fonte de GD alimentando uma carga.	11
Figura 6	Principais métodos AI encontrados na literatura.	14
Figura 7	Metodologia sumarizada.	30
Figura 8	Configuração do sistema teste.	31
Figura 9	Comparativo dos valores da matriz-S antes e após o ilhamentos para diferentes sinais monitorados.	36
Figura 10	Histograma dos valores pré e pós-ilhamento para os cenários ILA. . .	38
Figura 11	Variação dos critérios de decisão ao longo do tempo após ocorrência de perturbações ao sistema.	40
Figura 12	Variação dos valores da CUSUM e comportamento da DCUSUM. . .	41
Figura 13	Variação dos valores da CUSUM e comportamento da DCUSUM. . .	41
Figura 14	Fluxograma do método anti-ilhamento proposto	43
Figura 15	Simulação cenário ilhamento: Condição A do SFCR sem variação percentual de potência nominal.	46
Figura 16	Simulação cenário chaveamento de carga: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal até retirada de carga em 50%. . .	47
Figura 17	Simulação cenário chaveamento de fonte de harmônicos: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal até que uma fonte de harmônicos é inserida no sistema.	48
Figura 18	Simulação cenário variação de frequência da fonte: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal até que a frequência da fonte principal varia em degrau para 62 Hz.	49
Figura 19	Simulação cenário ilhamento para avaliação de ruídos: O ruído é aplicado nos sinais monitorados - V_{pac} , contudo, sem efeito após estimar a componente V_2	50
Figura 20	Simulação cenários com desequilíbrio: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal da carga. Chaveamento de carga em $t_0 = 0,3$ s.	53

Figura 21	Simulação cenários com desequilíbrio: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal da carga. Ilhamento ocorre em $t_0 = 0,3$ s.	54
Figura 22	Simulação cenários sistema multi-inversor: SFCR opera na condição A e desbalanço entre geração e carga no momento do ilhamento de +50%. Evento ocorre em $t_0 = 0,45$ s.	56
Figura 23	Tempo de detecção para os cenários multi-inversor com variação da potência da carga, o qual causa desbalanço entre geração e carga no momento do ilhamento.	57
Figura 24	Operação paralela dos SFCR para os cenários multi-inversores. . . .	58

Lista de Tabelas

Tabela 1	Comparação entre métodos de detecção.	17
Tabela 2	Sumarização dos trabalhos mais relevantes.	29
Tabela 3	Parâmetros do sistema-teste (VERMA et al., 2012)	32
Tabela 4	Modos de operação do SFCR sob teste.	33
Tabela 5	Variação percentual de carga do sistema teste.	34
Tabela 6	Base de dados simulada.	35
Tabela 7	Variáveis obtidas via simulação	45

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DCUSUM	<i>Soma Cumulativa Derivativa</i>
E	Energia do sinal
GD	Geração Distriuída
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
OUF	<i>Over/Under Frequency</i>
OUV	<i>Over/Under Voltage</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
STD	<i>Standard Deviation</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TS	Transformada de Stockwell
ZND	Zona de Não-Detecção

Capítulo 1

Introdução

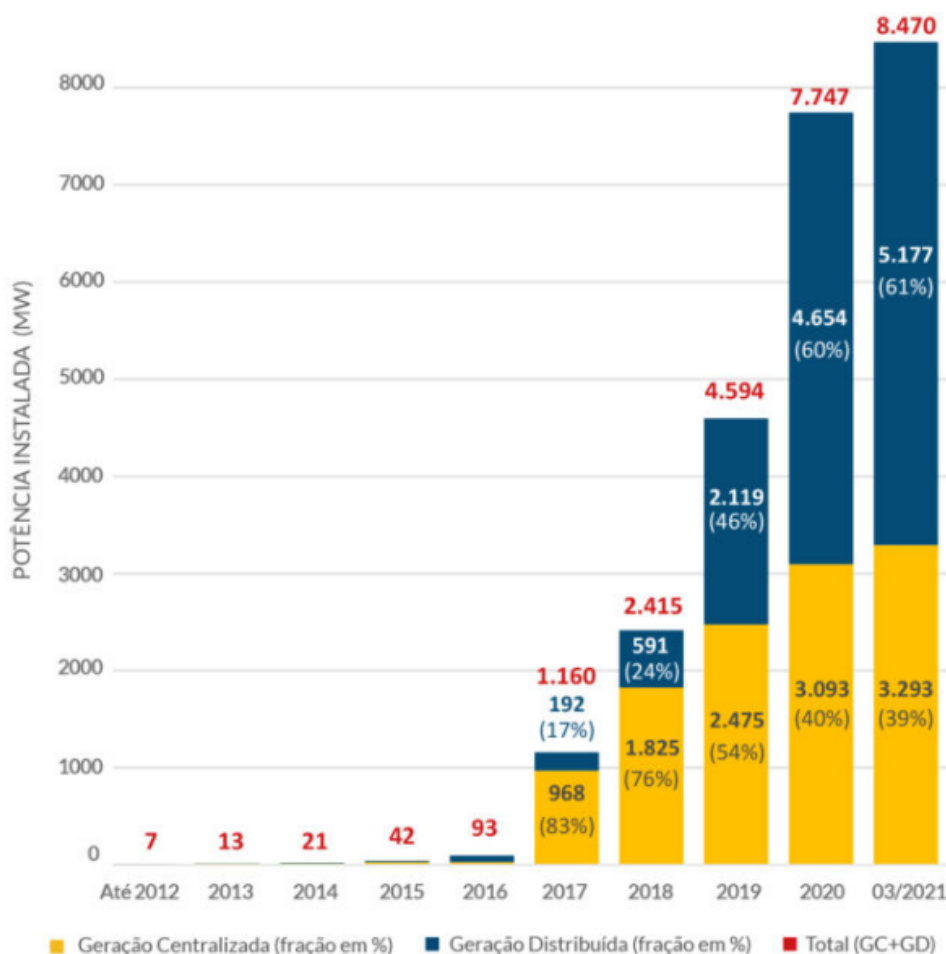
O sistema elétrico atual vem se tornando cada vez mais complexo. No Brasil, em particular, uma das causas motivadoras para o aumento dessa complexidade foi a publicação da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, a qual estabeleceu as regras que permitem ao consumidor gerar a própria energia, fornecer o excedente de geração para a rede pública e ganhar créditos na forma de desconto na conta de energia. Como consequência, a denominada geração distribuída (GD), principalmente a fotovoltaica, vem crescendo significativamente, conforme mostrado na Figura 1, o que demanda a realização de estudos que avaliem os impactos decorrentes, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

Dentre as suas muitas vantagens, a GD proporciona a diversificação da matriz energética brasileira, descentralizando a geração, reduzindo as perdas e aliviando a carga dos sistemas de transmissão de energia elétrica (ABSOLAR, 2021). Além disso, estudos relatam um aumento no fator de potência e uma melhora na margem de estabilidade de tensão do sistema em função da potência injetada pela GD (NDIAYE et al., 2018; ALVES et al., 2016).

Apesar disto, a GD pode provocar vários problemas para o Sistema Elétrico de Potência (SEP), dentre os quais destaca-se aqui, o "ilhamento", termo que se refere a condição em que uma porção do sistema de distribuição, que contém cargas e fontes de GD, continua energizada enquanto permanece isolada do restante do sistema de distribuição principal (ANEEL, 2010). O ilhamento pode ser (SANCA et al., 2017):

- i) Intencional, quando o dispositivo de comutação entre a GD e as demais

FIGURA 1. Projeções de potência instalada para GD fotovoltaica.



Fonte: (ABSOLAR, 2021).

partes do sistema de distribuição é aberto intencionalmente e a GD continua a fornecer energia à parte ilhada.

- ii) Não-intencional, evento não programado previamente, podendo ser decorrente de falhas na operação, erros humanos ou eventos que estejam fora do controle ou operação normal do sistema.

Na prática, a condição de ilhamento pode provocar vários problemas, como: riscos à vida humana, perda de coordenação da proteção e religamento dessincronizado. Portanto, a detecção de uma condição de ilhamento constitui uma ação crucial para o sistema como um todo. A análise da literatura especializada revelou que esse é um problema atual e de interesse crescente da comunidade científica. Observou-se também

que vários fatores podem comprometer o desempenho de um método de detecção de ilhamento, como: tipo da carga, sistemas multi-inversores, desbalanço energético entre geração e consumo, topologia do sistema, entre outros.

Esta Dissertação de Mestrado insere-se nesse contexto e propõe contribuir com o estado da arte, mais especificamente, apresentar uma nova formulação para detectar a condição de ilhamento em sistemas fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão (SFCR).

1.1 Motivação

A principal motivação deste trabalho foi a importância e aumento crescentes da GD no Brasil, que resultou na inserção de cerca de 462 mil novas usinas até 2021, superando as projeções da ANEEL no horizonte até 2024 (ANEEL, 2017; ABSOLAR, 2021). Neste contexto, a instalação de geradores distribuídos deve ser acompanhada da avaliação dos impactos que podem causar na operação dos sistemas de distribuição, para que possam, efetivamente, contribuir para melhorar, ou pelo menos, não afetar o desempenho das redes de energia elétrica.

Em se tratando do ilhamento, a ocorrência deste fenômeno pode ser estimada a partir dos indicadores de descontinuidade no fornecimento de energia elétrica no Brasil, denominados DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). No âmbito das concessionárias de energia, apenas no ano de 2020, apurou-se um FEC de 6,06 considerando mais de 85,5 milhões de unidades consumidoras, resultando o equivalente a 510 milhões de interrupções anualmente (ANEEL, 2021). Associado ao crescimento das fontes de GD no Brasil, o FEC passa a indicar também a possibilidade para ocorrência das condições de ilhamento.

Portanto, na medida que os problemas causados por este fenômeno estão diretamente relacionados a proteção à vida e a integridade operacional do sistema, a proposição de novos métodos de detecção de ilhamento constitui uma linha de pesquisa atual e relevante para o estado da arte e importante do ponto de vista econômico.

1.2 Objetivos

Esta Dissertação de Mestrado teve como objetivo geral propor um novo método baseado na transformada de Sotckwell para detectar ilhamento em SFCR e como objetivos específicos:

- Construir uma base de dados para simular cenários de ilhamento, com base na ABNT NBR IEC 62116:2012, que trata dos "Procedimentos de Ensaio anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede";
- Propor um novo método de detecção de ilhamento confiável que opere com baixa taxa de amostragem, reduzindo custos com esforço computacional;
- Desenvolver métricas para identificar o ilhamento a partir dos valores obtidos pela transformada de Stockwell;
- Avaliar a capacidade do método proposto em distinguir o ilhamento de eventos comuns ao sistema de distribuição, como chaveamento de cargas, desequilíbrio, chaveamento de fonte de harmônicos, ruídos;
- Avaliar a operação de sistemas com múltiplas fontes de geração de distribuída e o desempenho do método nas condições de ilhamento.

1.3 Publicações

Durante o período em que esta pesquisa foi realizada os seguintes artigos foram produzidos:

- Artigos aceitos para publicação
OLIVEIRA, V.A; BRITO N.S.D.; DANTAS K.M.; LIMA, E.M.; COELHO, R.A. *Detecção de ilhamento em sistemas fotovoltaicos baseados na transformada de Stockwell*. In XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE. Foz do Iguaçu - PR, Brazil. 2021.

1.4 Organização do texto

O relatório foi organizado em seis capítulos, incluindo este introdutório, conforme a seguir:

- Capítulo 2: apresentação da fundamentação teórica, a qual aborda os temas relevantes para o desenvolvimento da pesquisa.
- Capítulo 3: revisão bibliográfica acerca do tema, na qual é apresentada uma síntese dos trabalhos mais relevantes, deixando claro o espaço em que está alocada a contribuição da pesquisa.
- Capítulo 4: apresentação da metodologia proposta para detecção de ilha-mento.
- Capítulo 5: apresentação dos resultados e discussões.
- Capítulo 6: exposição das conclusões e propostas para os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo são abordados, de maneira sucinta, os assuntos mais relevantes para a compreensão deste trabalho. Inicialmente, apresentam-se os fundamentos relacionados aos SFCR. Em seguida, o fenômeno de ilhamento e os métodos de detecção são apresentados e discutidos. Por fim, abordam-se os fundamentos da transformada de Stockwell, ferramenta adotada para construir o método proposto.

2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

O início da reforma do setor elétrico brasileiro pela outorga da lei nº 10.848 de março de 2004, e pelo decreto nº 5.163 de julho de 2004, determinou a regulamentação para o processo de comercialização de energia elétrica, concessões e autorizações para geração, fato importantíssimo, porém, que desconsiderou os consumidores em baixa tensão (TOLMASQUIM, 2011). Apenas em 2012, com a já citada Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, estabeleceram-se os seguintes conceitos:

- I - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- II - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base

em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa. (BRASIL, 2012, Art. 2º)

Alguns pontos dessa Resolução foram atualizados com a publicação da Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL, que deu mais flexibilidade aos sistemas de micro e minigeração distribuída no Brasil. Um alteração relevante foi o aumento da potência instalada que caracteriza os minigeradores para 5 MW. Na Figura 2, apresenta-se um exemplo de um sistema típico de mini ou microgeração distribuída de energia.

FIGURA 2. Sistema de GD conforme estabelece a REN nº 482/2012 da ANEEL.



Fonte: (ANEEL, 2017).

A Resolução 482/2012 foi decisiva para a instalação de SFCR, ou seja, que não necessitam de armazenamento, cujo esquema típico é apresentado Figura 3.

A geração de energia elétrica proveniente dos painéis solares ocorre quando os fótons (partículas de luz solar) colidem com os átomos do material do painel, provo-

FIGURA 3. Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: o próprio autor.

cando o deslocamento de elétrons. Essa energia, em corrente contínua, é recebida pelo inversor de frequência, um conversor CC/CA, que dentre outras funções, realiza o sincronismo com as tensões da rede e transforma a corrente dos painéis em alternada. O inversor e a rede da concessionária, conectados ao quadro geral da instalação, suprem a demanda de potência solicitada pelas cargas.

Para garantir a segurança, eficiência e compatibilidade, tanto para os equipamentos constituintes do SFCR quanto para a rede elétrica, diversas normas (nacionais e internacionais) vêm sendo elaboradas. As principais normas nacionais são:

- **ABNT NBR 11704:2008 Sistemas fotovoltaicos - Classificação.** Classifica os sistemas de conversão fotovoltaica de energia solar em energia elétrica. A classificação é feita quanto à interligação com o sistema público de fornecimento de energia elétrica, neste caso são divididos em isolados ou conectados com a rede elétrica, e quanto à configuração, onde são divididos em sistemas puros ou híbridos.
- **ABNT NBR 10899:2013 Energia solar fotovoltaica - Terminologia.** Especifica os termos relativos à conversão fotovoltaica.
- **ABNT NBR IEC 62116:2012 Procedimentos de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica.** Fornece um procedimento para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em SFCR. São descritos os requisitos dos equipamentos para o ensaio, no qual é permitido o uso de um gerador FV, porém, dá-se preferência à utilização de um simulador de gerador FV. Para

a fonte de alimentação CA, pode ser usada a rede elétrica, ou outra fonte de alimentação CA, desde que atenda aos requisitos de nível de tensão, THD (do inglês, *Total Harmonic Distortion*) da tensão, frequência e fase. Como a carga, a norma recomenda que seja usada uma associação paralela de resistência, capacitância, indutância variáveis, porém, é permitido o uso de cargas eletrônicas, desde que comprovado que não proporcionem resultados diferentes daquelas obtidos com resistores, capacitores e indutores passivos.

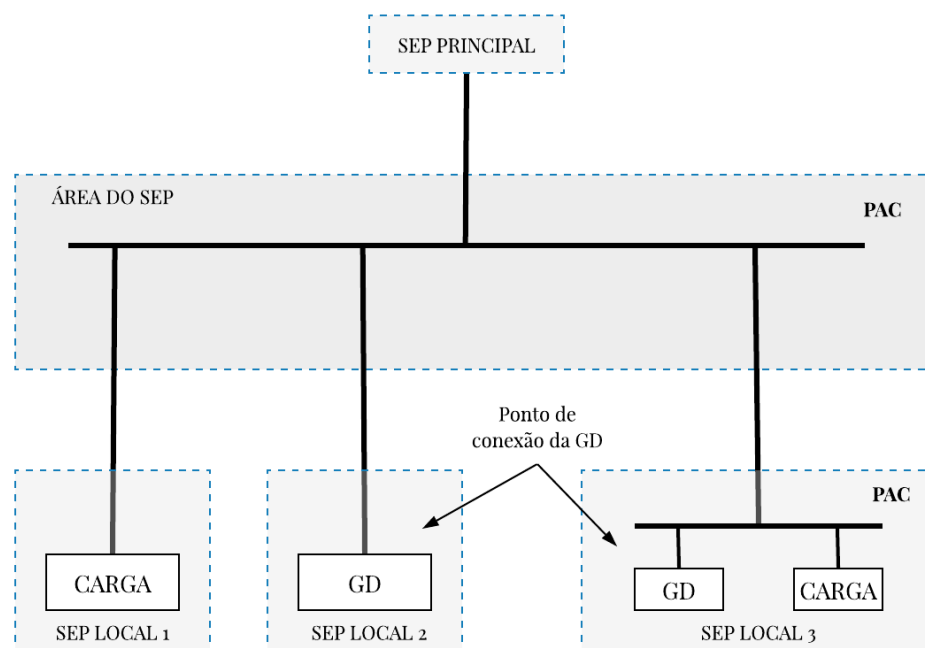
- **ABNT NBR 16149:2013 Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.** Estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica. O sistema deve ser capaz de identificar desvios referentes à tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica, para cessar o fornecimento de energia à rede.
- **ABNT NBR 16149:2013 Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade.** Determina os procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos atendem aos requisitos da ABNT NBR 16149.
- **ABNT NBR 16149:2013 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaio de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.** Especifica as informações e documentações que devem ser observadas após a instalação de um SFCR, de forma a verificar a segurança da instalação e correta operação do sistema;
- **Portaria N 004 do Inmetro:2011 - Requisitos de avaliação da conformidade (RAC) para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica.** Estabelece critérios para todos os equipamentos constituintes do sistema FV, visando eficiência e adequado nível de segurança. Norma aplicada para inversores de SFCR de potência nominal até 10 kW.

A proposta baseou-se nos circuitos e cenários de ensaio contidos na norma ABNT NBR IEC 62116:2012.

2.2 Ilhamento

O ilhamento, também conhecido como operação ilhada, corresponde ao estado operativo no qual a central geradora supre uma porção eletricamente isolada do sistema de distribuição (ANEEL, 2010). No contexto da GD, a perda de suprimento da concessionária em um sistema contendo geradores distribuídos, conforme ilustrado na Figura 4, é reponsável por este fenômeno, na qual se destaca o Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que corresponde ao ponto de conexão de fontes de GD ao sistema de distribuição.

FIGURA 4. Configuração típica de um sistema de distribuição com fontes de GD.



