



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS - DE
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS - CMC
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIA DAIARA DE ALMEIDA MELQUÍADES

DETECÇÃO DE CONDIÇÕES DE ILHAMENTO EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS MONOFÁSICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA
UTILIZANDO A TRANSFORMADA *Wavelet*

CARAÚBAS - RN

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS - DE
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS - CMC
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIA DAIARA DE ALMEIDA MELQUÍADES

DETECÇÃO DE CONDIÇÕES DE ILHAMENTO EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS MONOFÁSICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA
UTILIZANDO A TRANSFORMADA *Wavelet*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como parte dos requisitos necessários para a ob-
tenção do Grau de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Cecilio Martins de Sousa
Neto

CARAÚBAS - RN
2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M517d Melquiades, Antonia Daiara de Almeida.
Detecção de Condições de Ilhamento em Sistemas
Fotovoltaicos Monofásicos Conectados à Rede
Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet /
Antonia Daiara de Almeida Melquiades. - 2021.
45 f. : il.

Orientador: Cecílio Martins de Sousa Neto Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2021.

1. Transformada Wavelet. 2. Ilhamento. 3.
Sistema Fotovoltaico . 4. Coeficientes Escala. 5.
Coeficientes Wavelet. I. Neto, Cecílio Martins de
Sousa Neto, orient. II. Título.

ANTONIA DAIARA DE ALMEIDA MELQUÍADES

**DETECÇÃO DE CONDIÇÕES DE ILHAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
MONOFÁSICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA UTILIZANDO A
TRANSFORMADA *WAVELET***

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Grau de
Engenheira Eletricista.

APROVADO EM: 28/05/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cecilio Martins de Sousa Neto – UFERSA
Presidente

Prof. Dr. Ádller de Oliveira Guimarães – UFERSA
Primeiro Membro

Profa. Dra. Sâmara de Cavalcante Paiva – UFERSA
Segundo Membro

CARAÚBAS-RN

2021

Á Titia, que me criou com todo o amor que nela cabia, e esse amor era tão imenso, que não tem um dia sequer de minha vida desde sua partida, que eu não anseie por esse amor. Obrigada por me guiar até aqui. Meu pensamento e meu coração sempre estarão em Ti.

*“[...] Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte,
não temerei mal algum,
porque Tu estás comigo [...]”
(Salmo 23)*

AGRADECIMENTOS

À Jesus Cristo, Meu Pai, amigo, companheiro e confidente.

À Cecílio, pela sua orientação, paciência e pelos valiosos ensinamentos que sempre, por mim, serão lembrados.

À Minha Mãe, que tornou esse momento possível e faz tudo em minha vida ter sentido e valer a pena.

À Vovó e aos meus irmãos, Demétrio e Maria, por todo o apoio e compreensão a mim dados durante todo o tempo.

Ao meu amigo e companheiro Joel, que me faz perceber que eu quero ser uma pessoa melhor a cada dia, que me apoia, ajuda e está presente todas as horas de todos os dias.

Ao Meu Pai pelo incentivo e pelos valiosos conselhos sobre a vida.

Aos meu amigos John e Yago, que estiveram comigo desde o início e se fizeram presentes em todos os momentos. Sempre os levarei comigo em meu coração.

À Chicão, meu pai de coração que Jesus colocou em nossas vidas, trazendo luz e paz.

À Danielle, que desde que entrou em minha vida, jamais se fez ausente, me apoiando, incentivando e ajudando em todos os momentos, inclusive nos mais difíceis, me dando forças para continuar.

Aos meus amigos, professores e colegas que fizeram e fazem parte desse capítulo tão importante que está prestes a se encerrar

Em especial à Nossa Senhora Aparecida, por todas as graças concedidas e por jamais me abandonar.

RESUMO

Este trabalho propõe a análise e detecção de condições de ilhamento em sistemas fotovoltaicos monofásicos conectados à rede elétrica baseado na transformada *wavelet*, em que, para a identificação da falta será realizada a decomposição recursiva e em tempo real das energias dos coeficientes escala e *wavelet* da *wavelet* mãe db (4). O esquema de proteção anti-ilhamento proposto é baseado em técnicas de proteção passivas através do monitoramento dos níveis de tensão no ponto de acoplamento comum entre o sistema, as cargas locais e a rede elétrica. A análise e os resultados foram realizados por meio de implementações e simulações nos *softwares* Psim e Matlab e apresentaram resultados semelhantes aos métodos de detecção convencionais, com a ressalva de uma precisão exata no tempo de detecção da falha. Também foi avaliada a influência da *wavelet* mãe escolhida quanto a eficiência de detecção das faltas e o impacto causado quanto a proteção eficaz e o bom funcionamento do sistema contra possíveis condições de ilhamento.

Palavras-chave: Transformada *wavelet*. Ilhamento. Sistema Fotovoltaico. Coeficientes escala. Coeficientes *wavelet*.

ABSTRACT

This work proposes the analysis and detection of islanding conditions in single-phase photovoltaic systems connected to the electrical network based on the *wavelet* transform, in which, for the identification of the fault, recursive and real-time decomposition of the energies of the scale coefficients will be performed. and *wavelet* from *wavelet* mother db (4). The proposed anti-islanding protection scheme is based on passive protection techniques through the monitoring of voltage levels at the common coupling point between the system, local loads and the electrical network. The analysis and results were carried out through implementations and simulations in Psim and Matlab *softwares* and presented results similar to conventional detection methods, with the exception of an exact precision in the time of failure detection. The influence of the chosen *wavelet* mother was also evaluated in terms of the efficiency of detecting faults and the impact caused in terms of effective protection and the proper functioning of the system against possible islanding conditions.

Keywords: Transformed *wavelet*. Islanding. Photovoltaic system. Scale coefficients. *wavelet* coefficients.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz Energética Brasileira.	12
Figura 2 – Participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica.	13
Figura 3 – Participação de cada fonte na geração distribuída em 2019	14
Figura 4 – Extensão do zero de corrente utilizado no método AFD	19
Figura 5 – Sistema fotovoltaico monofásico implementado.	22
Figura 6 – Circuito simplificado para testes.	23
Figura 7 – Circuito clássico do conversor <i>boost</i>	23
Figura 8 – Forma de onda na saída do conversor <i>Boost</i>	24
Figura 9 – Circuito equivalente do sistema.	25
Figura 10 – Circuito do filtro LCL	26
Figura 11 – Diagrama referente ao primeiro nível de decomposição da TWD.	30
Figura 12 – Diagrama referente aos três primeiros níveis de decomposição da TWDR.	31
Figura 13 – Tensão no PAC	34
Figura 14 – Coeficientes escala	34
Figura 15 – Coeficientes <i>wavelet</i>	35
Figura 16 – Energia dos Coeficientes escala	35
Figura 17 – Energia dos Coeficientes <i>wavelet</i>	36
Figura 18 – Tensão eficaz no PAC	36
Figura 19 – Energia dos coeficientes <i>wavelet</i>	37
Figura 20 – Energia dos coeficientes <i>wavelet</i>	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AFD	<i>Active Frequency Drift</i>
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DH	Distorção Harmônica
DSC	Controlador de Dupla Sequência
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
GD	Geração Distribuída
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MCC	Modo de Condução Contínua
ZND	Zona de não Detecção
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
OUF	<i>Over/Under Frequency</i>
OUV	<i>Over/Under Voltage</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PJD	<i>Phase Jump Frequency</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RMS	Root Mean Square
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFV	Sistema Fotovoltaico