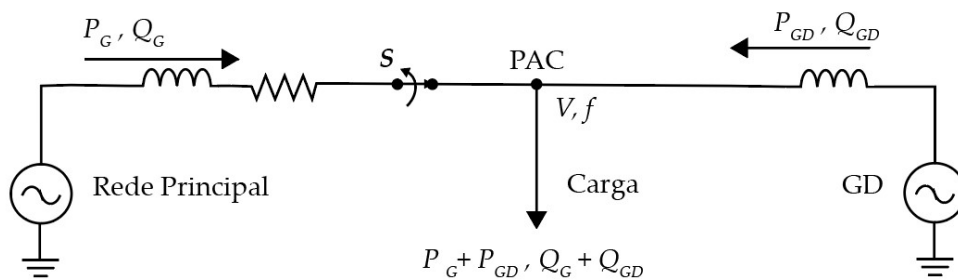
Fonte: o próprio autor.

O ilhamento pode ocorrer de dois modos: intencional, quando uma ilha é criada intencionalmente pela distribuidora, como por exemplo, nos desligamentos programados para manutenção da rede; não-intencional, o qual é decorrente da atuação da proteção devido à perturbações no SEP, as quais podem ser resultantes de (ABNT, 2012):

- Uma falha que é detectada pela distribuidora, causando a abertura de um dispositivo de seccionamento;
- Desligamento acidental da rede elétrica por falha de algum equipamento;
- Manobras no sistema de distribuição e nas cargas realizadas pela distribuidora;
- Erro humano ou sabotagem;
- Catástrofes naturais.

Matematicamente, o fenômeno de ilhamento pode ser explicado com base no circuito da Figura 5.

FIGURA 5. Circuito equivalente: rede principal e fonte de GD alimentando uma carga.



Fonte: o próprio autor.

Na operação normal do sistema, a rede principal e a fonte de GD fornecem, em conjunto, potência ativa e reativa à carga. Desta maneira, os valores de tensão e da frequência no PAC podem ser descritos como função das potências, tal que:

$$P_{GD} + P_G = \frac{V^2}{R} \quad (2.1)$$

$$Q_{GD} + Q_G = \frac{V^2}{2\pi fL}, \quad (2.2)$$

em que V representa a tensão no PAC (V); f a frequência no PAC; R e L as resistências e indutâncias, respectivamente, as quais representam a carga; P_{GD} e Q_{GD} as potên-

cias ativa e reativa provenientes da fonte de GD; P_G e Q_G as potências ativa e reativa provenientes da rede principal.

Após algumas manipulações algébricas, obtém-se:

$$V = \sqrt{R(P_{GD} + P_G)} \quad (2.3)$$

$$f = \frac{V^2}{2\pi L(Q_{GD} + Q_G)}. \quad (2.4)$$

O instante após a abertura da chave S, desconectando a rede principal no esquema da Figura 5, provoca variações de tensão, corrente e frequência no PAC, visto que as potências P_G e Q_G assumem valor nulo. Portanto, no sistema ilhado, a tensão e a frequência são dadas por:

$$V' = \sqrt{RP_{GD}} \quad (2.5)$$

$$f' = \frac{V^2}{2\pi LQ_{GD}}. \quad (2.6)$$

Essas equações demonstram que o desequilíbrio entre geração e carga promove variação dos parâmetros da rede, os quais podem ser monitorados para detectar as condições de ilhamento do sistema. Nota-se que à medida que a potência fornecida pela fonte é reduzida, a variação em V e f também serão mínimas. Nestes casos, quando as variações não sensibilizam os relés de proteções sobre/subtensão (OUV, do inglês *Over Under Voltage*) ou sobre/subfrequência (OUF, do inglês *Over Under Frequency*), diz-se que os SFCR operam na denominada Zona de Não-Detecção (ZND).

2.3 Métodos de detecção de ilhamento

Os problemas que a operação ilhada de geradores distribuídos podem trazer ao SEP estão relacionados a aspectos de segurança, comerciais e técnicos (WALLING;

MILLER, 2002). No âmbito dos SFCR, trabalhos datados da década de 1980 até o início dos anos 1990, já investigavam as variáveis envolvidas neste fenômeno, assim como as condições que poderiam prejudicar a eficácia dos métodos de detecção da época (TAKEDA et al., 1988; JONES et al., 1990; KOBAYASHI et al., 1991).

Só a partir dos anos 2000, estudos demonstram a importância crescente do tema e publica-se a norma IEEE 1547, *Standart for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*, a qual estabelece critérios para interconexão de fontes de GD ao SEP (IEEE, 2003). O objetivo desta norma é fornecer os requisitos relacionados ao desempenho, operação, testes e segurança dos sistemas de GD (Fotovoltaica, eólica, célula de combustível, geradores síncronos) cuja capacidade instalada seja de até 10 MVA. Dentre os requisitos, incluem-se: proteções contra as condições anormais de operação, impactos na qualidade de energia e detecção de ilhamento. Desde então, uma série de métodos para detectar a condição de ilhamento vêm sendo propostos, os quais empregam testes de desempenho que, na maioria dos casos, seguem os critérios estabelecidos por normas, e em outros casos, envolvem situações mais severas e de difícil detecção.

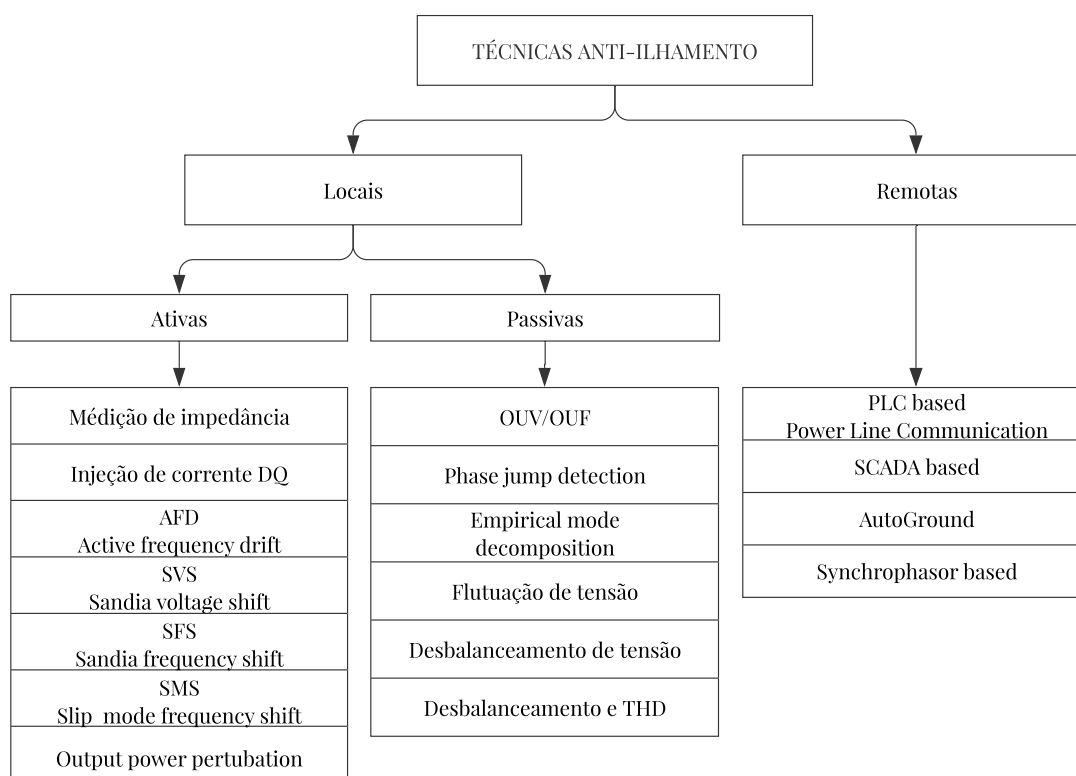
Atualmente, os métodos de detecção de ilhamento (usualmente denominados de métodos ou técnicas anti-ilhamento) são divididas em remotas e locais. Os métodos locais se dividem em ativos e passivos, conforme apresentado na Figura 6 e discutido mais detalhadamente nas próximas seções.

2.3.1 Métodos remotos

Os métodos remotos utilizam um canal de comunicação entre a distribuidora e as fontes de GD, apresentando grande confiabilidade. Entretanto, face à dimensão do sistema de distribuição, possuem alto custo de implementação. Como exemplo, pode-se considerar o princípio de funcionamento dos seguintes métodos:

- **SCADA:** o sistema de supervisão e aquisição de dados (do inglês, *Supervisory control and data acquisition - SCADA*) utiliza conjuntos de *software* e *hardware* para monitorar o estado de cada uma das chaves dos disjuntores do SEP. O monitoramento permite detectar quando uma porção do sistema

FIGURA 6. Principais métodos AI encontrados na literatura.



Fonte: o próprio autor.

se encontra ilhada, e assim, envia um sinal para que a GD se desconecte do sistema. (BOWER; ROPP, 2002);

- **PLC:** Sistemas que empregam técnicas de comunicação PLC (*Power Line Communication*) permitem que um sinal de comunicação gerado no sistema de transmissão seja transmitido de forma contínua para as fontes de GD por meio dos próprios cabos dos alimentadores. Neste caso, as fontes de GD possuem receptores. Caso os sinais não sejam recebidos, o ilhamento é indetectado e a fonte retirada do sistema (ROPP et al., 2000; XU et al., 2007; WANG et al., 2007).

2.3.2 Métodos ativos

Os métodos ativos atuam inserindo pequenas perturbações no sistemas por meio das fontes de geração distribuída. Na operação normal do sistema, elas são absorvidas. Quando da condição ilhada, essas perturbações geram variáveis, ou estados, que representam desvios dos valores esperados de tensão, corrente, impedância e frequência em operação normal. Em alguns casos, a perturbação inserida visa acelerar o processo de instabilidade do sistema ilhado até que as proteções sobre/subtensão (OUV, do inglês *Over Under Voltage*) ou sobre/subfrequência (OUF, do inglês *Over Under Frequency*) atuem.

Métodos ativos em geral, destacam-se por não apresentarem problemas relacionados as ZND, como: método para medição de impedância (ASIMINOAEI et al., 2005; TEDDE; SMEDLEY, 2013; CAI et al., 2012); de desvio de frequência, denominadas AFD (do inglês, *Active Frequency Drift*), SFS (do inglês, *Sandia Frequency Shift*), SMS (do inglês, *Slip Mode Frequency Shift*) (ROPP et al., 1999; STEVENS et al., 2000; AKHLAGHI et al., 2014); de desvio de tensão, como a SVS (do inglês, *Sandia Voltage Shift*) (STEVENS et al., 2000); e de desvio de potência, como o RVP (do inglês, *Reactive Power Variation*) (JIN et al., 2009; JO; CHA, 2017).

Apesar das vantagens dos métodos ativos, algumas deficiências vêm sendo observadas, como o fato de que o incremento de fontes de GD provocam a degradação da qualidade de energia do sistema. Além disso, estudos em cenários com múltiplas fontes de GD também demonstram a perda de desempenho desses métodos. Acontece que uma fonte de GD pode causar o desvio intencional de uma variável do sistema em uma direção, enquanto que outra fonte próxima poderia desviar esse mesmo parâmetro na direção oposta (SILVA; KOMATSU, 2015). Contudo, por ser uma técnica local, mantém-se o baixo custo de implementação. Em relação às técnicas passivas, os algoritmos são mais complexos.

2.3.3 Métodos passivos

Os métodos passivos baseiam-se nas variações de frequência, tensão e corrente da rede, pois estão fortemente relacionadas ao desbalanço de potência no sistema ilhado. Quanto maior o desequilíbrio, mais fácil será detectar o ilhamento. No entanto, para pequenas variações, que recaem nas ZND, o ilhamento pode não ser detectado dentro do tempo estabelecido em norma (CORREA et al., 2008; ABNT, 2012).

Os métodos dessa categoria monitoram constantemente parâmetros no domínio do tempo ou da frequência. No domínio do tempo, elas aproveitam as proteções OUV/OUF, as quais, por norma, as fontes de GD devem possuir. O problema é o tamanho da ZND. Pequenas variações de potência podem não sensibilizar a proteção. (BOWER; ROPP, 2002; KHAMIS et al., 2013). Situações em que a maior parcela da potência fornecida à carga é proveniente da fonte de GD, a probabilidade do inversor está operando na ZND é maior que 30% (STEVENS et al., 2000).

A busca pelo aumento da confiabilidade dos métodos anti-ilhamento tem como objetivo extinguir as ZND, um ponto crucial que tem instigado muitos pesquisadores, resultando na proposta de vários métodos, como: *Phase Jump Detection* (PJD) (BOWER; ROPP, 2002), algoritmos baseados em flutuações de tensão (SINGH et al., 2018), desbalanço e distorção harmônica de tensão (JANG; KIM, 2004; LAAKSONEN, 2013). Entretanto, a dinâmica do SEP impõe mais desafios, como cargas não-lineares, variações abruptas de carga, ruído nos sinais monitorados, os quais causam degradação de desempenho de vários desses métodos.

A análise do estado da arte mostrou que é crescente o uso de ferramentas avançadas de processamento digital de sinais (PDS) na proposição de métodos passivos alternativos. A grande vantagem dessas ferramentas é a capacidade de extrair informações dos domínios do tempo e da frequência dos sinais monitorados, o que pode possibilitar o reconhecimento de padrões na condição ilhada do sistema. Alguns desses métodos também empregam técnicas de inteligência artificial para elevar a confiabilidade nas tomadas de decisão. Esses métodos apresentam elevada robustez, velocidade e confiabilidade (RAZA et al., 2015). Por serem o foco deste trabalho, são discutidos detalhadamente mais adiante.

Um resumo comparativo entre todos esses métodos é apresentado na Tabela 1. O baixo custo de implementação e a não degradação da qualidade de energia no SEP motivam, sem dúvida, o uso dos métodos passivos, no qual ferramentas de processamento digital de sinais podem resultar em um aumento de confiabilidade.

TABELA 1. Comparação entre métodos de detecção.

Técnica AI	ZND	Tempo de Detecção	Qualidade de Energia	Custo de Implementação	Confiabilidade	Efeito multi-GD
Passiva	Grande	Curto	Não afeta	Baixo	Baixa	Nenhuma
Ativa	Pequena	Longo	Degrada	Baixo	Alta	Necessita sincronismo
Remota	Nenhuma	Muito curto	Não afeta	Alto	Muito alta	Aumento de custo

Fonte: adaptado (GUHA et al., 2015)

2.4 Fundamentos da transformada de Stockwell

Em termos históricos, o marco inicial dos estudos relacionados com a análise de sinais no domínio da frequência se deu em 1748, após L. Euler analisar o movimento de uma corda vibrante. Euler observou que a deflexão da corda definida em um determinado instante de tempo é constituída por funções senoidais harmonicamente relacionadas (OPPENHEIM et al., 2010). A partir de então, vários cientistas se debruçaram sobre esse assunto, sendo o ponto de inflexão a proposição da Série de Fourier e suas variantes, dentre as quais destaca-se aqui a transformada de Fourier (TF). Matematicamente, a TF, $X(f)$, de uma função contínua $x(t)$ é calculada conforme Equação (2.7):

$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) representa um determinado sinal $x(t)$ como uma combinação de funções senoidais de frequências harmonicamente relacionadas. Contudo, em se tratando do monitoramento de sinais e diagnóstico *online* de distúrbios, essa transformada não consegue identificar os instantes de tempo em que ocorrem variações de frequência, pois cada amostra da análise afeta todos os coeficientes de Fourier (WANG, 2011).

Proposto inicialmente por Gabor (1946), a transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT, do inglês *Short Time Fourier Transform*) corresponde a uma adaptação da TF para a análise de sinais não-estacionários (MENEZES, 2014). A ideia consiste em dividir o sinal em pequenos segmentos de tempo e empregar a TF a cada segmento para determinar as frequências que ali existam.

A STFT utiliza uma janela, $\omega(t)$, que se movimenta ao longo do eixo de tempo do sinal $x(t)$, produzindo o sinal:

$$x_w(t) = x(t)\omega(t - \tau). \quad (2.8)$$

A STFT é definida da seguinte maneira:

$$X(\tau, f) = STFT\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.9)$$

Quanto a escolha do tipo de janela, este tema constitui um campo vasto de estudo (PRABHU, 2013) e considera o princípio de incerteza de Heisenberg-Gabor: o tamanho da janela é diretamente proporcional à resolução na frequência e inversamente proporcional a resolução no tempo (MENEZES, 2014). Ou seja, quanto maior a janela, mais difícil identificar os instantes de tempo em que mudanças no espectro ocorreram. Em contrapartida, diminuir a janela provoca o espalhamento do conteúdo espectral do sinal, o que também dificulta sua identificação.

Nesse contexto, Stockwell et al. (1996) propuseram a denominada transformada de Stockwell (TS), que utiliza uma janela gaussiana com propriedades de escala, σ , e translação, τ , definida como:

$$\omega(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.10)$$

A partir da Equação (2.9), a transformada de Stockwell de tempo contínuo é

definida pela Equação (2.11):

$$\begin{aligned} X_{tsc}(\tau, f, \sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}}e^{-j2\pi ft} dt. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Para que a TS não seja determinada com base em 3 variáveis, a largura da janela é definida como sendo proporcional ao inverso da frequência, isto é:

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|}. \quad (2.12)$$

Portanto,

$$X_{tsc}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}}e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.13)$$

Uma forma alternativa consiste em exprimir a TS como uma convolução de duas funções:

$$\begin{aligned} X_{tsc}(\tau, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} p(t, f)\omega(t - \tau, f) dt \\ &= p(t, f) * \omega(t - \tau, f), \end{aligned} \quad (2.14)$$

sendo,

$$\begin{aligned} p(t, f) &= x(t)e^{-j2\pi ft} \\ \omega(\tau, f) &= \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\tau^2 f^2}{2}}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Aplicando a TF na Equação (2.16), tem-se:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}\{X_{tsc}(\tau, f)\} &= \mathcal{F}\{p(\tau, f) * \omega(\tau, f)\} \\
 &= \mathcal{F}\{p(\tau, f)\} \times \mathcal{F}\{\omega(\tau, f)\} \\
 &= P_{tsc}(\alpha, f) \times W_{tsc}(\alpha, f) .
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Pelas propriedades da TF, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 P_{tsc}(\alpha, f) &= \mathcal{F}\{x(t)e^{-j2\pi ft}\} \\
 &= \mathcal{F}\{x(t)\} * \mathcal{F}\{e^{-j2\pi ft}\} \\
 &= X_{tsc}(\alpha) * \delta(\alpha + f) \\
 &= X_{tsc}(\alpha + f),
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

e,

$$\begin{aligned}
 W_{tsc}(\alpha, f) &= \mathcal{F}\{\omega(\tau, f)\} \\
 &= e^{\frac{-(2\pi\alpha)^2}{2f^2}} \\
 &= e^{\frac{-2\pi^2\alpha^2}{f^2}} .
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}\{X_{tsc}(\tau, f)\} &= P_{tsc}(\alpha, f) \times W_{tsc}(\alpha, f) \\
 &= X_{tsc}(\alpha + f) \times e^{\frac{-2\pi^2\alpha^2}{f^2}} .
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Por fim, é possível obter a TS mediante a aplicação da transformada inversa de Fourier da Equação (2.19):

$$X_{tsc}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X_{tsc}(\alpha + f) \times e^{\frac{-2\pi^2\alpha^2}{f^2}} e^{j2\pi\alpha\tau} d\alpha . \tag{2.20}$$

Desse modo, o cálculo da TS derivado da STFT pode ser computado a partir do seguinte algoritmo (GEORGE, 2009):

1. Determinação da TF do sinal $x(t)$ e da janela $\omega(t, f)$;
2. Cálculo da convolução $X_{tsc}(\alpha) * \delta(\alpha + f)$, que equivale à translação de $X_{tsc}(\alpha)$ para $X_{tsc}(\alpha + f)$;
3. Multiplicação entre $X_{tsc}(\alpha + f)$ e $W_{tsc}(\alpha, f)$;
4. Cálculo da transformada inversa de Fourier do produto entre $X_{tsc}(\alpha + f)$ e $W_{tsc}(\alpha, f)$.