SFS	<i>Sândia Frequency Shift</i>
SMS	<i>Slip-Mode Frequency Shift</i>
SOTO	<i>Symmetrical Optimum Tuning Optimization</i>
SVS	<i>Sândia Voltage Shift</i>
TW	Transformada <i>Wavelet</i>
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
TWDR	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Hz	Hertz
V	Volts
H	Henry
W	Watts
W _p	Potência de pico
ΔP	Variação da potência
ΔQ	Variação da carga
R_L	Resistor da carga
L_L	Indutor da carga
L	Indutor do conversor <i>boost</i>
i_L	Corrente do conversor <i>boost</i>
v_L	Tensão do indutor do conversor <i>boost</i>
K	ganho do controlador do barramento CC
$h\phi$	Filtro escala
$h\psi$	Filtro <i>wavelet</i>
$\dot{\epsilon}$	Eenergia dos coeficientes escala em tempo real
$\ddot{\epsilon}$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> em tempo real
$s_j(k)$	Coeficientes escala
$w_j(k)$	Coeficientes <i>wavelet</i>
$\ddot{\epsilon}_v$	Somatório das energias dos coeficientes escala e <i>wavelet</i>
Δk	Número de amostras por ciclo
k	Número da amostra atual
ω_s	Frequência fundamental do controlador de corrente
k_{pi}	Ganho do controlador de corrente
k_{ii}	Ganho do controlador de corrente

$G_V(s)$	Função de transferência do filtro passa - baixa de primeira ordem
τ_v	Constante de tempo do filtro passa - baixa de primeira ordem
V_{C3}	Tensão no capacitor do filtro LCL
i_{C3}	Corrente no capacitor do filtro LCL
V_s	Tensão da rede elétrica
i_s	Corrente da rede elétrica
i_L	Corrente da carga
i_g	Corrente na saída do inversor
v_g	Tensão de entrada do filtro LCL
R_1	Resistor do filtro LCL
R_2	Resistor do filtro LCL
R_3	Resistor do filtro LCL
L_1	Indutor do filtro LCL
L_2	Indutor do filtro LCL
L_3	Indutor do filtro LCL
R_s	Resistência de linha

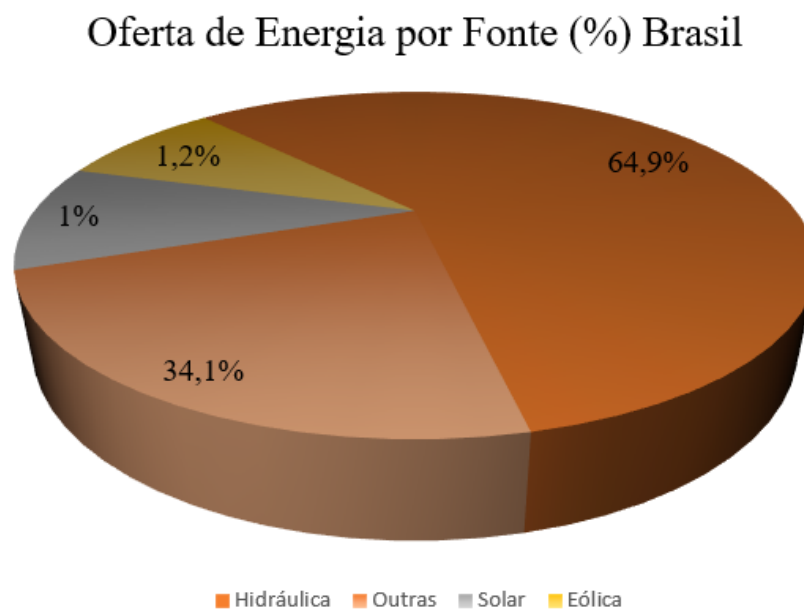
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Metodologia	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Sistemas de Geração Distribuída	16
2.2	Ilhamento em Sistemas Fotovoltaicos	16
2.3	Métodos de Detecção Anti-Ilhamento	17
2.3.1	Métodos Passivos	17
2.3.2	Métodos Ativos	18
2.3.2.1	Métodos Baseados em Comunicação	21
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	22
3.1	Conversor <i>Boost</i>	23
3.2	Modelagem do Conversor CC/CA	24
3.3	Filtro LCL	25
3.4	Barramento CC	26
3.5	Controlador de Corrente	28
3.5.1	Controlador de Dupla Sequência	28
3.5.2	Controle de Corrente	29
3.6	Detecção de Ilhamento Baseada em <i>Wavelets</i>	29
3.6.1	Filtros escala e <i>wavelet</i>	30
3.6.2	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante (TWDR)	31
3.6.3	Energia dos Coeficientes Escala e <i>Wavelet</i> da TWDR	31
3.6.4	Cálculo Recursivo para as Energias dos Coeficientes Escala e <i>Wavelet</i> em Tempo Real	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5	CONCLUSÃO	38
6	TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O advento da ideia de sustentabilidade e do uso dos recursos naturais para atender as necessidades atuais sem comprometer as necessidades futuras, tornou-se um dos assuntos mais discutidos dentre as principais nações. Com base nesse princípio, tem se tornado cada vez mais comum a utilização de fontes renováveis de energia tais como a energia solar, eólica e de células a combustível. O Brasil dispõe de uma matriz energética composta, em sua grande maioria, por fontes renováveis de energia, com destaque para as fontes hídricas, eólicas e solares, correspondendo a um total de 67,1% da oferta interna, conforme ilustrado na Figura 1 (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2020).

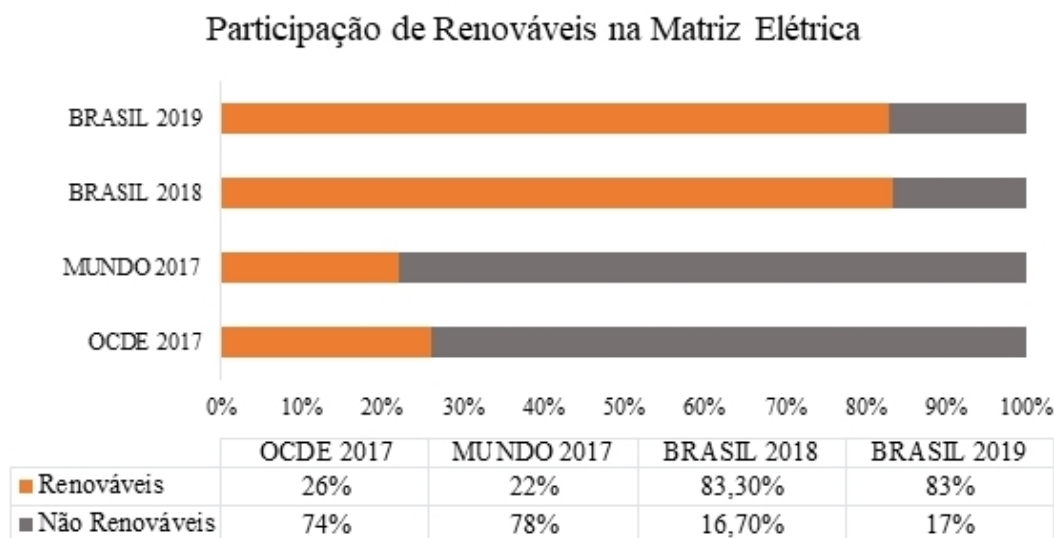
Figura 1 – Matriz Energética Brasileira.



Fonte: Adaptada. (Balanço Energético Nacional –BEN, 2020).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), atualmente no Brasil as fontes de energia renováveis, compostas basicamente pelos sistemas hídricos, eólicos e solar fotovoltaico, vem apresentando significativa contribuição na composição da matriz energética brasileira, conforme apresentado na Figura 2, onde as fontes de energia renováveis contribuem com cerca de 83% da geração de energia elétrica no Brasil.

Figura 2 – Participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica.



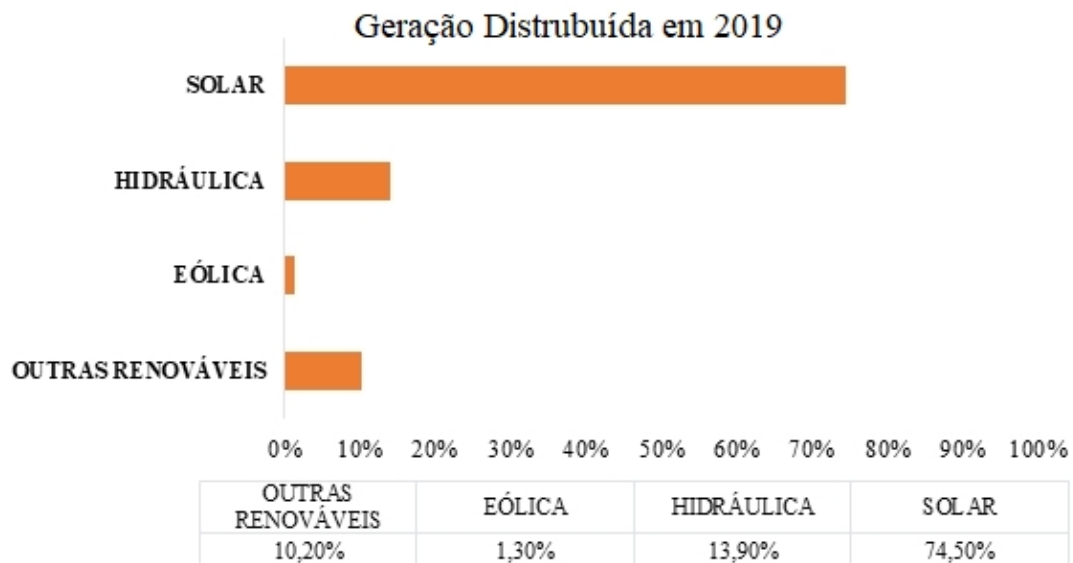
Fonte: Adaptada. (Balanço Energético Nacional –BEN, 2020).

Com base nesse contexto, os sistemas de Geração Distribuída (GD) tem ganhado cada vez mais espaço devido aos potenciais benefícios que essa categoria proporciona ao sistema elétrico, dentre os quais, destacam-se a não permanência de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, a preservação do meio ambiente frente ao baixo impacto ambiental, uma significativa baixa no carregamento das redes, redução das perdas e a diversificação na composição da matriz energética (ANEEL, 2015).

De acordo com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), estima-se que os raios solares incidentes sobre a superfície da terra sejam dez mil vezes maiores do que o consumo energético mundial e, com isso, o conceito de GD baseado em sistemas fotovoltaicos tem tornado-se cada vez mais atual e utilizado, estimulando diversas pesquisas e normatizações em todo o mundo. O Brasil possui grandes níveis de radiação solar devido à sua localização latitudinal, na qual a incidência solar é superior à verificada no restante do mundo, evidenciando uma certa vantagem para o uso dos Sistemas Fotovoltaicos (SFV). Uma das principais vantagens do uso da energia solar fotovoltaica é o atendimento às comunidades isoladas que não possuem acesso à energia elétrica (PINHEIRO, 2007).

Segundo o relatório síntese do ano de 2020 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2019 o Brasil teve um aumento de aproximadamente 169% na GD, conforme apresentado na Figura 3. De acordo com Figura 3, a energia solar, em 2019, apresentou uma contribuição de aproximadamente 74,5%, seguido pelas fontes hidráulica (13,9%) e eólica (1,3%).

Figura 3 – Participação de cada fonte na geração distribuída em 2019



Fonte: Adaptada. (Balanço Energético Nacional –BEN, 2020).

Contudo, há a necessidade de uma operação de condição normal para que ocorra a transferência de energia do SFV para a rede elétrica, sendo necessária a isolamento do sistema na ocorrência de distúrbios que caracterizam a condição de ilhamento. Tal condição ocorre quando há interrupções no fornecimento de energia da rede e o SFV continua fornecendo potência para as cargas locais ou para a própria rede elétrica, além disso, na condição de ilhamento, o SFV pode alimentar a falta e a rede pode ser reconectada automaticamente em uma situação fora dos padrões de funcionamento. Logo, os métodos de proteção anti-ilhamento em sistemas DG baseados em energia solar são necessários para manter o bom funcionamento e a qualidade de energia em casos de distúrbios na rede elétrica que caracterizem situações de ilhamento (FARANDA et al. 2008).

Atualmente, existem diversos métodos de detecção de ilhamento que apresentam bom desempenho quando um inversor está presente na rede, sendo eles divididos, basicamente, em métodos passivos e ativos. Os métodos passivos operam com a detecção de um distúrbio na amplitude, frequência ou fase da tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre o inversor e a rede elétrica durante o ilhamento. Já os métodos ativos operam introduzindo pequenos distúrbios para monitorar a resposta do sistema após essa perturbação afim de detectar se a rede elétrica continua conectada (CIOBOTARU et al. 2008).

A Transformada *Wavelet* (TW) é uma ferramenta útil na análise de sinais não estacionários, como tensões e correntes durante falhas e quedas de tensão. A transformada *wavelet* discreta (TWD) pode ser aplicada com o propósito de detectar falhas e analisar distúrbios de qualidade de energia. Visto que esses distúrbios são a principal causa da ocorrência de ilhamentos, a TW pode ser uma ferramenta útil em métodos de detecção anti-ilhamento em sistemas fotovoltaicos e de GD.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um algoritmo baseado na transformada *wavelet* para detecção de condições de ilhamento em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Implementação de um algoritmo de detecção de condições de ilhamento em tempo real, por meio das energias dos coeficientes *wavelet* da transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR);
- Comparação através do algoritmo baseado na TWDR com a TWD;
- Análise da influência da *wavelet* mãe.