Considerando o ambiente discreto dos modelos computacionais, a versão de um sinal $x(t)$ é dada por $x[n] = x(kT_s)$, em que $k = 0, 1, \dots, N - 1$ (T_s denota o tempo de amostragem e N o número de amostras). A transformada discreta de Fourier (TDF) é:

$$X_{TDF}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}, \quad (2.21)$$

sendo k a frequência discreta.

A discretização da Equação (2.13) corresponde à transformada de Stockwell discreta, isto é:

$$X_{TSD}[l, m] = \sum_{k=0}^{N-1} X_{TDF}[k + m] e^{\frac{2\pi^2 k^2}{m^2}} e^{\frac{j2\pi kl}{N}}, \quad m \neq 0, \quad (2.22)$$

para $m = 0$,

$$X_{TSD}[l, 0] = \sum_{k=0}^{N-1} X_{TDF}[k]. \quad (2.23)$$

em que l denota a translação e m o índice da mudança de frequência.

De modo semelhante à aplicação em tempo contínuo, Yan e Zhu (2011) resumizam o seguinte algoritmo:

1. Aplicação da TFD no sinal $x[n]$, para determinação do espectro do sinal $X_{TFD}[k]$;
2. Multiplicação entre $X_{TFD}[k + m]$ e a função Gaussiana $W_{TFD}[k] = e^{-\frac{2\pi^2 k^2}{m^2}}$;
3. Para cada frequência ($m = 0, 1, \dots, N - 1$), aplicar a transformada inversa discreta de Fourier para o produto $X_{TFD}[k + m]W_{TFD}[k]$, de modo a calcular os coeficientes da TSD, $X_{TSD}[l, m]$, para $l = 0, 1, \dots, N - 1$.

Matematicamente, a TS resulta em uma matriz, denominada matriz-S, cujas linhas estão relacionadas com o domínio da frequência e as colunas com as informações no domínio do tempo. Os coeficientes da matriz-S podem ser descritos como (WANG, 2011):

$$S(\tau, f) = A(\tau, f)e^{j\phi(\tau, f)}, \quad (2.24)$$

em que $A(\tau, f)$ representa a amplitude e $\phi(\tau, f)$ a fase do espectro de frequência, um número complexo. Portanto, uma matriz-S da ordem $m \times n$, é definida conforme a Equação (2.25):

$$S[x(k)]_{m \times n} = \begin{bmatrix} A_{11}e^{j\phi_{11}} & A_{12}e^{j\phi_{12}} & \dots & A_{1n}e^{j\phi_{1n}} \\ A_{21}e^{j\phi_{21}} & A_{22}e^{j\phi_{22}} & \dots & A_{2n}e^{j\phi_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{m1}e^{j\phi_{m1}} & A_{m2}e^{j\phi_{m2}} & \dots & A_{mn}e^{j\phi_{mn}} \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

na qual cada linha m representa um componente de frequência e cada coluna o instante de tempo n .

Note que a matriz-S contém informações do sinal para frequências pré-definidas. Isso permite que a rotina computacional seja flexibilizada para calcular apenas frequências de interesse.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Apresenta-se neste capítulo uma análise crítica dos trabalhos mais relevantes para a pesquisa que está sendo desenvolvida. O foco da revisão foram os métodos anti-ilhamento baseados em transformadas matemáticas.

3.1 Análise dos trabalhos mais relevantes

O processamento digital de sinais é uma técnica que consiste na análise, ou modificação, de sinais digitais (sequência de valores discretos), por meio de operações matemáticas. Essas operações permitem extrair informações ou até mesmo modificar o sinal aplicado para alguma situação específica (DINIZ et al., 2014). Em se tratando das transformadas de relação tempo-frequência, essas são comumente utilizadas para aumentar a confiabilidade dos métodos anti-ilhamento passivos, pois são versáteis, estáveis e com propriedades de fácil modificação.

A TF é uma das ferramentas mais familiares para análise de sinais no domínio da frequência. No método apresentado por Kobayashi et al. (1991), seu princípio consiste em monitorar variações de THD em sinais de tensão e corrente do PAC. Apesar do bom desempenho do método frente uma gama de situações, a não linearidade das cargas provoca um aumento significativo da sua ZND (BOWER; ROPP, 2002).

Já a transformada wavelet decompõe um sinal no tempo em diversas faixas de frequência. Pigazo et al. (2008) empregaram quatro níveis de decomposição para detectar variações de alta frequência na ocorrência de ilhamento em SFCR. Simulações em

modelos com elevados níveis de distorção harmônica apresentaram resultados com tempos de resposta ao ilhamento entre 17 a 26 ms, além de reduzida ZND. Trabalhos semelhantes apresentam resultados satisfatórios (HANIF et al., 2010; FAYYAD; BEN-BRAHIM, 2012). Entretanto, o custo com recurso computacional se mostra elevado, haja vista a frequência de amostragem utilizada pelos autores, que variam de 6,34 kHz (HANIF et al., 2010), até os 50,00 kHz do método proposto por Fayyad e Ben-Brahim (2012).

Ray et al. (2010) simularam sistemas híbridos (fontes distribuídas do tipo eólica, fotovoltaica, geradores síncronos, células combustíveis) para testar o desempenho da TS em comparação a transformada wavelet em métodos anti-ilhamento. Resultados mostraram que é possível visualizar a ocorrência de um evento a partir do gráfico do valor absoluto da matriz-S, derivado da TS, em detrimento dos resultados obtidos com a wavelet com apenas 2 níveis de decomposição. Os autores utilizaram para análise uma taxa de amostragem de 2,00 kHz. Na validação dos resultados gráficos, os autores utilizaram identificadores com limiares fixos, considerando o uso do desvio padrão e energia dos valores obtidos com a TS e wavelet. No mesmo ano, Ray et al. (2010) demonstraram a não influência de ruídos (relação sinal ruído de 20 dB) no método com base na TS, destacando, mais uma vez, seu melhor desempenho em relação à transformada wavelet.

Samantaray et al. (2010a) aplicaram a TS para pré-processamento das componentes de sequência negativa, após a aquisição dos sinais de tensão e corrente no PAC. Os eventos de ilhamento se mostram perceptíveis ao construir o gráfico do valor absoluto da matriz-S. Para validar os resultados, o autor recorre à variação de energia dos valores obtidos via TS, utilizando o parâmetro denominado soma cumulativa (CUSUM) proposto por Mohanty et al. (2007). As simulações são realizadas em um sistema teste de alta tensão com cinco barras e fontes de geração distribuída do tipo eólica, injetando uma potência de 1,5 MVA na rede. Os estudos com baixa frequência de amostragem de 1,92 kHz resultaram em uma taxa de acerto em torno de 92% na distinção entre os eventos de ilhamentos e de não-ilhamento, mesmo na faixa da ZND. Contudo, os limiares fixos empregados podem variar em função da topologia dos sistemas de distribuição.

Dando continuidade às simulações com múltiplas fontes de GD, Ray et al. (2012) concentram-se no desempenho da TS e da transformada wavelet para detecção de distúrbios da área de qualidade da energia elétrica. Dentre os quais, destacam-se: ilhamento, sobretensões, subtensões, variações de carga e *notchs*. Os autores também analisaram o efeito do ruído branco com relação sinal ruído (SNR) de 20 dB. Os resultados demonstraram, como em estudos anteriores, um melhor desempenho do método proposto com base na TS em todos os casos. Entretanto, os autores observaram o impacto da topologia do sistema nos limiares fixos que foram adotados para identificação dos eventos propostos.

Ainda no mesmo ano, Mohanty et al. (2012) acrescentaram aos estudos duas transformadas: Tempo-Tempo e hiperbólica de Stockwell. Em um estudo comparativo com a TS e a transformada wavelet, os autores simulam situações semelhantes às realizadas em trabalhos anteriores (RAY et al., 2010; RAY et al., 2010; RAY et al., 2012). Os resultados demonstraram a superioridade da transformada tempo-tempo e hiperbólica de Stockwell na detecção de ilhamento em cenários com e sem ruído.

Os estudos avançam e Mohanty et al. (2014) evoluem para simulações no sistema teste IEEE 30 barras. Os autores avaliaram o desempenho de métodos baseados nas transformadas wavelet, Stockwell, tempo-tempo, hiperbólica de Stockwell e a ferramenta denominada morfologia matemática para detecção de distúrbios na área de qualidade da energia elétrica. O tempo de detecção dos eventos se limitam entre 20-30 ms, com destaque para o método baseado na morfologia matemática, que fornece uma maior taxa de acerto e um menor tempo de detecção - entre 21,6 e 23,4 ms. Em um amplo estudo, Mohanty et al. (2014) demonstra o potencial das ferramentas matemáticas para o desenvolvimento de métodos anti-ilhamento.

O emprego da transformada de Hilbert Huang, no método da decomposição empírica, também monitora as tensões no PAC. A transformada de Hilbert Huang obtém sinais no domínio do tempo, que caracterizam frequências presentes nos sinais monitorados. Simulações demonstram a efetiva detecção de ilhamento em menos de dois ciclos, mesmo em condições de mínimo desbalanço de potência. (NIAKI; AFSHARNIA, 2014).

A transformada wavelet packet é uma adaptação da wavelet para obtenção de

mais níveis de decomposição e uma melhor resolução dos sinais monitorados. Do et al. (2016) e Gupta e Garg (2018) aplicaram-na em simulações com SFCR em baixa tensão, empregando 10 kHz como frequência de amostragem. Ambos os trabalhos apresentaram resultados com tempo de resposta ao ilhamento inferior a 20 ms e ZND completamente extinta. A diferença nos estudos consiste no critério adotado para classificar o evento de ilhamento. Do et al. (2016) faz uso da energia dos coeficientes wavelet com limiares fixos. Enquanto isso, Gupta e Garg (2018) recorrem às técnicas de inteligência artificial com o uso das árvores de decisão.

Mishra et al. (2016) modela um sistema de distribuição com quatro barras, contendo geradores síncronos e assíncronos. A partir das informações obtidas do pré-processamento do sinal de tensão do PAC via TS, o método recorre ao uso de técnicas de inteligência artificial para reconhecer os padrões do ilhamento. Desenvolvendo um estudo comparativo, o autor utilizou os seguintes métodos: *Extreme Learning Machine*, *Artificial Neural Network* e *Support Vector Machine*. Resultados apontaram para um melhor desempenho do classificador *Extreme Learn Machine*, o qual evidencia maior taxa de acerto para os casos apresentados.

Menezes et al. (2019) modela o sistema de distribuição CIGRE 14 barras para teste e validação do método anti-ilhamento proposto. Via simulação computacional, o autor emprega a TS para pré-processamento dos sinais e aplica a técnica *Artificial Neural Network* para classificar os eventos de ilhamento. Utilizou-se uma frequência de amostragem de 3,84 kHz, comum em relés digitais de proteção. Resultados obtidos demonstraram melhor desempenho do método proposto em relação aos métodos passivos tradicionais que empregam as proteções OUV/OUF. O método mostrou ser rápido e confiável, com tempo médio de detecção de 26 ms e taxa de acerto em 100% dos casos.

3.2 Resumo da revisão bibliográfica

O levantamento bibliográfico sobre os métodos anti-ilhamento que empregam ferramentas de processamento digital de sinais permitiu elaborar a Tabela 2, a qual sintetiza as características mais relevantes dos métodos de detecção.

Inicialmente, a análise do estado da arte revelou que os métodos anti-ilhamento são validados, em geral, seguindo duas metodologias distintas. Na primeira, observa-se o desempenho do método em circuitos de baixa tensão (BT) simples, compostos apenas por fonte, carga e SFCR. Por outro lado, a segunda metodologia considera uma perspectiva macro do sistema de distribuição, denominado na Tabela 2 de MT (média tensão). Desta forma, os resultados consideram ainda mais variáveis para validação do método proposto, tais como quantidade de barras do sistemas, local de monitoramento, local de falta, medição em baixa ou em alta tensão, entre outras. Este estudo considerou o horizonte definido pelos circuitos de BT, pois, em geral, seguem os modelos propostos pelas normas nacionais (ABNT, 2012) e internacionais (IEEE, 2003) para certificação de inversores de frequência comerciais. Além disso, observa-se da Tabela 2 que, considerando esta metodologia, não há referência na literatura para validação dos métodos baseados na TS.

O método proposto também empregou uma frequência de amostragem reduzida. Diferentemente dos trabalhos baseados na transformada wavelet, foi possível obter um bom desempenho com apenas 32 amostras por ciclo, muito menos informação do que as 100 amostras utilizadas por Do et al. (2016) ou as 200 amostras utilizadas por Gupta e Garg (2018). A flexibilidade do código da TS também é um diferencial se comparado à transformada wavelet, pois foi possível reduzir o esforço computacional do método ao calcular apenas linhas da matriz-S que realmente interessam para caracterizar o ilhamento, artifício semelhantemente proposto por Menezes et al. (2019).

Em relação ao esforço computacional, poucos autores da Tabela 2 propuseram o uso de ferramentas de inteligência artificial para o reconhecimento de padrões do ilhamento. Apesar de Mishra et al. (2016), Gupta e Garg (2018), Menezes et al. (2019) apresentarem resultados com taxa de acerto próximo de 100% dos casos simulados, o método proposto poupou recurso computacional ao mesmo tempo que obteve desempenho semelhante ao aplicar uma lógica de detecção simples com limiares adaptativos.

Por fim, o bloco de análises apresentado na Tabela 2 é de suma importância para validação do método proposto, pois demonstra com clareza sua robustez em relação à dinâmica tradicional dos sistemas de distribuição. Este trabalho destacou duas análises que são diferenciais. A primeira diz respeito aos sistemas desequilibrados. Na

literatura não há resultados que mencionem este tipo de estudo, principalmente em se tratando dos métodos que estimam as componentes de sequência negativa, que só existem em situações de desequilíbrio. Em segundo, tem-se as condições de operação com múltiplas fontes de GD. Em sistemas de BT, apenas Fayyad e Ben-Brahim (2012) e Niaki e Afsharnia (2014) apresentaram resultados.

Posto isto, propõe-se neste trabalho um método de detecção de ilhamento passivo baseado na TS exclusivo para SFCR em baixa tensão. Com o emprego de uma lógica de detecção simples, o método é rápido, confiável e exige esforço computacional reduzido. O método foi validado via simulação computacional em uma base de dados composta por sete fenômenos distintos, os quais podem ocorrer comumente nos sistemas de distribuição.

TABELA 2. Sumarização dos trabalhos mais relevantes.

	Pigazo et al. (2008)	Hanif et al. (2010)	Fayyad e Ben-Brahim (2012)	Niaki e Afsharina (2014)	Ray et al. (2012)	Mohanty et al. (2012)	Mohanty et al. (2014)	Samantaray et al. (2010b)	Mishra et al. (2016)	Menezes et al. (2019)	Do et al. (2016)	Gupta e Garg (2018)	Método Proposto
Transformadas													
TW	✓	✓	✓		✓	✓	✓						
TS					✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
TWP												✓	
THS						✓	✓						
TTT						✓	✓						
MMF							✓						
HHT				✓									
Condições do estudo													
Sinal monitorado	I_{gd} e V_{pac}	V_{pac}	V_{pac}	V_{pac}	V_{pac2}	V_{pac2}	V_{pac2}	I_{gd} e V_{pac2}	V_{pac2}	V_{pac}	V_{pac}	V_{pac2}	V_{pac2}
$F_s(kHz)$	◇	6.40	50.00	◇	2.00	2.00	5.00	1.92	2.40	3.84	5.00	10.00	1.92
Sistema Teste	BT	BT	BT	BT	MT	MT	MT	MT	MT	MT	BT	BT	BT
IA							✓		✓	✓		✓	
Análises													
ZND	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓	✓
Desequilíbrio													✓
Harmônicos	*			*			✓				✓	✓	✓
Ruídos				*	✓	✓	✓		✓				✓
Distúrbios	✓			*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*	✓
Interação multi-GD			✓	✓	✓	✓	✓						✓

F_s = Frequência de Amostragem

BT = Baixa Tensão

MT = Média Tensão

V_{pac2} = Sequência negativa V_{pac}

IA = Inteligência Artificial

ZND = Zona de Não-Detecção

Z_{grid} = Impedância da Rede

I_{gd} = Corrente de saída da GD

TW = Trans. wavelet

TS = Trans. de Stockwell

HHT = Trans. de Hibert Huang

TWP = Trans. wavelet Packet

TTT = Trans. Tempo-Tempo

MM = Morfologia Matemática

THS = Trans. Stockwell Hiperbólica

◇ Valores não disponíveis no trabalho

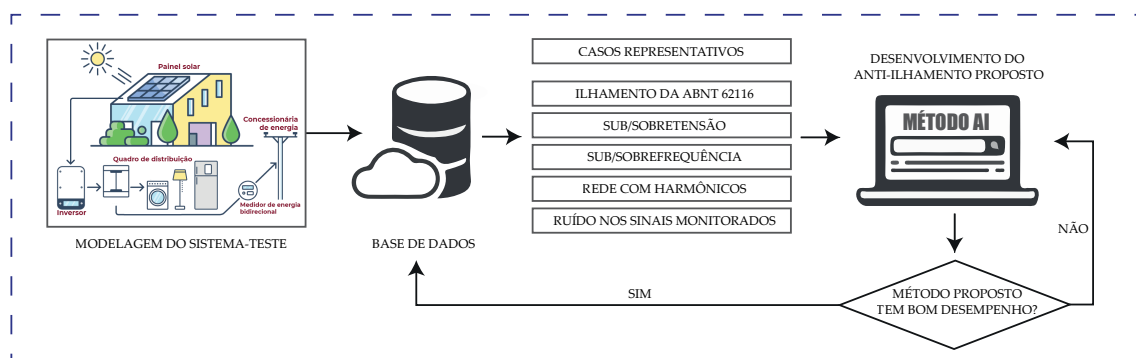
* Apesar de mencionar as análises, os resultados não foram apresentados

Capítulo 4

Metodologia

O método proposto foi desenvolvido segundo a metodologia apresentada na Figura 7 e resumida conforme a seguir.

FIGURA 7. Metodologia resumida.