1.2 Metodologia

O presente trabalho será desenvolvido de acordo com a seguinte metodologia:

- Levantamento bibliográfico do estado da arte dos principais métodos de detecção de condições de ilhamento em sistemas elétricos conectados à rede elétrica;
- Estudo teórico dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, condições de ilhamento e fundamentação teórica da transformada *wavelet*;
- Simulação e análise do sistema fotovoltaico, condições de ilhamento e implementação das versões discretas da transformada *wavelet*;
- Avaliação e comparação dos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de Geração Distribuída

Os GD podem ser definidos, segundo a ANEEL, como a geração de energia elétrica, independente da potência, que pode ser conectada diretamente no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) ou por meio de instalações de consumidores, podendo operar tanto de forma paralela quanto isolada. A definição de GD dada pelo Instituto de Pesquisa dos Estados Unidos, *Electric Power Research Institute* (EPRI), é tida como uma geração de pequeno porte, entre 0 e 5 MWp, que visa a redução do carregamento dos sistemas de distribuição, redução das perdas relacionadas à energia ativa do sistema e melhorias na qualidade de energia elétrica. O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) tem uma definição mais ampla de geração distribuída, que a caracteriza como qualquer fonte de energia, conectada a qualquer ponto do sistema elétrico, que possua menor potência do que a geração principal.

Uma visão mais direta sobre o assunto, traz uma concepção geral sobre GD como uma injeção de potência elétrica na rede que caracteriza-se por ser de pequeno porte quando comparada à tradicional geração centralizada, que pode ser classificada como microgeração distribuída, com potência instalada de até 75 kWp e minigeração distribuída, que compreende potências entre de 75 kWp até 5 MWp.

Dentre as tecnologias empregadas na GD, destacam-se as renováveis, como a energia eólica, geradores à diesel, microturbinas a gás, células a combustível e energia solar fotovoltaica, sendo que o funcionamento desta última é dado por meio da captação e conversão da radiação solar em energia elétrica (COELHO, 2018).

2.2 Ilhamento em Sistemas Fotovoltaicos

A definição de ilhamento em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) é tida como uma condição na qual o sistema fotovoltaico continua operando mesmo após a interrupção do abastecimento de energia pela rede principal. Parte do sistema que detém as cargas fica isolada do sistema principal, que continua operando (SILVA, 2016).

O ilhamento pode ser classificado de duas maneiras: intencional e não intencional. O ilhamento de forma intencional ocorre de maneira planejada através da concessionária de energia, que mantém parte do sistema elétrico de potência operando de forma isolada através da ação de geradores. Já o ilhamento de forma não intencional acontece de forma inesperada, quando há o surgimento de alguma anormalidade e o fornecimento de energia da rede principal é interrompido devido à fatores não programados.

O ilhamento inesperado é um fenômeno que pode apresentar riscos à segurança e ocasionar mau funcionamento ou danificação das cargas conectadas à rede. De acordo com Bower e Ropp (2002), as causas mais frequentes para o surgimento de ilhamentos estão relacionados

à abertura accidental da linha de distribuição devido à falhas em algum equipamento, falhas detectadas pela concessionária que ocasionam o desligamento da rede de distribuição, desconexão da rede para serviços de manutenção ou concertos nas linhas de distribuição, além de falhas humanas e decorrentes de fenômenos naturais, como a queda de árvores ou raios, por exemplo.

A norma IEEE 1547 - 2018 determina que inversores fotovoltaicos disponham de proteção anti-ilhamento para cessar essa condição em um curto intervalo de tempo, a partir da formação do ilhamento. Essa proteção deve estar presente em todos os sistemas GD afim de garantir o desligamento do inversor durante o ilhamento, proporcionando segurança durante a manutenção e evitando a danificação das cargas conectadas ao sistema (STEBANEZ et al., 2009).

2.3 Métodos de Detecção Anti-Ilhamento

2.3.1 Métodos Passivos

Os métodos de proteção anti-ilhamento do tipo passivos baseiam-se na percepção de uma falta ou anormalidade na frequência, fase ou amplitude da tensão entre o PAC, a carga e a rede de distribuição durante a condição de ilhamento (BALAGUER et. al., 2008). Dessa forma, interrompem o fornecimento de energia quando há detecção de perturbações no sistema. Os métodos passivos mais utilizados são os métodos baseados na detecção de irregularidades na tensão e frequência, deslocamento de fase e na detecção de harmônicos de tensão (ROPP et al, 2006).

- **Proteção de Sobre/Subtensão e Sobre/Subfrequência**

Do inglês (*Over/Under Voltage e Over/Under Frequency - OUV/OUF*) esse método constitui uma forma simples contra variações de tensão e frequência no PAC, sendo de fácil implementação e aplicável nos sistemas GD que utilizem qualquer fonte de energia (BOWER; ROPP, 2002). Seu funcionamento é baseado na comparação entre as grandezas monitoradas e os limites estabelecidos pela norma IEEE 1447 - 2018. Sua principal desvantagem se dá devido à sua grande zona de não detecção (*non detection zone - NDZ*), que o impede de identificar pequenas perturbações no sistema.

- **Detecção do Salto de Fase**

Do inglês (*Phase Jump Detection - PJD*) o método de detecção de ilhamento Salto de Fase é baseado na diferença de fase entre a corrente de saída do inversor e a tensão no PAC (KOBAYASHI et al., 1991). Quando em condições normais de operação, a corrente do inversor segue a referência do ciclo de fase bloqueada (do inglês *phase locked loop - PLL*), em que seu sincronismo com a tensão no PAC ocorre entre a subida e a descida (ponto zero), sendo que durante essa passagem o inversor trabalha em malha aberta, impedindo que haja alteração na

forma de onda da corrente devido a alterações de fase na tensão (BOWER; ROPP, 2002). Quando ocorre a desconexão da rede há um desequilíbrio entre a carga e a potência do inversor ($\Delta P \neq 0$ e/ou $\Delta Q \neq 0$) permitindo a detecção da falta pelo PJD.

A principal vantagem do método detecção do salto de fase é sua facilidade de implementação devido a existência do PLL em todo inversor, sendo necessária apenas a detecção da diferença de fase entre a tensão no PAC e a corrente de saída do inversor e estabelecer os limites operacionais. Em contrapartida, há uma limitação na eficiência do método devido a dificuldade na definição dos limites máximo e mínimo para o erro de fase. Outra desvantagem ocorre quando o limite estabelecido é muito baixo, havendo o desligamento repentino em função de transientes quando há presença de cargas indutivas, além disso, valores muito altos podem não ser detectados devido a presença da zona de não detecção.

• Detecção de Harmônicos - DH

O método de proteção anti-ilhamento baseado na detecção de harmônicos consiste no monitoramento da distorção harmônica total da tensão no PAC e na geração do sinal responsável por desligar o inversor caso o valor dessa distorção ultrapasse o limite pré definido. Sabe-se que a frequência oriunda dos elementos chaveados do inversor o tornam uma fonte geradora de harmônicos e que, esse conteúdo harmônico depende da impedância da rede, que geralmente possui valor muito baixo, tornando quase insignificativos os efeitos que os harmônicos oriundos do inversor produzem na tensão do PAC (BOWER; ROPP, 2002).

Quando ocorre a condição de ilhamento o inversor passa a enxergar a impedância da carga, que geralmente é mais alta que a da rede, resultando na amplificação dos harmônicos da corrente e um conteúdo harmônico de tensão elevada. Neste caso, o nível de detecção de harmônicos pode ser incrementado indicando a ocorrência de ilhamento.