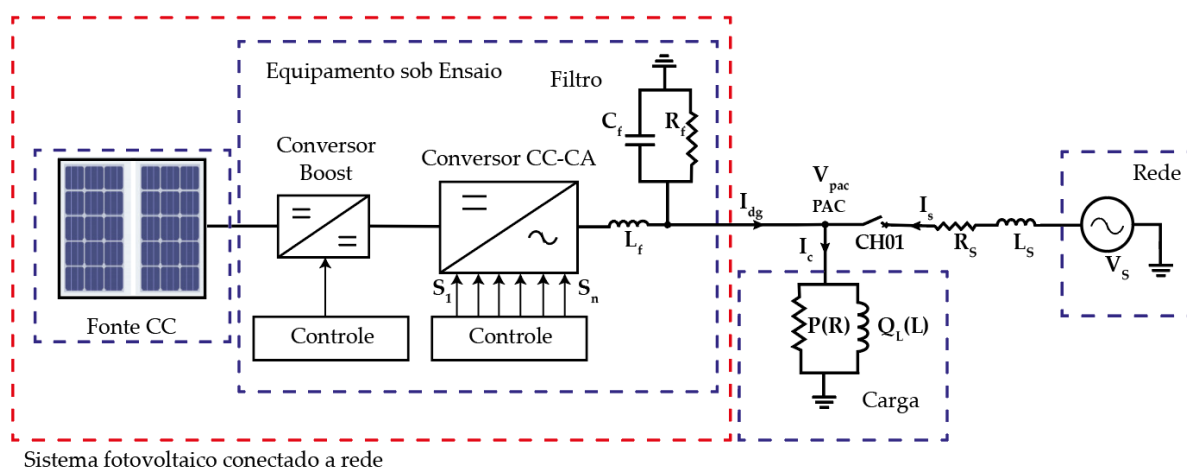
Fonte: o próprio autor

O primeiro passo consiste na modelagem do circuito proposto pela ABNT 62116:2012, seguido da construção de diversos cenários para análise, os quais constituirão uma base de dados de sinais simulados. A partir disto, extraem-se da base de dados os denominados casos representativos, os quais servirão como referência para o desenvolvimento do método proposto. Apenas a partir do bom desempenho do método para estes casos, segue-se para validação final com a base de dados completa.

4.1 Sistema-Teste

A base de dados computacional baseia-se no circuito e cenários experimentais constantes na norma ABNT NBR IEC 62116:2012, que trata dos procedimentos de ensaio anti-ilhamento para certificação de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O circuito, ilustrado na Figura 8, foi modelado via Matlab® Simulink a partir do *toolbox* Sinscape. Os valores dos componentes são descritos na Tabela 3.

FIGURA 8. Configuração do sistema teste.



Sistema fotovoltaico conectado a rede

Fonte: O próprio autor

Em resumo, o circuito da Figura 8 é composto pelos seguintes elementos:

- **Fonte de Alimentação CC:** A norma exige que a fonte de alimentação contínua tenha uma potência estável, com até 2% de variação. O experimento computacional modelou os módulos fotovoltaicos de forma a prover uma potência constante.
- **Equipamento Sob Ensaio (ESE):** Representa todos os dispositivos utilizados no processo de conversão de potência contínua, gerada pela fonte CC, em potência CA, que alimenta a carga. Isso inclui: conversor *Boost*, conversor CC-CA, filtro RC e as estratégias que controlam os disparos das chaves dos conversores.

- **Carga CA:** Conectado do lado CA do ESE, ela representa uma carga composta pela associação paralela de elementos passivos.
- **Fonte de Alimentação CA (Rede):** Na prática, pode ser utilizada a própria rede elétrica da distribuidora, desde que siga as condições mínimas de variação exigida em norma. Em se tratando de ambientes computacionais, os parâmetros utilizados se mantêm constantes durante a simulação de ilha-mento.

TABELA 3. Parâmetros do sistema-teste (VERMA et al., 2012)

	Parâmetro	Variável	Valor
Módulo Fotovoltaico	Potência	P_m	53,04 W
	Corrente de curto-circuito	I_{sc}	3,7 A
	Tensão de circuito aberto	V_{oc}	21 V
	Corrente máxima	I_{mp}	3,4 A
	Tensão máxima	V_{mp}	15,6 V
	Corrente/coeficiente de temperatura	k_i	0,09 %/deg · C
	Corrente fotogerada	I_{ph}	3,72 A
	Corrente de saturação	I_0	$1,31 \times 10^{10}$ A
	Fator de idealidade	n	0,94
	Resistência <i>shunt</i>	R_p	178,89 Ω
	Resistência série	R_s	0,88 Ω
Conversor Boost	<i>Duty cycle</i>	D	0,250 – 0,125
	Indutor	L_b	5 mH
	Capacitor	C_b	3000 μF
	Frequência de chaveamento	f_s	10 kHz
Inversor	Tensão CC	V_{dc}	800 V
	Resistor, indutor, capacitor AC	R_f, L_f, C_f	5 Ω , 5 mH, 10 μF
	Tensão de linha, tensão de fase	V_l, V_f	415 V, 220 V
	Frequência de chaveamento	f_s	10 kHz
	Controle DC	K_p, K_i	2000, 100
	Controle ZVR	K_p, K_i	0,01, 0,02
	Controle PLL	K_p, K_i, K_d	180, 3200, 1
Carga	Potência ativa, fp	P, fp	variável, 0, 90
	Configuração	-	Y-aterrado
	Frequência	f	60 Hz
Rede	Tensão de linha, tensão de fase	V_l, V_f	415 V, 220 V
	Resistência, indutância	R_s, L_s	0,01 Ω , 2, 5 mH
	Frequência	f	60 Hz

Diferentes topologias e estratégias de controle podem ser aplicadas ao ESE. Neste trabalho, adotou-se o modelo proposto por Verma et al. (2012), o qual possui um inversor tipo fonte de tensão para gerar uma potência ativa de 31 kW.

4.2 Construção da base de dados

Os cenários descritos na norma consideram o modo de operação do SFCR em três condições distintas, conforme a Tabela 4.

TABELA 4. Modos de operação do SFCR sob teste.

Condição	Potência de Saída do ESE	Tensão de Entrada do ESE
A	Máxima	>90% da faixa de tensão de entrada nominal
B	50% - 66% da máxima	>50% da faixa de tensão de entrada nominal
C	25% - 33% da máxima	>10% da faixa de tensão de entrada nominal

A análise dos cenários da Tabela 4 mostrou que a redução da potência gerada pelo ESE resulta em uma corrente de saída com maior conteúdo harmônico. De fato, resultados experimentais comprovam uma THD de corrente elevada em momentos em que a potência entregue pelos módulos fotovoltaicos estão aquém da potência nominal do inversor do SFCR (CHICCO et al., 2005; FEKETE et al., 2012). Este trabalho considerou a potência para condição C em 38%, pois este estado mantém a THD de tensão do PAC dentro do limite de 5%.

Em relação à tensão de entrada do ESE, ela está relacionada com a capacidade de controle da tensão do capacitor, elemento do inversor de frequência do SFCR. Para o modelo proposto por Verma et al. (2012), o conversor *boost* atua para regular uma faixa de tensão de entrada contida entre 600 V - 700 V. Por exemplo, a faixa de 90% da tensão de entrada corresponde à $600 + 0,9 \cdot (700 - 600)$, e assim por diante (ABNT, 2012).

Além do modo de operação do SFCR, a NBR 62116:2012 avalia o equilíbrio entre geração e carga no momento do ilhamento. Um ajuste inicial visa estabelecer o ponto de operação em que o sistema fotovoltaico fornece quase que a totalidade da potência requerida pela carga, fazendo com que a corrente da rede seja mínima. Isto é aplicado para todas as condições da Tabela 4. A variação percentual das cargas ativa e reativas após o ajuste inicial são apresentados na Tabela 5 para construção da base de dados. Destaca-se que o sistema opera sempre na ZND. Para o sistema em estudo, uma va-

riação de até -15% e $+50\%$ de potência ativa da carga são os limites que mantém o inversor operando dentro da ZND.

TABELA 5. Variação percentual de carga do sistema teste.

Condição	Potência Ativa	Potência Reativa
A	Entre -5% e 5%	Entre -5% e 5%
B	0%	Entre -5% e 5%
C	0%	Entre -5% e 5%

Os demais cenários que compõem a base de dados levam em consideração os pontos de operação da Tabela 4. Entretanto, o ilhamento é substituído por perturbações inerentes ao sistema elétrico, como: chaveamento de cargas (equilibradas e desequilibradas), chaveamento de fonte de harmônicos, variação da frequência da fonte.

Por fim, também são analisados os impactos no caso em que os sinais monitorados contém ruídos, os quais foram modelados estatisticamente conforme Lima et al. (2019). Também analisou-se os casos com sistemas multi-inversores. Estes casos em especial, reproduzem o SFCR proposto por Verma et al. (2012), com alguns ajustes dos controladores PID, para operar em paralelo com o outro SFCR idêntico. A base de dados constituída de sinais simulados é sintetizada na Tabela 6.

4.3 Análise dos sinais monitorados

Os métodos passivos para detecção de ilhamento monitoram constantemente o comportamento de sinais elétricos como tensão, corrente, frequência. Esta seção discute questões referentes ao ponto onde será realizado o sensoriamento e quais sinais elétricos serão monitorados.

Os SFCR comerciais monitoram a saída dos próprios inversores de frequência, pois, de fato, é o ponto mais acessível, e menos oneroso, para medição de sinais elétricos. Apenas os estudos que analisam os sistemas de distribuição de uma perspectiva macro propõem a medição dessas variáveis nas subestações afetadas pela ilha, ou em uma subestação contígua. Neste caso, as medições podem ser realizadas em alta ou

TABELA 6. Base de dados simulada.

Cenário	Condição	Quantidade	Total
Ilhamento (ILA)	A	9	31
	B	11	
	C	11	
Chaveamento de carga (CHC)	A	18	62
	B	22	
	C	22	
Chaveamento de fonte de harmônicos (CHH)	A	9	31
	B	11	
	C	11	
Variação de frequência da fonte (CHF)	A	18	62
	B	22	
	C	22	
Aplicação de ruídos nos sinais monitorados	A	9	31
	B	11	
	C	11	
Sistemas multi GD	A	20	20
Total			237

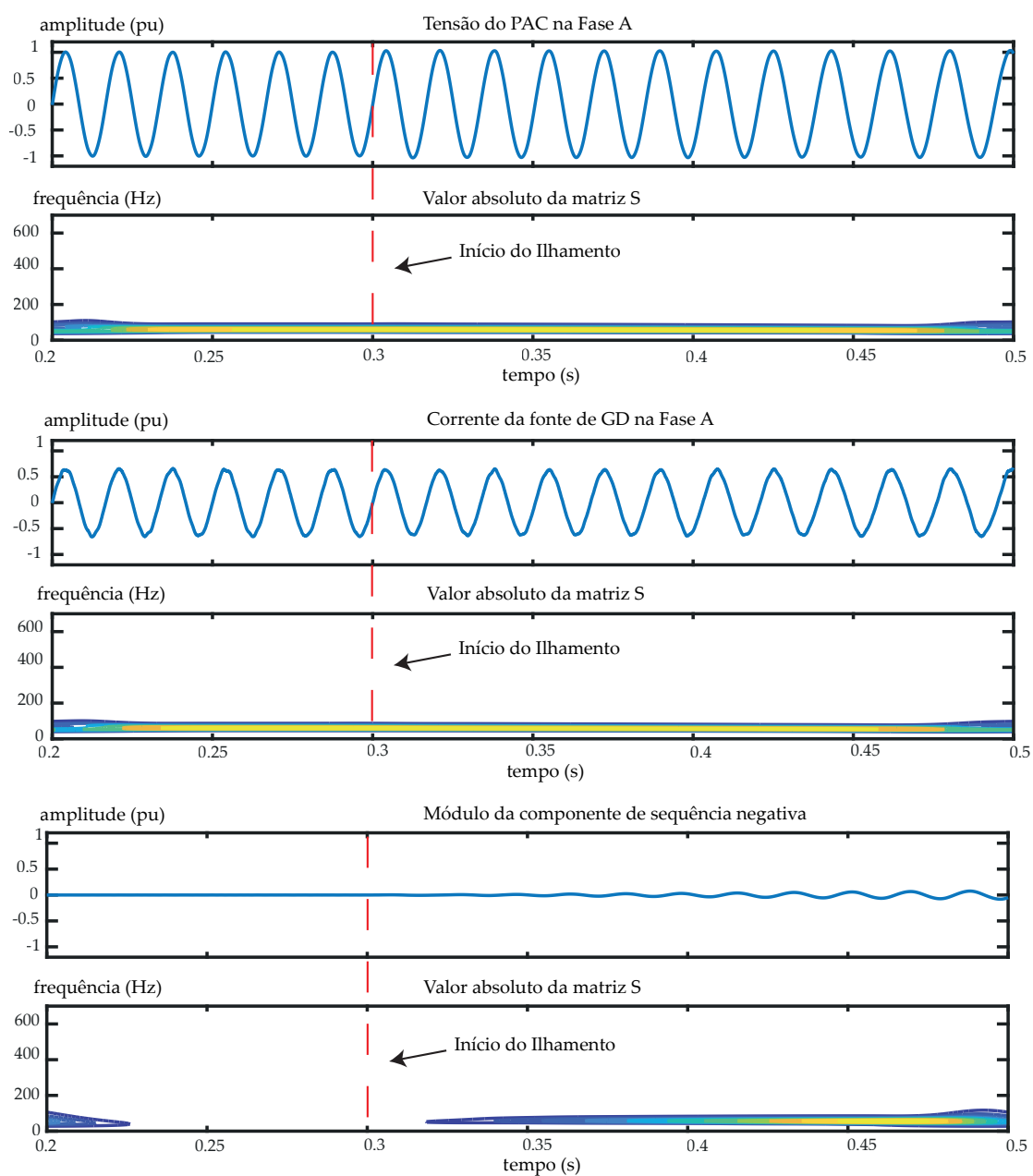
baixa tensão (SAMANTARAY et al., 2010b; MOHANTY et al., 2014; MISHRA et al., 2016; MENEZES, 2014).

A análise da literatura da seção 3.2 também revelou que a maioria dos métodos AI baseados na TS estimam as componentes de sequência negativa dos sinais de tensão. Apenas Menezes et al. (2019) utilizaram as tensões trifásicas do SEP, além de Samantaray et al. (2010b) e Pigazo et al. (2008), os quais propuseram o uso da corrente proveniente da fonte de GD.

O comportamento de diferentes sinais monitorados na saída do conversor do SFCR é apresentado na Figura 9 após a ocorrência do ilhamento em $t = 0,3$ s. Considera-se nesta análise a operação em regime permanente para a condição A do SFCR e desbalanço mínimo de potência entre geração e carga.

Observa-se que dentre os sinais monitorados apresentados na Figura 9, os gráficos para tensão e correntes no PAC apresentam variação mínima. Visualmente em tempo e frequência, não é possível detectar a ocorrência de quaisquer eventos. Em contra-partida, ao estimar o módulo da componente de sequência negativa das tensões no PAC, é possível perceber uma pequena oscilação no momento imediatamente posterior a ocorrência do ilhamento. Ao aplicar a TS, ficam evidentes as frequências

FIGURA 9. Comparativo dos valores da matriz-S antes e após o ilhamentos para diferentes sinais monitorados.



Fonte: o próprio autor

que surgem por meio do gráfico das curvas de nível, as quais indicam as regiões mais significativas da matriz-S. O denominado efeito de borda (MENEZES, 2014) também surge nos gráficos da Figura 9, haja vista a janela de amostras limitada para gerar os valores da matriz-S.

Portanto, estimar as componentes de sequência negativa das tensões no PAC demonstra-se favorável para o desenvolvimento do método proposto, pois, mesmo em casos de mínimo desbalanço de potência, observa-se um pequeno desequilíbrio oscilatório nas tensões do sistema após a ocorrência do ilhamento.

4.4 Análise dos critérios de decisão

Uma das etapas de suma impotância consiste na escolha dos parâmetros identificadores do fenômeno, neste caso, para detecção de ilhamento. A análise do estado da arte evidenciou duas vertentes. Na primeira, os autores recorrem às ferramentas de inteligência artificial para reconhecer padrões. Na segunda, os autores calculam limiares fixos e adaptativos, os quais, se excedidos, tornam-se identificadores do ilhamento.

O cálculo dos limiares é mais simples e por isso diminui a complexidade e consequentemente, o esforço computacional dos métodos AI passivos. Pode-se destacar da literatura os critérios propostos por Samantaray et al. (2010b) e Mohanty et al. (2014). São eles:

a) Energia do sinal (E):

$$E = \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N [S(j, n)]^2, \quad (4.1)$$

onde $S(j, n)$ é a matriz-S, M é a quantidade de linhas da matriz, N a quantidade de colunas,

b) Soma Cumulativa (CUSUM):

$$CUSUM = \sum_0^k E_{k-1}, \quad (4.2)$$

onde k é a janela de amostras ($k = 32$).

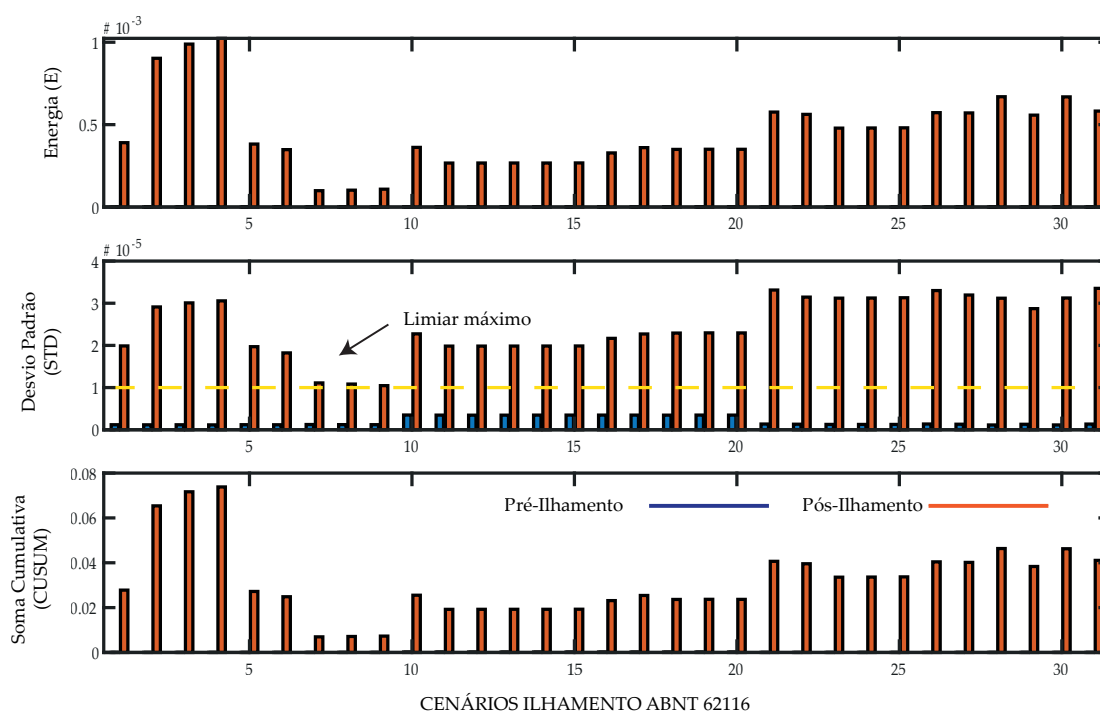
c) Desvio Padrão (STD, do inglês *Standard Deviation*):

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N (S(j, n) - M_A(j))^2}{n}}, \quad (4.3)$$

no qual, M_A é a média aritmética dos dados e n é a quantidade de dados.

Para adotar a métrica que melhor se adequa ao método proposto, os critérios foram avaliados inicialmente em relação a capacidade de diferenciar momentos pré e pós ilhamento. Em seguida, observou-se a capacidade de distinguir o ilhamento de outros eventos simulados da base de dados, como: chaveamento de carga (CHC), chaveamento de fonte de harmônicos (CHH), variação de frequência da rede (CHF). Na primeira etapa, os indicadores, calculados com base nos valores da matriz-S, permitiram desenvolver o histograma da Figura 10 analisando apenas os cenários de ilhamento que são propostos pela ABNT 62116.

FIGURA 10. Histograma dos valores pré e pós-ilhamento para os cenários ILA.



Fonte: o próprio autor

As faixas do histograma da Figura 10 representam o comportamento dos critérios em instantes anteriores e após a ocorrência do ilhamento. Observou-se que as variações dos critérios são indiscutivelmente maiores no momento imediatamente após o evento. Apenas os valores de STD surgem no histograma (em azul), em momentos

pré-ilhamento, contudo, a variação é em média 10 vezes maior para todos os casos. Ao final, constatou-se que todos os critérios demonstraram ser promissores. Em relação à capacidade de distinguir o ilhamento de outros eventos, observou-se a variação temporal dos critérios após a ocorrência de diferentes perturbações ao sistema-teste na Figura 11. Contudo, nem sempre a DCUSUM é sempre positiva após o ilhamento. Variações como no caso da Figura X podem ocorrer, contudo, a tendência é o crescimento da função, indicada pelos valores positivos da DCUSUM.

Os gráficos da Figura 11 mostram que a adoção de limiares fixos seria uma estratégia não otimizada para o caso do ilhamento, pois múltiplas condições de operação do sistema podem afetar essas variáveis. Observou-se que os critérios por si só como métrica não seriam capazes de distinguir o ilhamento de outros eventos. Outro ponto de destaque é que nos casos de ilhamento, E e CUSUM crescem vagarosamente, até que, por volta de 50 ms, irrompe um crescimento exponencial. Em contrapartida, a STD cresce variando linearmente desde o início do evento. Este conjunto de resultados permitiu o desenvolvimento de estratégias para mitigar a ocorrência de falso-negativo, inclusive com a concepção de um novo critério denominado DCUSUM (Soma cumulativa Derivativa), definida conforme Equação 4.4:

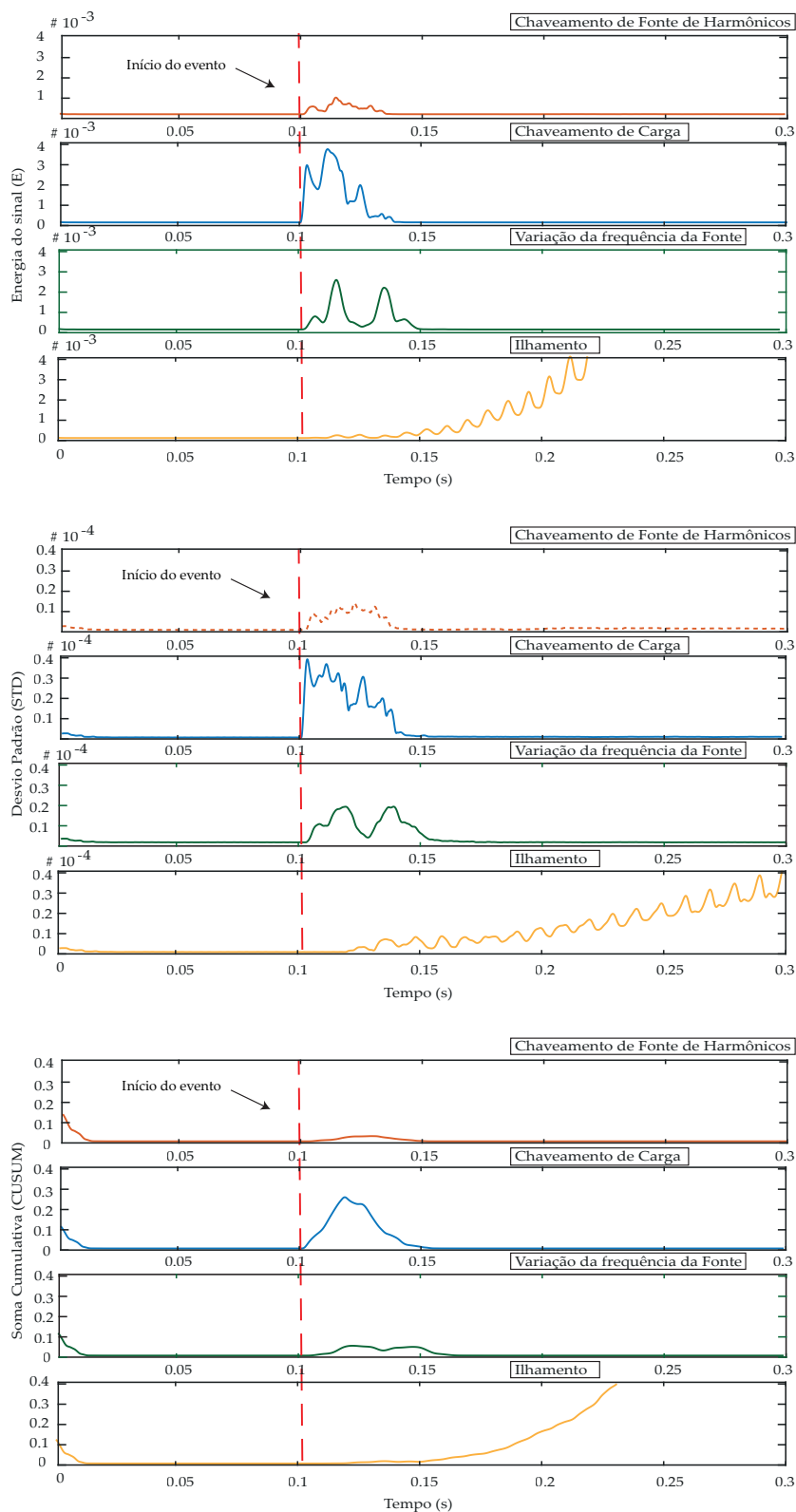
$$DCUSUM = \frac{CUSUM_n - CUSUM_k}{t_n - t_k}, \quad (4.4)$$

onde, n é a amostra atual e k a janela de amostras ($k = 32$).

A DCUSUM é formada por valores que "flutuam" em torno de zero. Valores positivos indicam o crescimento de uma função, valores negativos, o decréscimo. Seu princípio de funcionamento pode ser explicado com base na Figura 12, em um exemplo comparativo entre os cenários CHC e ILA.

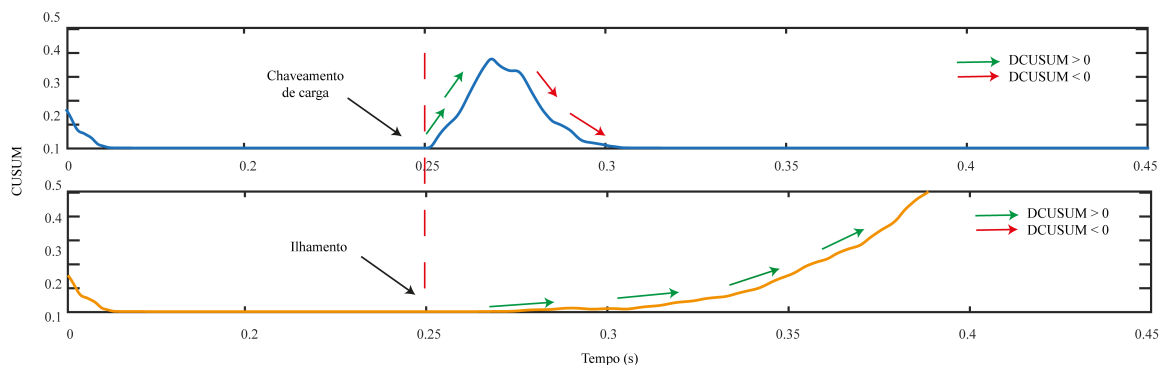
Observa-se da Figura 12 a variação esperada da DCUSUM durante a operação anormal do sistema. As setas verdes indicam os valores positivos, enquanto que as vermelhas, valores negativos da DCUSUM. Portanto, nota-se que os transitórios, a exemplo do chaveamento de carga, apresentam uma variação rápida nos valores da CUSUM. Neste caso, a condição ilhada será definida no momento em que a DCUSUM persistir em valores positivos durante vários ciclos. Contudo, nem sempre após o ilha-

FIGURA 11. Variação dos critérios de decisão ao longo do tempo após ocorrência de perturbações ao sistema.



Fonte: o próprio autor.

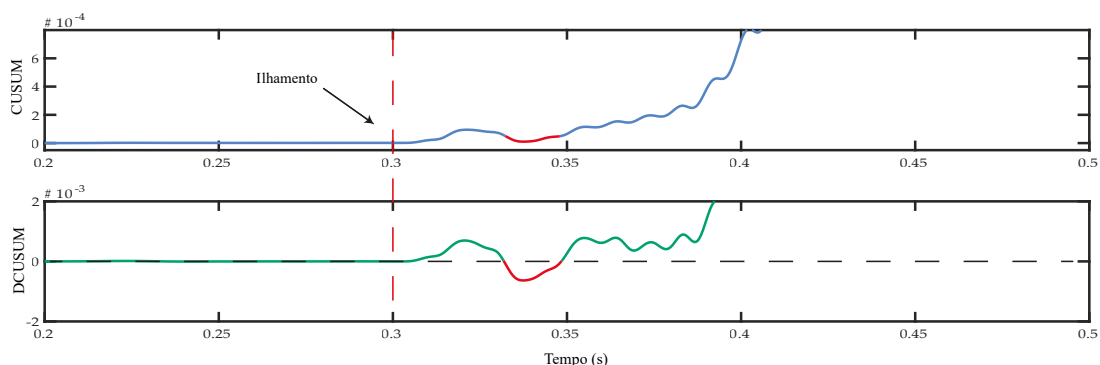
FIGURA 12. Variação dos valores da CUSUM e comportamento da DCUSUM.



Fonte: o próprio autor.

mento obtêm-se valores positivos da DCUSUM, como é o caso do cenário apresentado na Figura 13.

FIGURA 13. Variação dos valores da CUSUM e comportamento da DCUSUM.



Fonte: o próprio autor.

Observa-se que por alguns ciclos a DCUSUM assume valores negativos após o ilhamento da Figura 13. Isto ocorre em função de uma pequena variação da CUSUM, destacada em vermelho. Destaca-se ainda que o tamanho da janela utilizada para cálculo da DCUSUM influencia diretamente, contudo, é suficiente para que persista em valores positivos para identificar o fenômeno do ilhamento.

4.5 Método proposto

O método proposto aplica a TS para extrair características de sinais nos domínios do tempo e da frequência, na busca por padrões que indiquem a condição de ilha-mento. Na análise dos critérios, observou-se a viabilidade do uso da STD em conjunto com a DCUSUM como parâmetros identificadores. O esquema proposto é sumarizado no fluxograma da Figura 14, o qual processa as informações a cada nova amostra coletada das tensões no PAC.

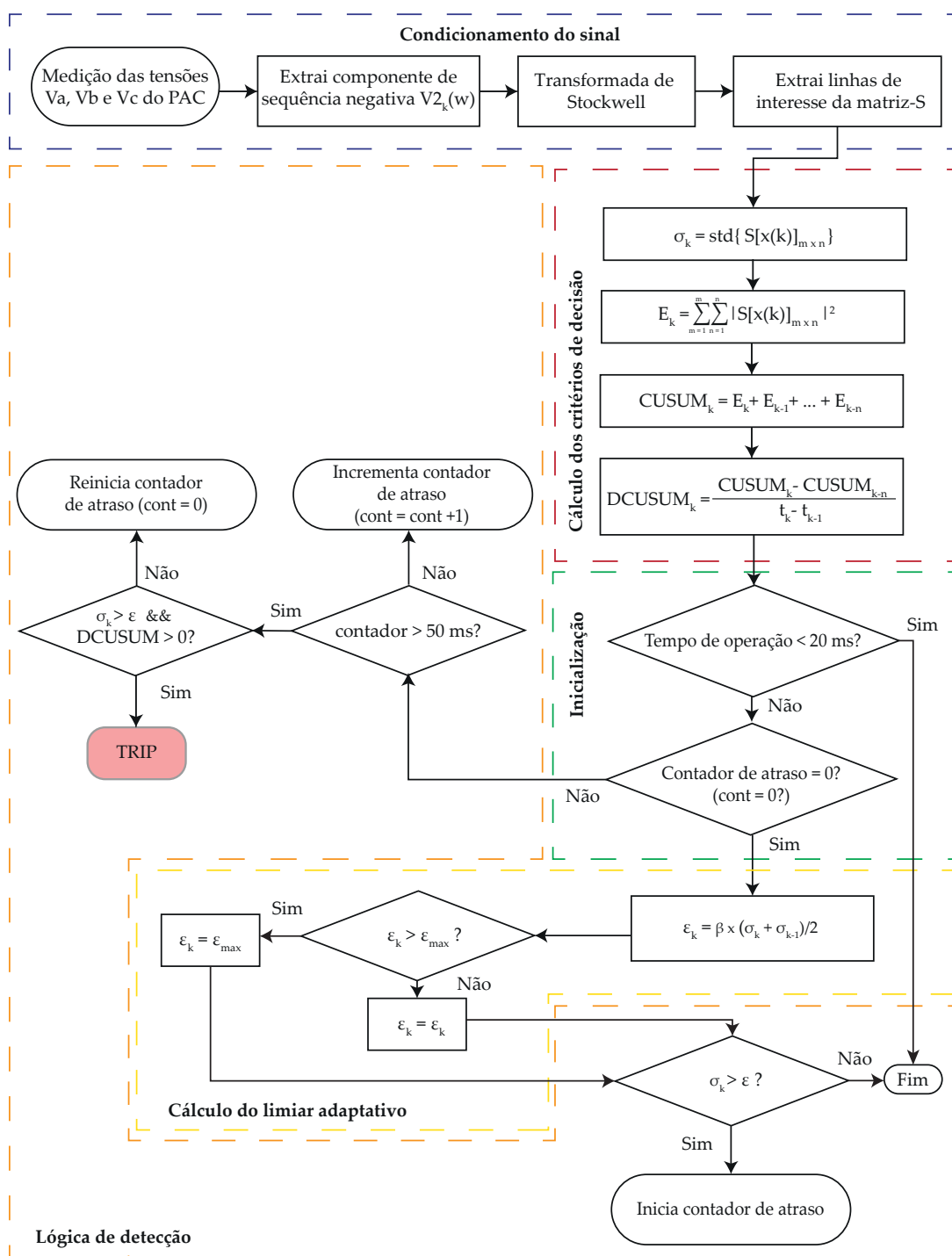
O primeiro bloco do fluxograma consiste na aquisição dos sinais de tensão (V_a , V_b e V_c), realizado a uma taxa de amostragem de 1,92 kHz, que corresponde a 32 amostras por ciclo. Em seguida, estimam-se o módulo e fase das componentes de sequência negativa a cada instante de tempo. A cada nova amostra de V_2 , calculada dentro da janela w ($w = 32$ amostras), o método aplica a TS para extrair informações do módulo das componentes, o que irá resultar na matriz-S. Respeitando a frequência de *Nyquist*, a TS poderia obter informações de uma frequência até 960 Hz. Como V_2 é um sinal de baixa frequência, calcula-se uma faixa de frequências contida entre 100 Hz e 300 Hz. Isto só foi possível em função da flexibilidade do algoritmo da TS, que reduziu a quantidade de informação calculada em 70,59%.

Logo após, as informações da matriz-S são utilizadas para calcular os critérios de decisão, aos quais a lógica de detecção é aplicada da seguinte maneira: o método lê o ponto de operação do sistema e calcula a STD (σ_k), estabelecendo um limiar superior de 20%. Para evitar flutuações, o limiar ajusta-se a cada nova amostra obtida, a partir da média móvel dos últimos dois valores do desvio padrão em uma janela deslizando no tempo. Matematicamente, o limiar adaptativo é definido como:

$$\epsilon = \beta \frac{\sigma_k + \sigma_{k-1}}{2}, \quad (4.5)$$

no qual n é a amostra atual, β é a toletância de 20% e ϵ é o limiar adaptativo. Ressalta-se que o limiar adaptativo não pode aumentar indefinidamente. Deste modo, adotou-se o limiar máximo em $\epsilon_{max} = 1 \cdot 10^{-5}$, valor baseado no uso conjunto do histograma da Figura 10 com a simulação dos casos representativos. No instante em que ocorre o

FIGURA 14. Fluxograma do método anti-ilhamento proposto



Fonte: O próprio autor

ilhamento, os valores do desvio padrão ultrapassam o limiar adaptativo e bloqueia-o em seu último valor calculado. O contador de atraso aguarda por 50 ms para reavaliar

os critérios de decisão, considerado tempo suficiente para que os transitórios tornem a decrescer, e o ilhamento torne a crescer, conforme observado no eixo de tempo das Figura 11 e 12. Ao final deste tempo, uma vez que o desvio padrão esteja acima do limiar e a DCUSUM seja positiva, o método indica a ocorrência do ilhamento. Caso a DCUSUM seja negativa ou nula, o método conclui que houve um transitório que apenas alterou o ponto de operação do sistema, e por isso, reajusta o limiar para este novo cenário. Caso o desvio padrão retome para valores abaixo do limiar, o método ignora flutuações da DCUSUM e volta a operar normalmente, até que exista uma outra perturbação que ultrapasse o limiar adaptativo.

4.6 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou as etapas para o desenvolvimento do método proposto. Inicialmente, apresentou-se o sistema-teste, o qual baseia-se nos circuitos e cenários constantes na ABNT 62116:2012, utilizados para certificação de inversores comerciais no Brasil e no mundo. Em seguida, a análise dos sinais monitorados evidenciou que a componente de sequência negativa caracteriza melhor o ilhamento, em detrimento das tensões e correntes senoidais obtidas no PAC. Por fim, elaborou-se a lógica de detecção do método combinando o Desvio Padrão e a Soma Cumulativa Derivativa, aliado aos limiares auto-adaptativos. Os resultados para validação do método proposto serão apresentados no capítulo seguinte.