A principal vantagem desse método consiste na ausência da zona de não detecção (NDZ=0), pois não há dependência de equilíbrio de potência entre a geração e o consumo no momento de desconexão da rede. Contudo há mudanças no conteúdo harmônico devido a conexão e desconexão de cargas não lineares que podem ser confundidas e interpretadas como ilhamento e, assim como no PJD, outra desvantagem associada ao DH se dá pela dificuldade em estabelecer os limites para detecção de ilhamento sem que haja desligamentos não programados (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011).

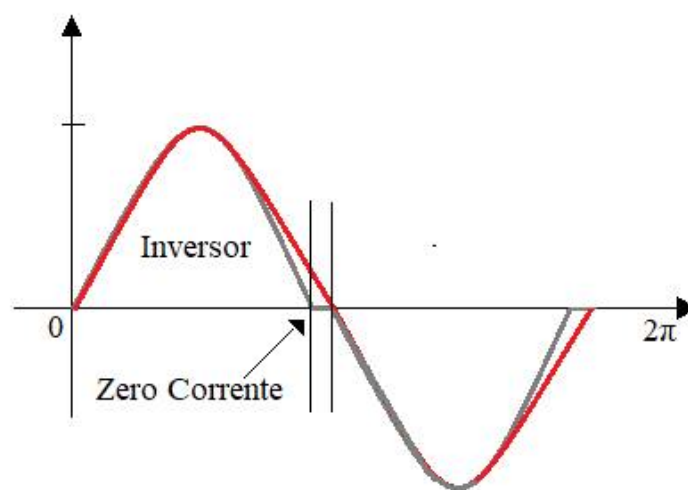
2.3.2 Métodos Ativos

Os métodos ativos de proteção anti-ilhamento surgiram com o intuito de reduzir os problemas presentes nos métodos passivos, especialmente os relacionados a NDZ. A detecção de condições de ilhamento é baseada na introdução de pequenos distúrbios que monitoram o retorno e determinam se a frequência, tensão e impedância da rede continuam normalizadas. Caso essa pequena perturbação interfira no valor dos parâmetros da tensão no PAC, o inversor será desligado (CIOBOTARU et al, 2008).

- **Método do Desvio Ativo de Frequência**

Do inglês (*Active Frequency Drift - AFD*) o método de desvio ativo de frequência consiste em introduzir distorções na forma de onda da corrente injetada na rede, agilizando ou retardando a frequência da tensão sem a presença da rede. Para que a distorção harmônica mantenha um nível menor do que o pré definido deve haver um limite no tamanho do deslocamento em frequência, onde, na aproximação mais usual, é injetada uma corrente com uma frequência um pouco superior a frequência da rede. Conforme indicado na Figura 4 os cruzamentos por zero da corrente são ampliados para que as frequências coincidam.

Figura 4 – Extensão do zero de corrente utilizado no método AFD



Fonte: Adaptada. (BOWER e ROPP, 2002).

Durante o período em que a rede encontra-se ausente, a frequência da tensão segue a frequência da corrente e há a detecção do deslocamento de frequência. Uma desvantagem desse método consiste no aumento das emissões eletromagnéticas oriundas da distorção na forma de onda de corrente e na degradação da qualidade da potência na saída do inversor, tornando esse método pouco eficiente na detecção de condições de ilhamento (BALAGUER et al., 2008).

- **Método Ativo da Medição de Impedância**

Este método consiste na detecção de mudanças na impedância de saída do inversor decorrente da desconexão da rede de distribuição que tem baixa impedância. A medição da impedância é feita através do monitoramento da derivada da tensão em relação à derivada de corrente (dv/di). Todavia a implementação desse método não é viável considerando que há a necessidade de determinar uma impedância mínima onde, abaixo desse valor, considera-se que a rede esteja sempre conectada (BALAGUER et al., 2008).

- **Mudança de Frequência do Modo Deslizante**

O método ativo denominado *Slip-Mode Frequency Shift* (SMS) utiliza uma realimentação positiva para perturbar o SFV na ausência da rede elétrica. A fase entre a tensão e a corrente na saída do inversor é uma função de frequência da tensão no PAC. O método SMS se mostra muito eficiente na presença de múltiplos inversores por possuir uma NDZ pequena.

Uma desvantagem da utilização desse método é a ocorrência de problemas devido o alto ganho da malha de realimentação, que ocasiona problemas de transitórios e de qualidade de energia ao inversor. Além disso, podem ocorrer problemas com cargas que possuem alto fator de qualidade e com frequência de ressonância próximas a frequência da rede (LOPES; HUILLI, 2006).

- ***Sandia Frequency Shift (SFS)***

O método *Sandia Frequency Shift* é uma extensão do método do desvio ativo de frequência que utiliza realimentação positiva em sua implementação. O tempo em que a corrente torna-se nula pode aumentar ou diminuir de forma proporcional ao erro na frequência especificada na rede. Assim como no método AFD, a vantagem desse método consiste na verificação da frequência no PAC, visto que na presença da rede esse é um parâmetro difícil de ser alterado (JOHN et al., 2004).

- ***Sandia Voltage Shift (SVS)***

O método ativo *Sandia Voltage Shift* (SVS), que é também uma extensão do método AFD, funciona através da detecção de alterações na amplitude da tensão no PAC. Como desvantagens, há a redução da potência do inversor, pois a tentativa de redução da tensão no PAC através da injeção de menos potência ocasiona a saída do Seguidor do Ponto de Potência Máxima (MPPT)¹ e também há uma redução da qualidade de energia (XIAOYU et al., 2007).

- ***Frequency Jump***

O método ativo do salto de frequência funciona através da inserção de zonas mortas na corrente de saída, onde a frequência dessa corrente é modificada por meio de um padrão pré determinado. Quando houver a desconexão da rede a tensão apresentará este padrão, que quanto mais sofisticado for, maior efetividade dará ao sistema para que haja a detecção do ilhamento. Considera-se este método para os casos em que há um único SFV, caso contrário, há necessidade de sincronismo (BALAGUER et al., 2008).

A análise dos métodos ativos de detecção anti-ilhamento em níveis de rede, é realizada através da inserção de uma impedância de baixo valor, geralmente um capacitor, utilizado também para a correção do fator de deslocamento, instantes após a desconexão da rede (KITAMURA et al. 1994).

¹ Dispositivo responsável por monitorar as modificações nos parâmetros de tensão e corrente para que atue de forma a corrigi-los para que possam manter os módulos fotovoltaicos operando nos parâmetros correspondentes aos valores de máxima potência, evitando perdas nas células ocasionados por fatores diversos (GALDINO et al., 2014)