Capítulo 5

Resultados

A validação do método proposto foi realizado utilizando a base de dados da descritas na Tabela 6 e adotando as variáveis de simulação apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7. Variáveis obtidas via simulação

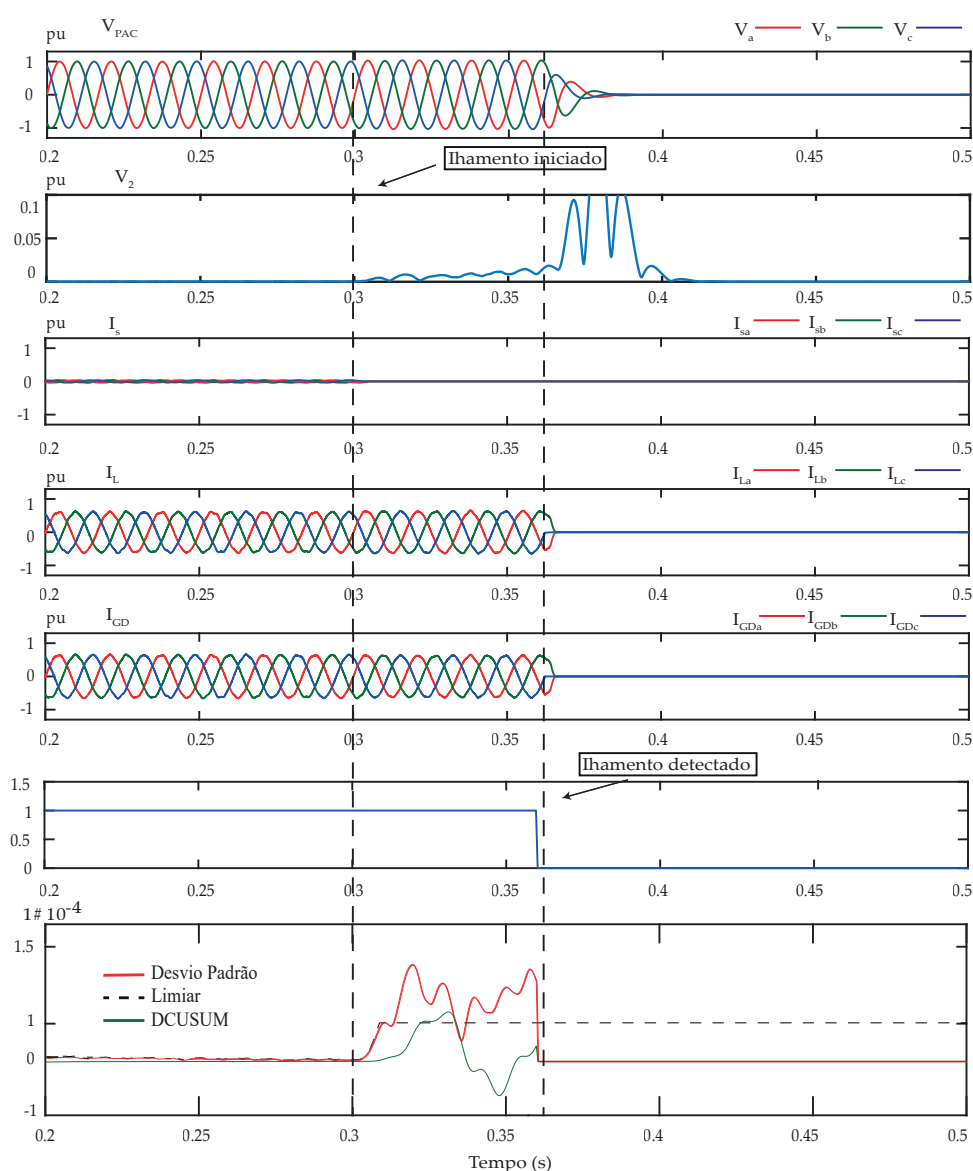
Variável	Parâmetro
V_{pac}	Tensão no PAC
V_2	Módulo da componente de sequência negativa
I_L	Corrente da carga
I_s	Corrente da rede
I_{gd}	Corrente do SFCR
$TRIP$	Sinal para desconexão do SFCR
$STD/DCUSUM$	Critérios de decisão

Em resumo, os cenários da base de dados operam inicialmente em regime permanente, no qual tem-se a cooperação entre o SFCR e a fonte principal para alimentar a carga. Neste caso, as relações entre as correntes I_s , I_{gd} e I_L são observadas. Em seguida, um evento ocorre em $t = t_0$. No caso particular do ilhamento, em t_0 tem-se $I_s = 0$ A. A partir deste instante, avalia-se o comportamento dos critérios de decisão do sistema anti-ilhamento, função das características em frequência de V_2 . Caso $TRIP = 0$, o método atua desconectando a fonte de GD do sistema, fazendo $I_{gd} = 0$.

5.1 Desempenho do método para diversos cenários

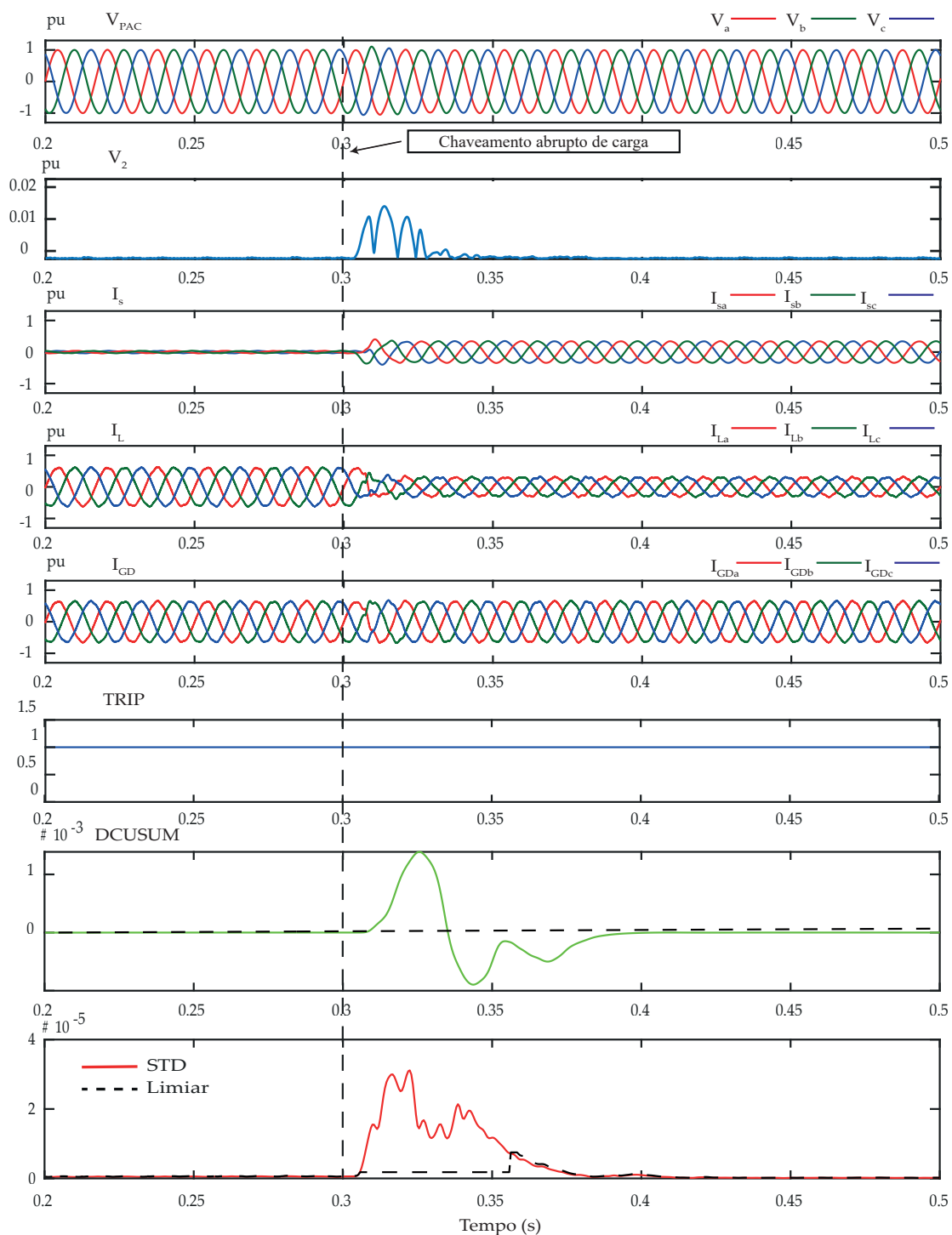
Apresentam-se nesta seção os resultados obtidos após aplicação do método proposto à metodologia apresentada no capítulo anterior. Inicialmente, discutem-se os cenários das Figuras 15, 16, 17 e 18 a seguir.

FIGURA 15. Simulação cenário ilhamento: Condição A do SFCR sem variação percentual de potência nominal.



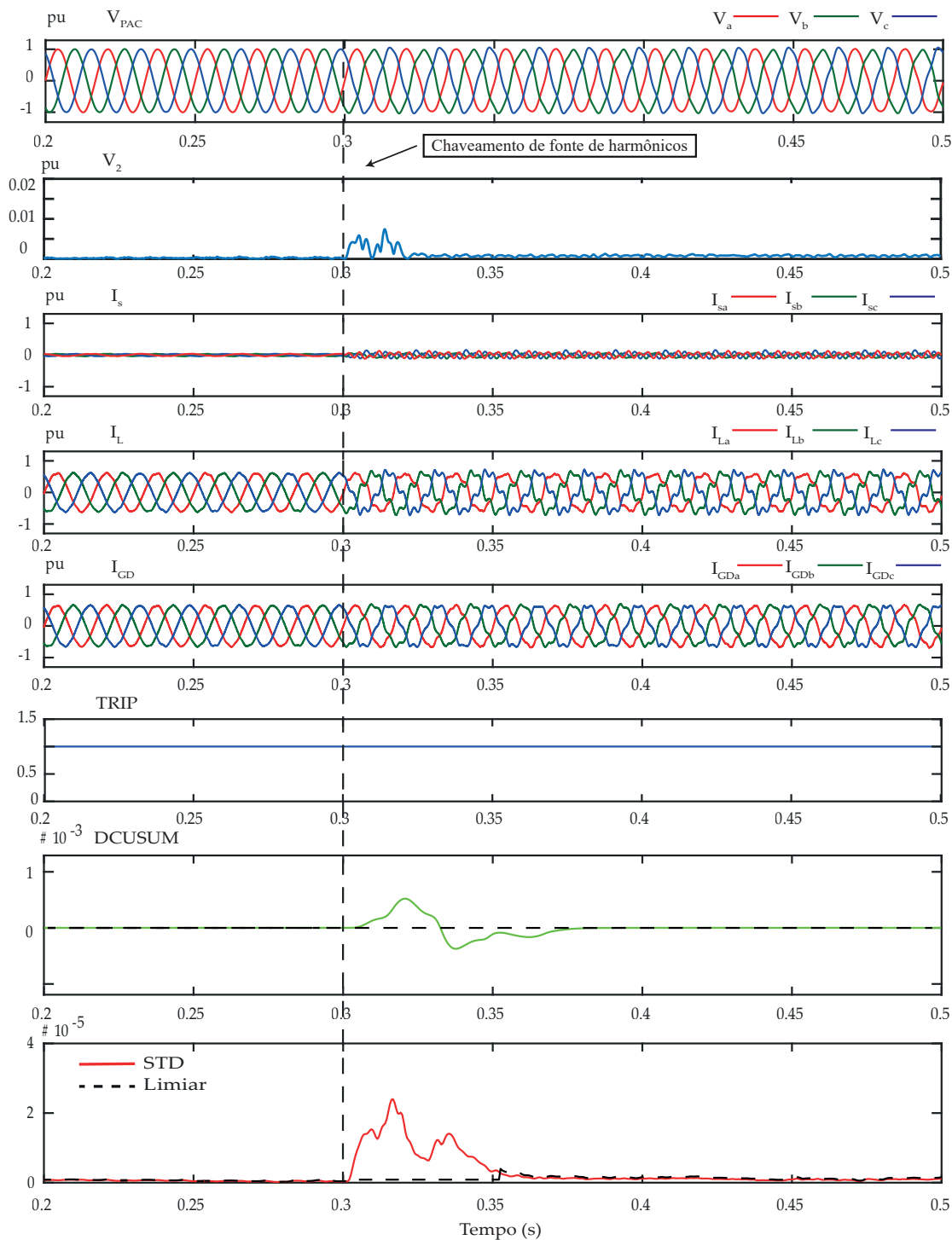
Fonte: O próprio autor

FIGURA 16. Simulação cenário chaveamento de carga: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal até retirada de carga em 50%.



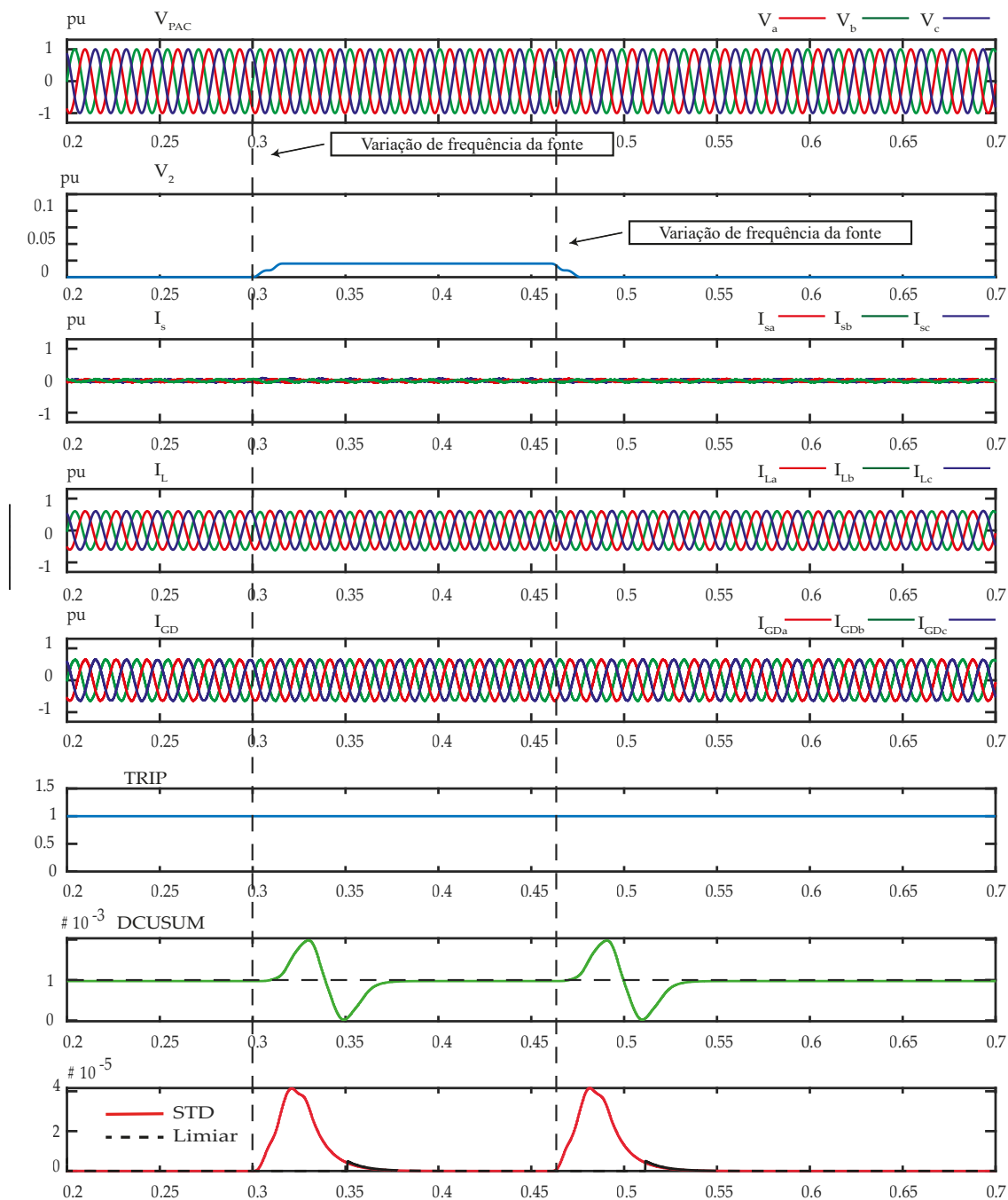
Fonte: o próprio autor

FIGURA 17. Simulação cenário chaveamento de fonte de harmônicos: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal até que uma fonte de harmônicos é inserida no sistema.



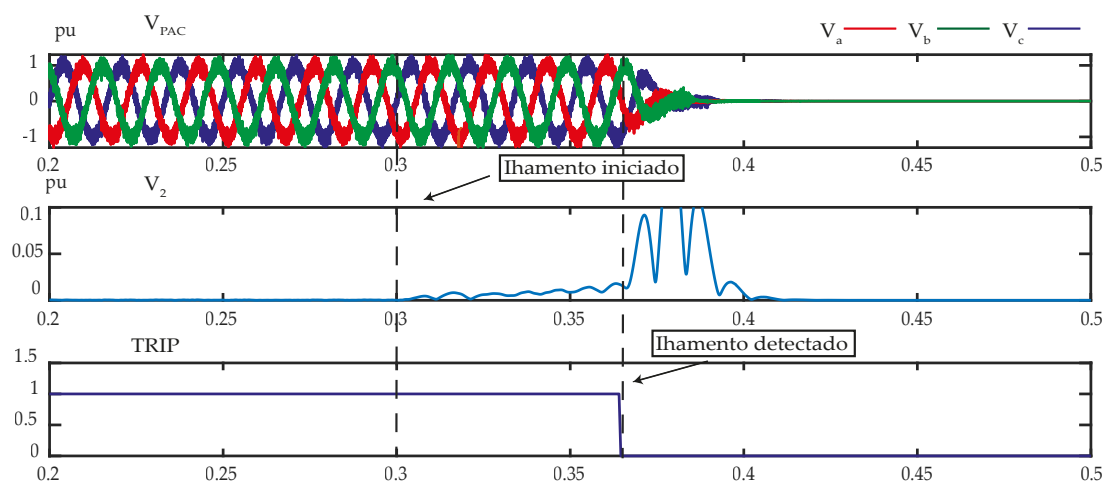
Fonte: o próprio autor

FIGURA 18. Simulação cenário variação de frequência da fonte: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal até que a frequência da fonte principal varia em degrau para 62 Hz.



Fonte: o próprio autor

FIGURA 19. Simulação cenário ilhamento para avaliação de ruídos: O ruído é aplicado nos sinais monitorados - V_{pac} , contudo, sem efeito após estimar a componente V_2 .



Fonte: o próprio autor

Análise da Figura 15 mostra um caso típico de ilhamento que ocorre em $t_0 = 0,3$ s. Observa-se da análise das correntes, que a potência consumida pela carga corresponde a uma potência próxima da potência gerada pelo SFGR, fazendo com que a corrente proveniente da rede seja mínima. No instante de desconexão da rede, I_s é interrompida e o sistema passa a operar de forma ilhada. Assim, o SFGR alimenta a carga de forma isolada, mantendo as tensões e correntes no PAC. Nestas condições, o gráfico de V_{pac} apresenta variação mínima, até que o ilhamento é detectado corretamente em menos de quatro ciclos, desconectando o SFGR do sistema.

Observa-se que imediatamente após a ocorrência do ilhamento, o parâmetro STD da Figura 15 cresce rapidamente e bloqueia o limiar adaptativo. A DCUSUM apresenta valores positivos e após 50 ms, a lógica de detecção atua conforme a metodologia proposta. Ressalta-se a variação negativa de DCUSUM próximo de $t = 0,35$ s. Caso ela se mantivesse negativa por mais alguns milissegundos, o método não atuaria. Entretanto, como STD tende ao crescimento, um novo teste seria realizado após mais 50 ms, de tal forma que STD e DCUSUM apresentariam as condições para detectar o evento.

Um caso de chaveamento abrupto de carga é apresentado na Figura 16. Conforme se vê, os valores do desvio padrão crescem rapidamente, bloqueando o limiar

adaptativo do sistema de proteção anti-ilhamento. Ao final do contador de atraso, constata-se que apesar da STD continuar acima do limiar, a DCUSUM flutua em valores negativos. Então, o método atua corretamente, ou seja, não desconectando o SFCR (TRIP = 1). Ao final, o limiar foi ajustado para acompanhar a retomada do sistema à sua operação normal.

Os resultados obtidos do desempenho do método em um cenário de chaveamento de fonte de harmônicos é mostrado na Figura 17. Observa-se que o método apresentou comportamento análogo ao do chaveamento de carga. A injeção de conteúdo harmônico provocou alteração do ponto de operação do sistema, o que resultou em formas de onda distorcidas de V_{pac} . Neste cenário, o parâmetro STD e o limiar adaptativo ajustaram-se à uma nova condição operativa.

Nos gráficos da Figura 18 a frequência da fonte varia em degrau e se mantém no limite superior de sobrefrequência (62 Hz) durante 150 ms. Neste caso, um desequilíbrio é indicado pelo gráfico de V_2 logo após o início do evento. Contudo, os critérios de decisão variam fortemente apenas nos momentos de chaveamento da fonte, se reestabelecendo abaixo do limiar adaptativo logo em seguida. O método atua corretamente e não desconecta a fonte de GD do sistema.

Um resumo dos resultados obtidos é apresentado a seguir:

- O método atuou rapidamente em relação às Zonas de Não-Detecção, para os casos de ilhamento estabelecidos pela ABNT IEC 62116;
- Os tempos máximo e mínimo de detecção foram 104,7 ms e 53,65 ms, respectivamente;
- 88% dos cenários de ilhamento foram detectados em menos de 70,32 ms.
- O tempo médio de detecção dos casos recomendados pela ABNT 62116 foi de 64,9 ms
- Não houve ocorrência de falso-positivo;

Para avaliar a robustez do método proposto adicionou-se um ruído com SNR na faixa de 10 dB nos sinais monitorados para todos os cenários de ilhamento. O ruído foi

modelado conforme proposto por Lima et al. (2019). Os resultados mostraram que não houve nenhum impacto no método proposto, mantendo a taxa de acerto em 100% dos casos. Dentre os motivos, observou-se que a estimação do fasor de sequência negativa aplica um filtro para o cálculo do fasor em 60 Hz, eliminando todo ruído logo no início, conforme os resultados na Figura 19.

5.2 Análise de sistemas desequilibrados

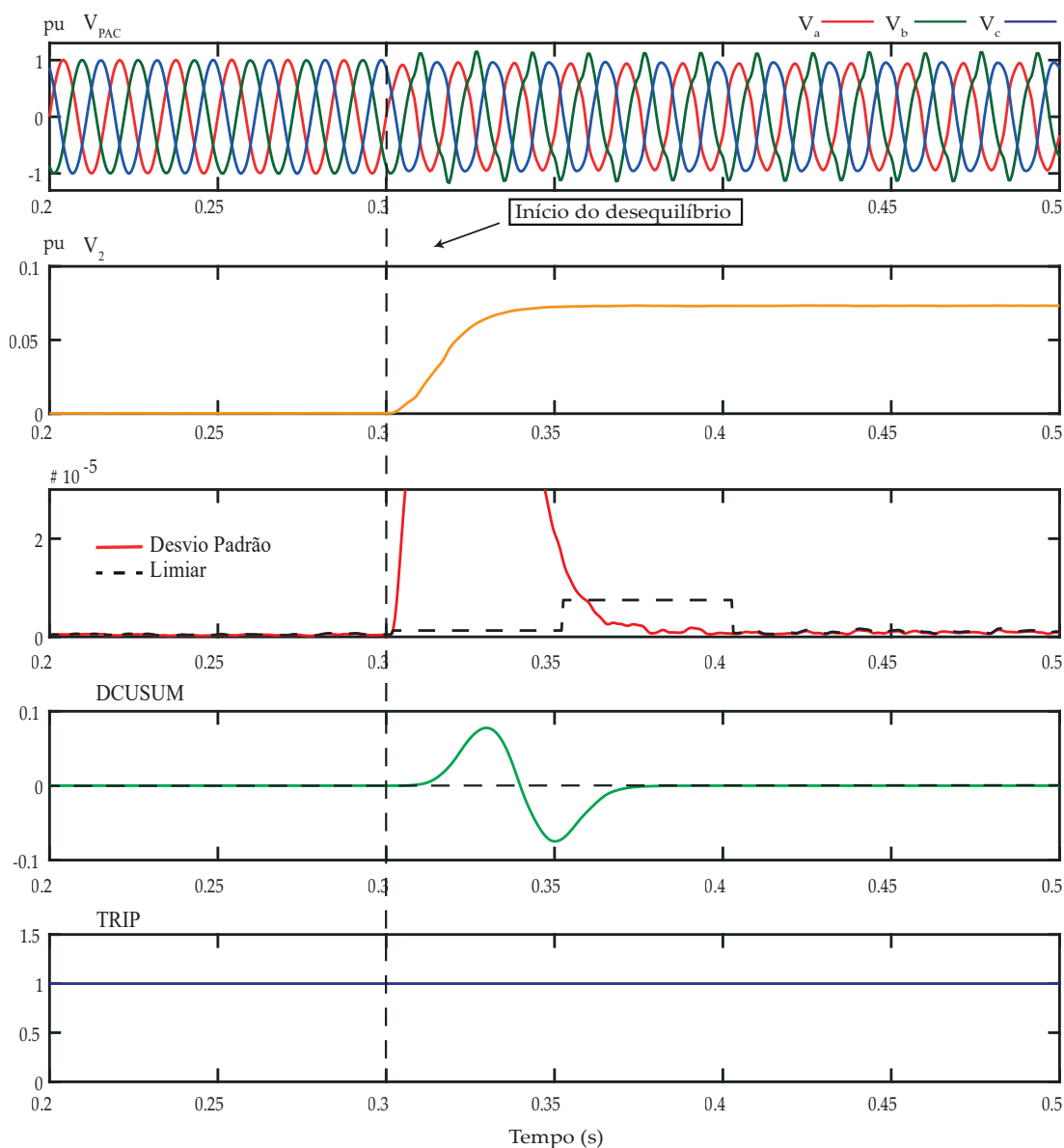
Segundo a revisão bibliográfica realizada, não se constatou o uso de sistemas desequilibrados para validação dos métodos propostos. É fato, entretanto, que o método proposto tratou de situações em que o equilíbrio limita a componente de sequência negativa a valores mínimos, quase inexistentes, de tal forma que na ocorrência do ilhamento, surgem indícios de desequilíbrio, e conseqüentemente, valores mais expressivos desta variável.

Visando suprir essa lacuna, avaliaram-se nesta seção dois cenários nos quais o desequilíbrio é considerado. O primeiro considera o chaveamento de uma carga desequilibrada em uma das fases, enquanto o segundo cenário considera que o sistema opera em regime permanente em desequilíbrio, quando ocorre a desconexão da fonte principal, causando a condição de ilhamento. Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 20 e 21.

O chaveamento de uma carga desequilibrada é mostrado na Figura 20 em $t_0 = 0,3$ s. As formas de onda de tensão do V_{pac} apresentam um desequilíbrio evidente. Também neste momento, V_2 assume valores contínuos próximo à 0,1 pu. O método proposto, totalmente adaptativo, atua corretamente não desconectando o SFCR. Como se vê, os critérios (STD e DCUSUM) variam com o chaveamento de carga, mas rapidamente ajustam-se a uma nova condição operativa.

No cenário da Figura 21, o método proposto realiza a leitura prévia do ponto de operação do sistema, assim, não há impacto aos identificadores inicialmente. Apenas na ocorrência do ilhamento, observa-se a variação positiva em V_2 juntamente com STD que se mantém acima do limiar tempo suficiente para que seja detectado o ilhamento

FIGURA 20. Simulação cenários com desequilíbrio: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal da carga. Chaveamento de carga em $t_0 = 0,3$ s.

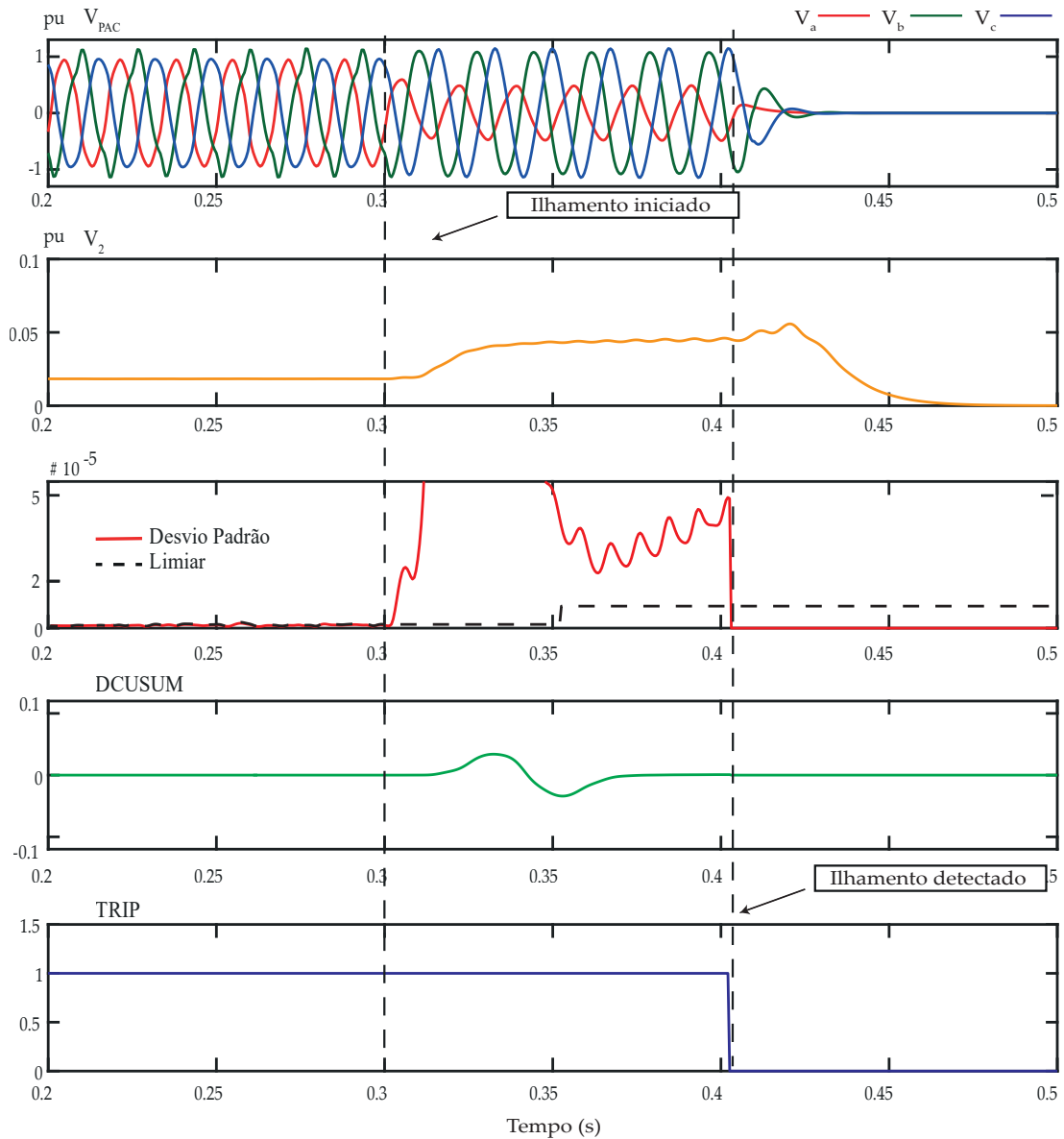


Fonte: o próprio autor

próximo de 107 ms.

Conclui-se então que o método proposto foi eficaz em relação aos sistemas desequilibrados avaliados. Observou-se que o módulo da componente de sequência negativa é uma variável contínua na operação normal do sistema, contudo, quando da operação ilhada, uma oscilação sustentável é detectada pela análise em frequência ob-

FIGURA 21. Simulação cenários com desequilíbrio: SFCR opera na condição A sem variação de potência nominal da carga. Ilhamento ocorre em $t_0 = 0,3$ s.



Fonte: o próprio autor

tida via TS.

5.3 Sistemas Multi-Inversores

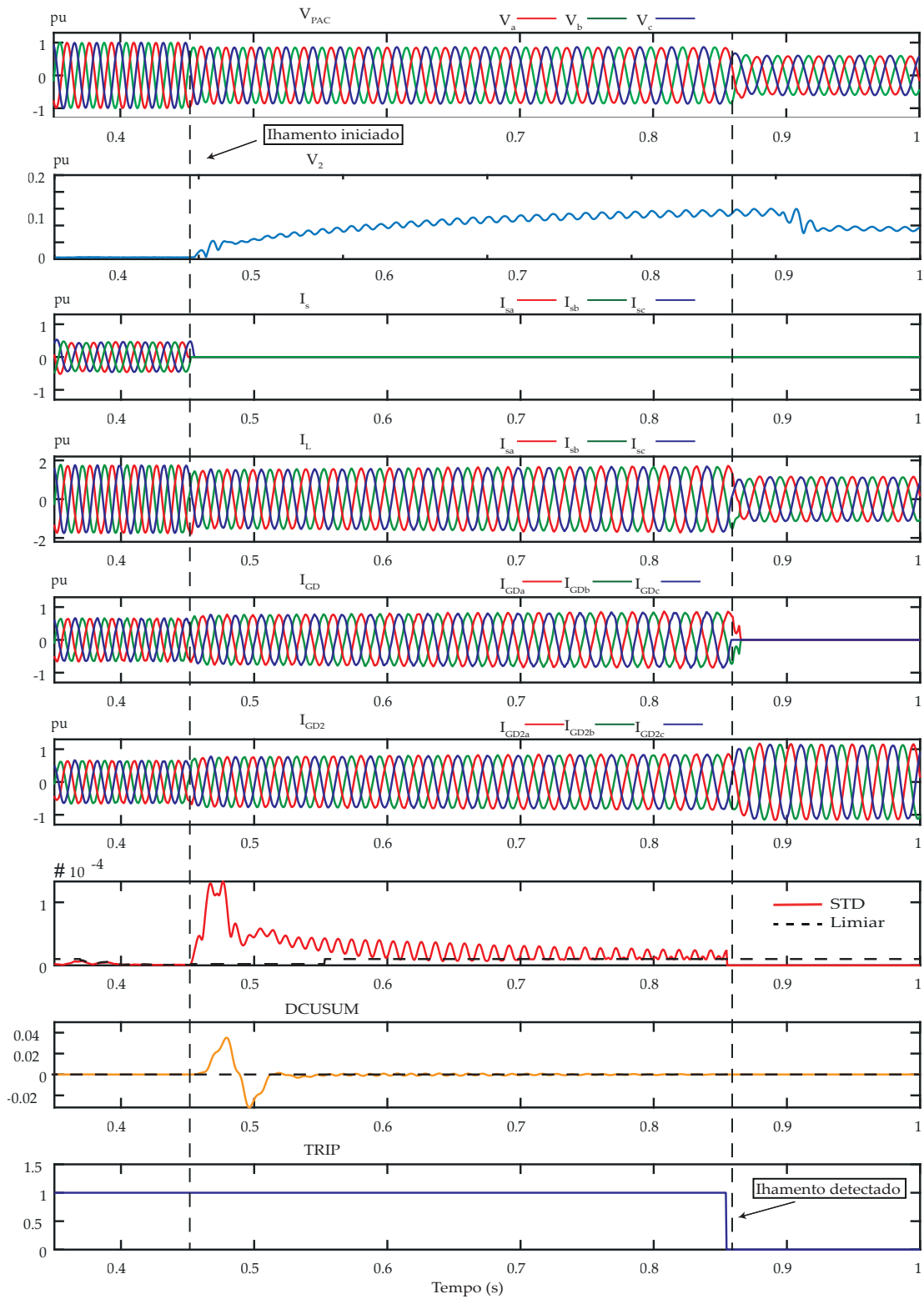
Os resultados até esta seção mostraram que, após a ocorrência do ilhamento, os critérios de decisão tendem ao crescimento até que sejam detectados. Isto ocorre devido ao fato que no sistema ilhado, o SFCR perde a referência de tensão fornecida pela rede e a partir desse instante, tem disponível apenas sua própria tensão. Essa situação se modifica quando há múltiplas fontes de GD conectadas ao sistema. Em tais casos, na ocorrência do ilhamento, os SFCR terão uma referência que compartilharão mutuamente no PAC.

A revisão bibliográfica evidenciou que a análise de cenários de ilhamento em sistemas com múltiplas fontes de GD ainda é incipiente, o que motivou a realização dos estudos apresentados a seguir. Os cenários utilizados para análise reproduzem duas réplicas adaptadas do sistema proposto por Verma et al. (2012) para operar fornecendo 100% de sua potência nominal para alimentar uma carga no PAC. Esta carga varia em potência ativa em 5% da nominal para cada cenário, o que causará estados de desequilíbrio entre carga e geração no momento do ilhamento. Nos resultados apresentados na Figura 22 considerou-se que apenas um SFCR possui o sistema de proteção anti-ilhamento proposto.

Os resultados apresentados na Figura 22 mostram dois SFCR cooperando com a rede elétrica para alimentar uma carga no momento pré-ilhamento ($t_0 < 0,45$ s). Isto é mostrado nos gráficos da corrente da fonte (I_s), corrente da carga (I_L) e as correntes dos SFCR (I_{GD} e I_{GD2}). Na ocorrência do ilhamento em $t > 0,45$ s, tem-se $I_s = 0$ A e os SFCR passam a alimentar a carga isoladamente. Observa-se um afundamento nas tensões do PAC, como se vê no gráfico de (V_{pac}), o qual é provocado pelo desequilíbrio entre geração e carga. Todavia, os SFCR compartilham uma referência mútua de tensão e continuam a operar, até que há a desconexão do SFCR que dispõe do sistema anti-ilhamento proposto em $t = 0,87$ s.