2.3.2.1 Métodos Baseados em Comunicação

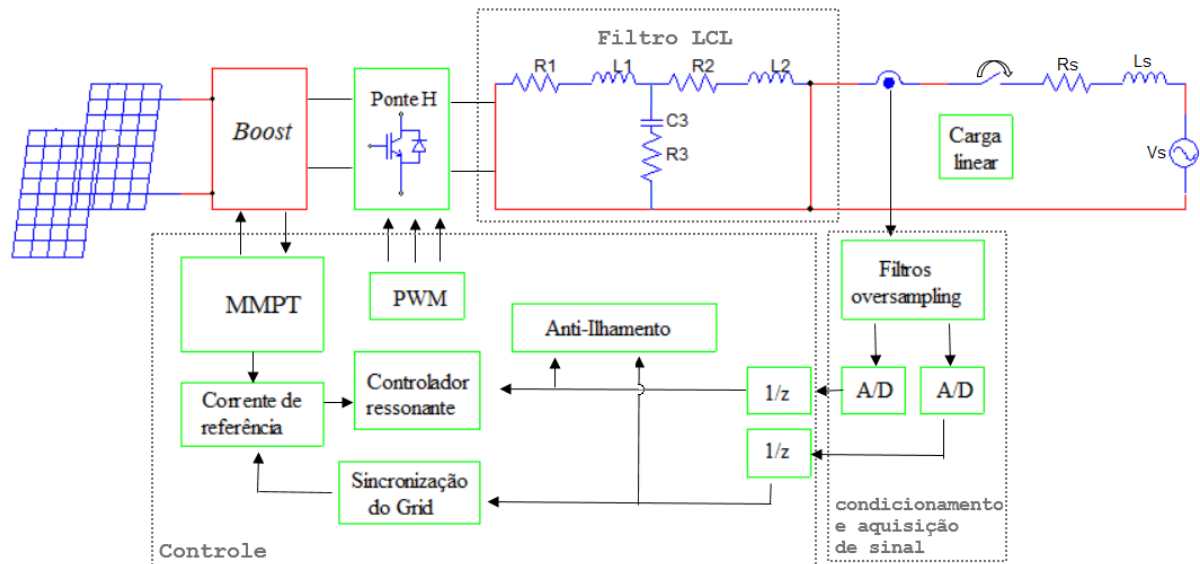
Dos métodos baseados em comunicação um dos mais utilizados é o método baseado no envio e captação de sinais de comunicação de baixa energia pela rede elétrica, o que facilita o teste de continuidade visto que a linha é usada como canal de comunicação. O método é composto pela conexão de um transmissor e receptores à rede elétrica, com o transmissor ligado ao final da linha da rede e os receptores ao final da rede do usuário. Como principais vantagens apresenta a ausência da NDZ e a preservação da qualidade de energia, além disso, esse método suporta a presença de vários SFV.

Outro método baseado em comunicação é obtido através do sinal produzido pela desconexão da rede, sem a utilização da rede de distribuição, onde uma chave seccionadora envia um sinal de desconexão para o sistema de geração através de um pequeno transmissor. O método auxilia na energização da linha e na coordenação de dispositivos de rede. Os métodos baseados em comunicação descritos anteriormente surgiram com o intuito de eliminar a NDZ, porém, por possuírem alto custo em sua implementação são mais dispendiosos economicamente (MAHAT et al. 2008).

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos simplificado do sistema fotovoltaico monofásico implementado neste trabalho.

Figura 5 – Sistema fotovoltaico monofásico implementado.

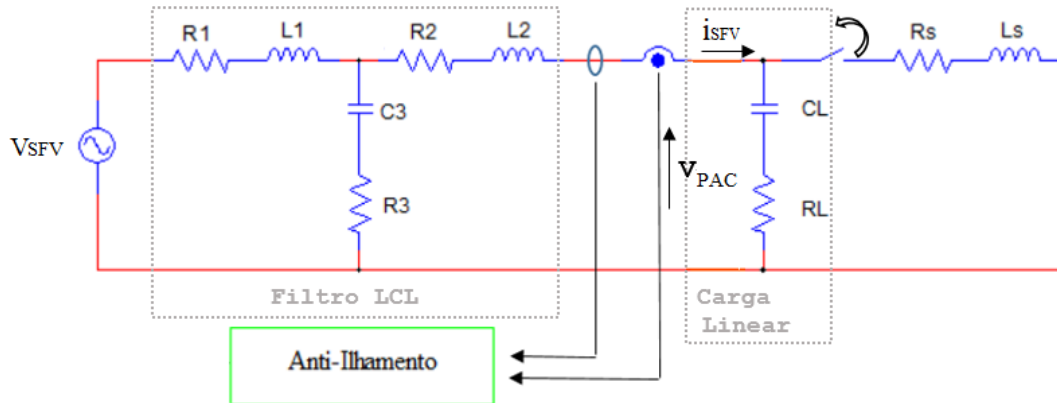


Fonte: Adaptada. (PIGAZO, 2007).

A topologia básica do SFCR proposto, é composto por um SFV, uma carga linear e a rede elétrica conectada ao PAC. Com relação ao SFV, o inversor fonte de tensão monofásica de ponte H está conectado ao PAC através de uma impedância de filtro (associação em série da resistência R_1 e o indutor L_1). O conversor *boost* é conectado ao SFV e a carga linear é a cominação em série da resistência R_L e do indutor L_L . A rede é composta por uma fonte de tensão V_s senoidal e sua impedância interna é representada pela associação em série da resistência R_s e a indutância L_s .

De acordo com o diagrama, o sistema é constituído por um conversor CC/CC do tipo *boost* no primeiro estágio, um bloco de controle, um bloco referente ao condicionamento e aquisição de sinal e um filtro LCL, utilizado para suavizar os componentes de alta frequência, decorrentes do chaveamento dos componentes do inversor. A simplificação do sistema proposto encontra-se ilustrada na Figura 6.

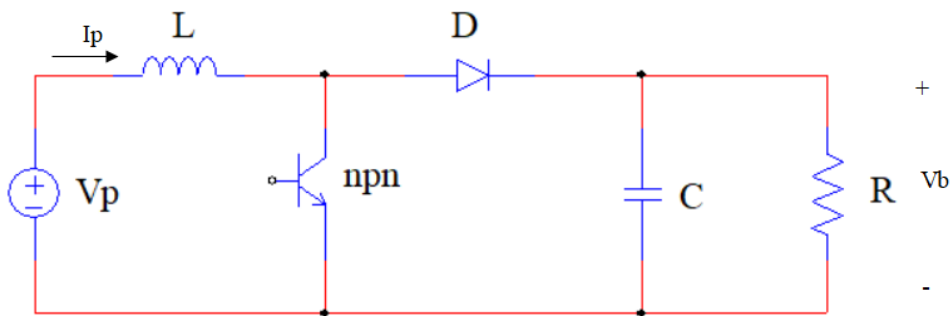
Figura 6 – Circuito simplificado para testes.



Fonte: Adaptada. (PIGAZO, 2007).

3.1 Conversor *Boost*

A operação do conversor CC/CC do tipo *boost* ou simplesmente conversor elevador está relacionada diretamente com a estratégia de modulação utilizada. Dentre as estratégias disponíveis, uma das mais utilizadas é a modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM), amplamente empregada em conversores estáticos e de fácil implementação em processadores digitais (BARBI, 2007). O circuito clássico que representa o conversor *boost* encontra-se ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Circuito clássico do conversor *boost*

Fonte: Adaptada. (KRAPF, 2017).

O conversor *boost* é caracterizado por apresentar a tensão de saída superior ou igual à tensão de entrada. Esse tipo de conversor apresenta características de corrente como entrada ocasionados pela combinação em série de um indutor de corrente L e a fonte de tensão V_p (RASHID et al. 1988).

Operando em Modo de Condução Contínua (MCC), tem-se que a corrente no indutor L flui continuamente de modo que $i_L(t) > 0$, logo, em regime permanente, a integral da tensão no

indutor L em relação ao tempo é dada pelas Equações 3.1 e 3.2,

$$\int_0^{T_s} v_L(t)dt = V_p D T_s + (V_p - V_b) D' T_s \quad (3.1)$$

$$V_p t_{on} + (V_p - V_b) t_{off} = 0 \quad (3.2)$$

onde D é a chave que determina o período de condução da corrente.

Sabendo que $T_s = T_{on} + T_{off}$, tem-se:

$$\frac{V_b}{V_p} = \frac{T_s}{T_{off}} = \frac{1}{1} - D \quad (3.3)$$

Ao desconsiderar as perdas no circuito, tem-se que a potência de entrada é igual a potência de saída ($P_p = P_b$), logo, a relação entre a corrente de entrada e a corrente de saída pode ser representada pela Equações 3.4 e 3.5, respectivamente.

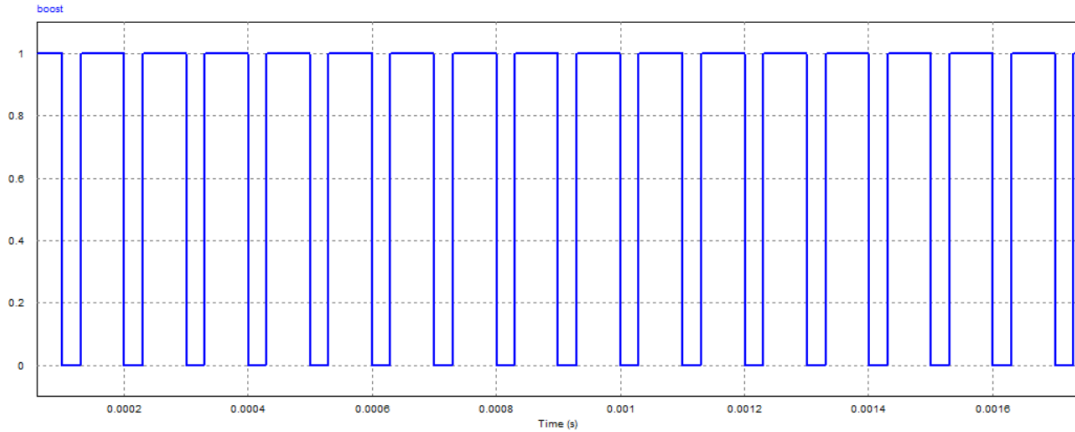
$$V_p I_p = V_b I_b \quad (3.4)$$

ou

$$\frac{I_b}{I_p} = (1 - D) \quad (3.5)$$

A forma de onda na saída do conversor *boost* encontra-se ilustrada na Figura 8.

Figura 8 – Forma de onda na saída do conversor *Boost*

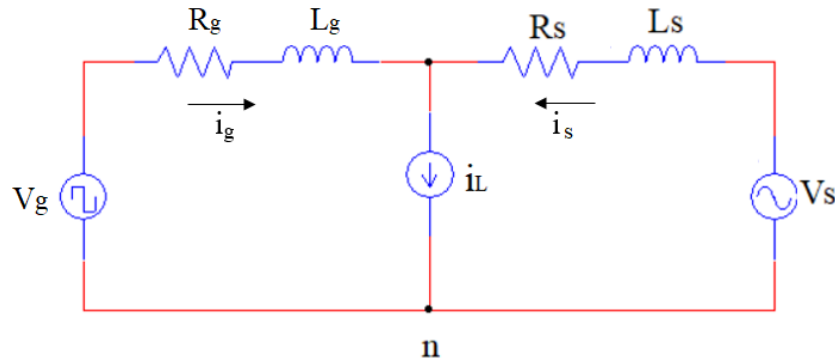


Fonte: Autoria Própria.

3.2 Modelagem do Conversor CC/CA

O conversor CC/CA, do inglês *Voltage Source Inverter* - VSI, é encarregado de converter a tensão contínua em alternada e pode ser classificado de duas maneiras: conversor meia ponte, quando a tensão no barramento CC é metade da tensão na carga, ou ponte completa, quando as tensões da carga e barramento CC são iguais. A Figura 9 ilustra o modelo equivalente do circuito para fins de análise.

Figura 9 – Circuito equivalente do sistema.



Fonte: Adaptada. (MEDEIROS, 2014).

Na Figura 9, V_g representa a tensão na saída do conversor, V_s representa a tensão na rede, R_g e L_g simbolizam a impedância do filtro conectado à saída do conversor, R_s e L_s representam a impedância da rede e i_L é a corrente na carga.

Utilizando a lei de Kirchhoff das tensões para análise das malhas, obtém-se a seguinte relação:

$$V_g - V_s - V_L = -(R_g + R_s)i_s - (L_g + L_s)\frac{di_s}{dt} \quad (3.6)$$

A tensão na carga V_L é dada por:

$$V_L = R_g i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (3.7)$$

A estratégia de controle proposta realizará a compensação das perturbações representadas por V_f e V_s , cujas dinâmicas são impostas pela carga ou pela rede elétrica, de modo que a Equação 3.6 pode ser expressa por:

$$V'_g = -R_t i_s - L_t \frac{di_s}{dt} \quad (3.8)$$

Sendo: $R_t = R_g + R_s$ e $L_t = L_g + L_s$

A função de transferência referente à Equação 3.8 é expressa por:

$$\frac{I_s(S)}{V'_g(S)} = \frac{1/L_t}{s + R_t/L_t} = \frac{b_s}{s + a_s} \quad (3.9)$$

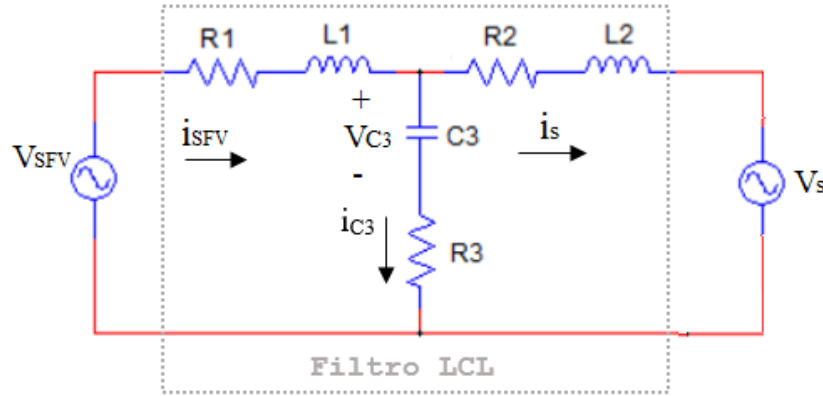
Os parâmetros a_s e b_s dependem do comportamento não linear da carga, sendo $a_s = R_t/L_t$ e $b_s = -1/L_t$.

3.3 Filtro LCL

O objetivo do filtro LCL conectado à saída do inversor é o de amenizar o conteúdo harmônico de alta frequência oriundo da modulação do VSI. Essa redução de ruídos permite a

obtenção de uma tensão senoidal no capacitor de filtro e realiza a conexão da rede elétrica em aplicações não isoladas. O circuito do filtro LCL utilizado neste trabalho encontra-se ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Circuito do filtro LCL



Fonte: Autoria Própria.