O comportamento dos critérios de decisão nesse caso é de suma importância. O tempo de detecção aumenta para o caso da Figura 22, próximo de 450 ms. Observa-se que STD mantém-se acima do limiar máximo, contudo DCUSUM flutua em torno de zero. Após sucessivos testes, o método obtém a condição para desconexão do SFCR

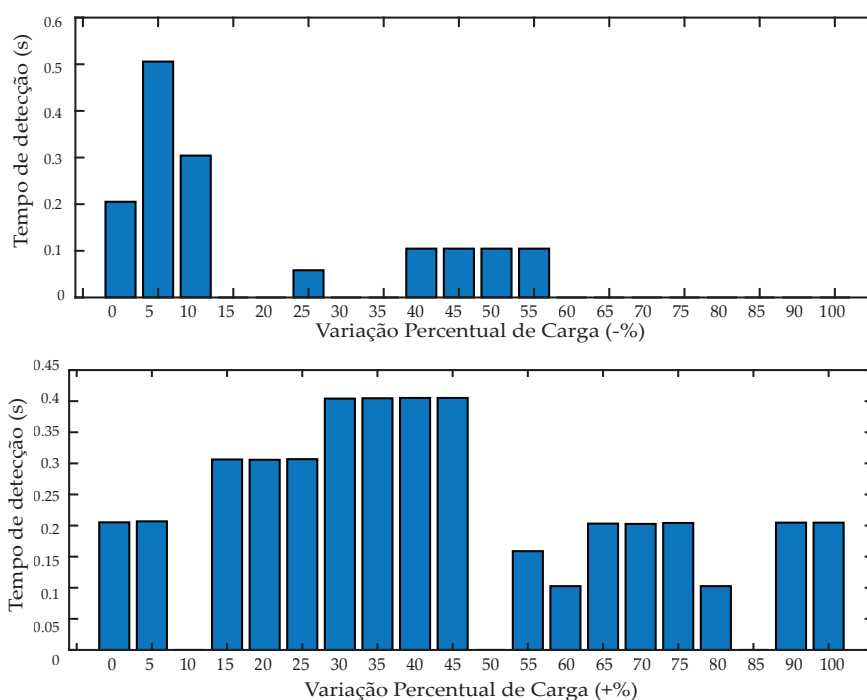
FIGURA 22. Simulação cenários sistema multi-inversor: SFCR opera na condição A e desbalanço entre geração e carga no momento do ilhamento de +50%. Evento ocorre em $t_0 = 0,45$ s.



Fonte: o próprio autor

($STD > \epsilon$ && $DCUSUM > 0$). Os resultados dos demais casos são apresentados no histograma da Figura 23.

FIGURA 23. Tempo de detecção para os cenários multi-inversor com variação da potência da carga, o qual causa desbalanço entre geração e carga no momento do ilhamento.



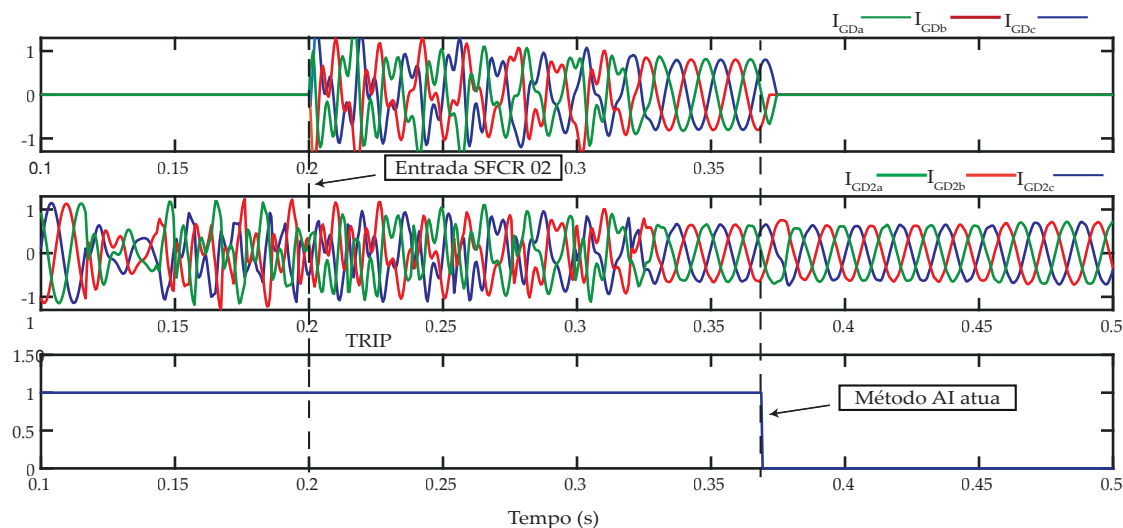
Fonte: o próprio autor

Com uma taxa de acerto em 65% dos casos, os cenários multi-inversores demonstraram que o SFCR proposto por Verma et al. (2012) não tem uma estratégia de controle otimizada para tais cenários, conforme demonstra a Figura 24. Observou-se que, apesar de ajustes eurísticos dos ganhos dos controladores PID, em vários casos os SFCR tomam um tempo significativo para se ajustarem e produzirem as correntes de referência corretamente.

Por fim, o método proposto falhou para os casos em que as fontes de GD levam um tempo significativo para se ajustar a uma condição de operação normal, como é o caso da Figura 24. Como o tempo estipulado para iniciar o método de detecção de ilhamento foi de 20 ms, não há ponto de operação definido, visto que os SFCR não conseguiram sincronizar com a rede. Nos casos detectáveis, com base no histograma

da Figura 23, o tempo médio de detecção foi de 226 ms.

FIGURA 24. Operação paralela dos SFCR para os cenários multi-inversores.



Fonte: o próprio autor

5.4 Síntese dos resultados

Este capítulo apresentou os resultados da análise de desempenho do método proposto, o qual foi testado para 237 casos distintos. Dentre os casos de ilhamento, 62 casos compõem cenários com e sem ruído nos sinais monitorados. O ilhamento foi detectado em 100% dos casos. Com tempo médio de detecção de 64,9 ms, o método obtém um resultado satisfatório, haja vista o limite máximo de dois segundos recomendado pela Norma ABNT NBR 62116:2012.

No que se refere à distinção entre outros eventos, o método proposto obteve uma taxa de acerto de 94,40%, falhando apenas para os cenários de sistemas multi-inversores em que a operação paralela das fontes de GD não promove um regime permanente em sincronismo com a rede rapidamente, o que sensibilizou o sistema anti-ilhamento.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho propôs um novo método baseado na transformada de Stockwell para detecção de ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, validado por meio de simulações computacionais baseadas na norma brasileira ABNT NBR IEC 62116:2012, que trata dos ensaios anti-ilhamento para certificação de inversores de frequência comerciais.

A aplicação da transformada de Stockwell às componentes de sequência negativa, estimadas a partir das tensões trifásicas do sistema, revelou o surgimento de conteúdo harmônico de baixa frequência após a ocorrência do ilhamento. Isto permitiu a proposição de uma lógica de detecção baseada no desvio padrão e em um novo critério denominado soma cumulativa derivativa para identificar o fenômeno do ilhamento e também distingui-lo de outros eventos, como: chaveamento de cargas, chaveamento de fonte de harmônicos, variação de frequência da rede, entre outros. O uso de limites adaptativos tornou o método capaz de responder às mudanças operativas que comumente ocorrem nos sistemas elétricos.

Análise dos resultados obtidos mostrou que o método obteve um bom desempenho nos estudos de caso realizados. Utilizando uma frequência de amostragem de 1920 Hz, o método obteve uma taxa de acerto em 94,40% dos casos simulados, em um total de sete condições operativas às quais o sistema teste é submetido. A falha em 5,60% dos casos ocorreu apenas para os cenários com múltiplas fontes de SFCR, o que indica a necessidade de realização de estudos mais detalhados acerca desse tema.

Ao final, obteve-se um método eficaz, rápido, seguro e de fácil programação

computacional, com taxa de acerto de 100% e tempo médio de detecção de 64,9 ms para detecção de ilhamento para os cenários de que trata a ABNT 62116:2012.

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Aplicar o método proposto em uma base de dados de sinais reais, no qual as características e condições do ilhamento podem ser avaliadas e comparadas teoricamente;
- Modelagem de SFCR com diferentes estratégias de controle para avaliar a resposta dos controladores em situações ilhadas;
- Modelagem de um sistema-teste otimizado para operação de múltiplas fontes de GD;
- Avaliação do método em sistemas-teste com múltiplas fontes, cargas, transformadores e geradores distribuídos;
- Implementação de métodos propostos com outras transformadas para desenvolvimento de estudo comparativo;
- Implementação da metodologia proposta em um sistema embarcado para melhor avaliar os tempo de processamento e resposta final, ficando assim mais próximo de uma aplicação real.

Referências Bibliográficas

ABNT NBR IEC 62116: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. [S.l.], 2012.

ABSOLAR. *Infográfico ABSOLAR - Energia Fotovoltaica no Brasil*. 2021. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: 08.01.2020.

AKHLAGHI, S.; GHADIMI, A. A.; AKHLAGHI, A. A novel hybrid islanding detection method combination of sms and qf for islanding detection of inverter-based dg. In: IEEE. *2014 Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*. [S.l.], 2014. p. 1–8.

ALVES, A. A. et al. Avaliação da estabilidade de tensão nos sistemas de distribuição considerando a injeção de potência da geração distribuída. Universidade Estadual do Oeste do Parana, 2016.

ANEEL. Módulo 8—qualidade da energia elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica—ANEEL*, 2010.

ANEEL. *Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL - Projeções 2017*. 2017. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 06.01.2020.

ANEEL. *Indicadores coletivos de continuidade*. 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 01.07.2021.

ASIMINOAEI, L.; TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F.; BORUP, U. A digital controlled pv-inverter with grid impedance estimation for ens detection. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 20, n. 6, p. 1480–1490, 2005.

BOWER, W.; ROPP, M. Evaluation of islanding detection methods for utility-interactive inverters in photovoltaic systems. *Sandia report SAND*, v. 3591, p. 2002, 2002.

CAI, W.; LIU, B.; DUAN, S.; ZOU, C. An islanding detection method based on dual-frequency harmonic current injection under grid impedance unbalanced condition. *IEEE transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 9, n. 2, p. 1178–1187, 2012.

CHICCO, G.; SCHLABBACH, J.; SPERTINO, F. Characterisation and assessment of the harmonic emission of grid-connected photovoltaic systems. In: IEEE. *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.], 2005. p. 1–7.

- CORREA, D. S. et al. *Metodologias para análise do risco de ocorrência de ilhamentos não intencionais de geradores síncronos distribuídos*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia . . . , 2008.
- DINIZ, P. S.; SILVA, E. A. da; NETTO, S. L. *Processamento Digital de Sinais-: Projeto e Análise de Sistemas*. [S.l.]: Bookman Editora, 2014.
- DO, H. T.; ZHANG, X.; LI, H.; LI, F.; CHU, T. T.-T.; VIET, N. N. Wavelet packet-based passive islanding detection method for grid connected photovoltaic inverters. In: IEEE. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. [S.l.], 2016. p. 1566–1570.
- FAYYAD, Y.; BEN-BRAHIM, L. A wavelet-based passive islanding detection technique. In: IEEE. *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. [S.l.], 2012. p. 1–6.
- FEKETE, K.; KLAIC, Z.; MAJDANDZIC, L. Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid. *Renewable energy*, Elsevier, v. 43, p. 140–148, 2012.
- GABOR, D. Theory of communication. part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, v. 93, n. 26, p. 429–441, 1946.
- GEORGE, N. V. *S transform: Time Frequency Analysis and Filtering*. 79 p. Tese (Doutorado) — National Institute of Technology, 2009.
- GUHA, B.; HADDAD, R. J.; KALAANI, Y. Anti-islanding techniques for inverter-based distributed generation systems-a survey. In: IEEE. *SoutheastCon 2015*. [S.l.], 2015. p. 1–9.
- GUPTA, N.; GARG, R. Algorithm for islanding detection in photovoltaic generator network connected to low-voltage grid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 12, n. 10, p. 2280–2287, 2018.
- HANIF, M.; DWIVEDI, U.; BASU, M.; GAUGHAN, K. Wavelet based islanding detection of dc-ac inverter interfaced dg systems. In: IEEE. *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*. [S.l.], 2010. p. 1–5.
- IEEE Std 1547: Ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. New York, 2003.
- JANG, S.-I.; KIM, K.-H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 745–752, 2004.
- JIN, Y.; SONG, Q.; LIU, W. Anti-islanding protection for distributed generation systems based on reactive power drift. In: IEEE. *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. [S.l.], 2009. p. 3970–3975.

- JO, J.; CHA, H. Performance of anti-islanding of an improved reactive power variation method based on positive feedback. In: IEEE. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.], 2017. p. 4761–4765.
- JONES, R. A.; SIMS, T. R.; IMECE, A. F. Investigation of potential islanding of a self-commutated static power converter in photovoltaic systems. *IEEE transactions on energy conversion*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 624–631, 1990.
- KHAMIS, A.; SHAREEF, H.; BIZKEVELCI, E.; KHATIB, T. A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 28, p. 483–493, 2013.
- KOBAYASHI, H.; TAKIGAWA, K.; HASHIMOTO, E.; KITAMURA, A.; MATSUDA, H. Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale pv systems. In: IEEE. *The Conference Record of the Twenty-Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1991*. [S.l.], 1991. p. 695–700.
- LAAKSONEN, H. Advanced islanding detection functionality for future electricity distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 2056–2064, 2013.
- LIMA, É. M.; JUNQUEIRA, C. M. D. S.; COELHOS, R. D. A.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. D. Modelagem probabilística do ruído em sistemas de distribuição de energia elétrica. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, v. 1, n. 1, 2019.
- MENEZES, A. S. *Uma contribuição à análise espectral de sinais estacionários e não estacionários*. Tese (Doutorado), 2014.
- MENEZES, T. S.; COURRY, D. V.; FERNANDES, R. A. Islanding detection based on artificial neural network and s-transform for distributed generators. In: IEEE. *2019 IEEE Milan PowerTech*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- MISHRA, M.; ROUT, P. K.; SAHU, R.; RAY, D.; SWARUP, S. Study the performance of s-transform based extreme learning machine for islanding detection in distributed generation. In: IEEE. *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- MOHANTY, S.; PRADHAN, A.; ROUSTRAY, A. A cumulative sum-based fault detector for power system relaying application. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 79–86, 2007.
- MOHANTY, S. R.; KISHOR, N.; RAY, P. K.; CATALÃO, J. P. Islanding detection in a distributed generation based hybrid system using intelligent pattern recognition techniques. In: IEEE. *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*. [S.l.], 2012. p. 1–5.
- MOHANTY, S. R.; KISHOR, N.; RAY, P. K.; CATALO, J. P. Comparative study of advanced signal processing techniques for islanding detection in a hybrid distributed generation system. *IEEE Transactions on sustainable Energy*, IEEE, v. 6, n. 1, p. 122–131, 2014.

- NDIAYE, I.; AHMED, E.; BURNS, C.; NICKERSON, J.; FALLS, M. Impact of distributed solar pv systems operation on residential feeders performance. In: IEEE. *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.
- NIAKI, A. M.; AFSHARNIA, S. A new passive islanding detection method and its performance evaluation for multi-dg systems. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 110, p. 180–187, 2014.
- OPPENHEIM, A. V.; S., W. A.; NAWAB, S. H. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.
- PIGAZO, A.; LISERRE, M.; MASTROMAURO, R. A.; MORENO, V. M.; DELL'AQUILA, A. Wavelet-based islanding detection in grid-connected pv systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 56, n. 11, p. 4445–4455, 2008.
- PRABHU, K. M. *Window functions and their applications in signal processing*. [S.l.]: CRC press, 2013.
- RAY, P. K.; KISHOR, N.; MOHANTY, S. R. S-transform based islanding detection in grid-connected distributed generation based power system. In: IEEE. *2010 IEEE International Energy Conference*. [S.l.], 2010. p. 612–617.
- RAY, P. K.; KISHOR, N.; MOHANTY, S. R. Islanding and power quality disturbance detection in grid-connected hybrid power system using wavelet and *s*-transform. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1082–1094, 2012.
- RAY, P. K.; MOHANTY, S. R.; KISHOR, N.; DUBEY, H. C. Islanding and coherency detection in distributed generation based hybrid power system. In: IEEE. *2010 Annual IEEE India Conference (INDICON)*. [S.l.], 2010. p. 1–4.
- RAZA, S.; MOKHLIS, H.; AROF, H.; LAGHARI, J.; WANG, L. Application of signal processing techniques for islanding detection of distributed generation in distribution network: A review. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 96, p. 613–624, 2015.
- ROPP, M.; AAKER, K.; HAIGH, J.; SABBAH, N. Using power line carrier communications to prevent islanding [of pv power systems]. In: IEEE. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No. 00CH37036)*. [S.l.], 2000. p. 1675–1678.
- ROPP, M.; BEGOVIC, M.; ROHATGI, A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention. *IEEE Transactions on Energy conversion*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 810–816, 1999.
- SAMANTARAY, S.; SAMUI, A.; BABU, B. C. S-transform based cumulative sum detector (cusum) for islanding detection in distributed generations. In: IEEE. *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- SAMANTARAY, S.; SAMUI, A.; BABU, B. C. S-transform based cumulative sum detector (cusum) for islanding detection in distributed generations. In: IEEE. *2010 Joint*

International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India. [S.l.], 2010. p. 1–6.

SANCA, H. S. et al. *Um algoritmo de estimação de frequência aplicado à proteção anti-ilhamento de fontes de geração distribuída*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)., 2017.

SILVA, H. T. da; KOMATSU, W. Comparative analysis of two islanding detection methods in multi-inverter case. In: IEEE. *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.], 2015. p. 1–6.

SINGH, A.; BHATIA, R.; CHANANA, S. An anti-islanding technique for grid-connected dg and multi dg system. In: IEEE. *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.

STEVENS, J. W.; BONN, R. H.; GINN, J. W.; GONZALEZ, S.; KERN, G. *Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems*. [S.l.], 2000.

STOCKWELL, R. G.; MANSINHA, L.; LOWE, R. Localization of the complex spectrum: the s transform. *IEEE transactions on signal processing*, IEEE, v. 44, n. 4, p. 998–1001, 1996.

TAKEDA, Y.; TAKIGAWA, K.; KOBAYASHI, H.; NAKAHARA, K.; MORISHITA, T.; KITAMURA, A.; MIYOSHI, A.; MATSUDA, H.; KOMATSU, S. Test and study of utility interface and control problems for residential pv systems in rokko island 200 kw test facility. In: IEEE. *Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. [S.l.], 1988. p. 1062–1067.

TEDDE, M.; SMEDLEY, K. Anti-islanding for three-phase one-cycle control grid tied inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 29, n. 7, p. 3330–3345, 2013.

TOLMASQUIM, M. T. *Novo modelo do setor elétrico brasileiro*. [S.l.]: Synergia, 2011.

VERMA, A. K.; SINGH, B.; SHAHANI, D. Grid interfaced solar photovoltaic power generating system with power quality improvement at ac mains. In: IEEE. *2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*. [S.l.], 2012. p. 177–182.

WALLING, R.; MILLER, N. Distributed generation islanding-implications on power system dynamic performance. In: IEEE. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 92–96.

WANG, W.; KLIBER, J.; ZHANG, G.; XU, W.; HOWELL, B.; PALLADINO, T. A power line signaling based scheme for anti-islanding protection of distributed generators—part ii: Field test results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 3, p. 1767–1772, 2007.

WANG, Y. *Efficient stockwell transform with application to image processing*. Tese (Doutorado) — University of Waterloo, 2011.

XU, W.; ZHANG, G.; LI, C.; WANG, W.; WANG, G.; KLIBER, J. A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators—part i: Scheme and analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 3, p. 1758–1766, 2007.

YAN, Y.; ZHU, H. The generalization of discrete stockwell transforms. In: IEEE. *2011 19th European Signal Processing Conference*. [S.l.], 2011. p. 1209–1213.