Sendo V_{SFV} a tensão do sistema, L_1 e L_2 C_3 representam as indutâncias do filtro, C_3 corresponde a capacitância do filtro, os resistores R_1 , R_2 e R_3 simbolizam as perdas do circuito não ideal e V_s é a tensão da rede.

As correntes e tensões nos indutores L_1 e L_2 e no capacitor C_3 estão representadas pelas Equações (3.10), (3.11) e (3.12), respectivamente.

$$i_{C_3} = i_{L_1} - i_{L_2} = C_3 \frac{dV_{SFV}(t)}{dt} \quad (3.10)$$

$$d(t)V_{SFV} - L_1 \frac{di_{L_1}(t)}{dt} - R_{L_1} i_{L_1}(t) - V_{C_3}(t) = 0 \quad (3.11)$$

$$V_{C_3} - L_2 \frac{di_{L_2}(t)}{dt} - R_{L_2} i_{L_2}(t) - V_s(t) = 0 \quad (3.12)$$

3.4 Barramento CC

A tensão do capacitor do barramento CC é obtida pela diferença entre a corrente do sistema I_{SFV} e a corrente de entrada do conversor CC/CA I_{cc} . A tensão dos capacitores do barramento pode ser controlada através da corrente do eixo direto, dada por I_{sd}^e , que é responsável por estabelecer as amplitudes das correntes na saída do inversor, que serão injetadas na rede após o processo de filtragem, ou seja, o controle da tensão do barramento CC é feito através da corrente de saída do conversor com base na energia ativa do sistema.

A função de transferência referente ao barramento CC do SFCR proposto é expressa por:

$$\frac{V_C(S)}{I_C(S)} = \frac{1}{sC} \quad (3.13)$$

Sendo C o capacitor do barramento CC.

Afim de reduzir as oscilações presentes na medição de tensão do barramento CC, é utilizado um filtro passa-baixa¹ de primeira ordem, cuja função de transferência é expressa por:

$$G_v(S) = \frac{1}{1 + s\tau_v} \quad (3.14)$$

Sendo τ_v a constante de tempo do filtro passa baixa. Assim, o modelo dinâmico para o barramento CC resulta em:

$$\frac{V_c^e(S)}{I_{sd}^e(S)} = \frac{1}{sC(1 + s\tau_v)} \quad (3.15)$$

A Equação (3.15) comporta-se como um sistema dinâmico de segunda ordem e deve ser levada em consideração na análise do projeto do controlador do barramento CC, visto que sua tensão apresenta componente harmônica de segunda ordem.

Para o controle da tensão do barramento CC é utilizado um controlador Proporcional Integrativo (PI), cuja função de transferência é expressa por:

$$G_{PI}(S) = \frac{K(1 + s\tau_i)}{s\tau_i} \quad (3.16)$$

A Equação (3.17) mostra a função de transferência em malha aberta resultante para o controle do barramento CC via PI.

$$G_{or}(S) = \frac{K(1 + s\tau_i)}{C\tau_i s^2(1 + s\tau_v)} \quad (3.17)$$

O método *Symmetrical Optimum Tuning Optimization* (SOTO), baseia-se na ideia de um controlador em malha aberta com resposta em frequência do ponto de operação da planta, com o mais próximo possível de 0 dB para as componentes de baixa frequência (MEDEIROS, 2014). A função de transferência para um controlador com dois graus de liberdade e ajuste através do método *SOTO*, é dada por:

$$G_{so}(S) = \frac{w_o^2(2s + w_o)}{s^2(s + 2w_o)} \quad (3.18)$$

¹ O filtro passa-baixa é aquele em que somente as componentes com frequências abaixo de um certo valor da frequência de corte são coletadas (NETO, 2003).

Sendo w_o a resposta em frequência da função (3.18). Para que a função de transferência da Equação (3.17) seja igual a função da Equação (3.18), é necessário que:

$$w_o = \frac{1}{2\tau_v} \quad (3.19)$$

sendo o ganho do controlador dado por:

$$K = \frac{C}{2\tau_v} \quad (3.20)$$

com isso, tem-se que $\tau_i = 4\tau_v$

3.5 Controlador de Corrente

De modo convencional, a corrente injetada na rede é controlada com base no referencial de corrente, que garante sua imposição a partir da tensão gerada no polo do inversor, V_g . Porém, esse sistema só permite a injeção de potência ativa na frequência fundamental, e por isso, optou-se por implementar uma estratégia de controle baseada no controle indireto, onde a corrente da rede, I_s , é regulada de forma indireta a partir da imposição da tensão de polo do inversor.

A combinação dessa estratégia juntamente com a utilização de um controlador não convencional, possibilita a regulação das correntes do PAC, de modo que estas estejam em fase com suas respectivas tensões, além disso, facilita a compensação dos harmônicos e a correção do fator de potência do PAC.

3.5.1 Controlador de Dupla Sequência

O Controlador de Dupla Sequência (DSC), utiliza o princípio do modelo interno e é composto por dois controladores. Genericamente, foi desenvolvido inicialmente por Jacobiana et. al (2001) e foi designado para a implementação das malhas de corrente em sistemas trifásicos e monofásicos.

De forma genérica, o modelo do DSC no espaço de estados é dado por:

$$\frac{dx_{dqi}^2}{dt} = 2k_{ii}\epsilon_{idq}^2 + x_{dqi}^s \quad (3.21)$$

$$\frac{dx_{dqi}^{s'}}{dt} = -\omega_s^2 x_{dqi}^s \quad (3.22)$$

$$v_{fdq}^{s*} = x_{dqi}^s + 2k_{PI}\epsilon_{idq}^s \quad (3.23)$$

sendo k_{PI} e k_{ii} os ganhos do controlador e ω_s é a frequência fundamental do SEP. A função de transferência do controlador com base no referencial estacionário é dada por:

$$G_c(s) = \frac{p_2 s^2 + p_1 s + p_0}{s^2 + \omega_s^2} \quad (3.24)$$

sendo $p_2 = 2k_{PI}$, $p_1 = 2k_{ii}$ e $p_0 = 2k_{PI}\omega_s^2$ os ganhos do controlador.

3.5.2 Controle de Corrente

O controlador de corrente dado pela função de transferência da Equação (3.24), pode ser obtido com base na Equação (3.9) através do método de cancelamento de polos e zeros. Associando o parâmetro a_s aos ganhos do controlador de corrente, k_{PI} e k_{ii} , tem-se:

$$a_s = \frac{k_{PI}}{k_{ii}} \quad (3.25)$$

Considerando a banda-passante do controlador como sendo $\omega_c = b_s k_{PI}$, os ganhos do controlador em função dos parâmetros a_s e b_s podem ser dados por:

$$k_{PI} = \frac{\omega_c}{b_s} \quad (3.26)$$

$$k_{ii} = \frac{a_s \omega_c}{b_s} \quad (3.27)$$

3.6 Detecção de Ilhamento Baseada em *Wavelets*

A transformada *wavelet* é um método derivado da transformada de Haar, formulada em 1910, utilizada para o processo e descrição de imagens e sinais através de uma combinação linear de funções elementares. Segundo Vidakovic e Mueller (1995) as transformadas *wavelet* servem como base para representar outras funções tendo um índice de eficiência maior frente a sinais não periódicos, por exemplo. A utilização das transformadas *wavelet* no processamento de sinais resulta na obtenção de parâmetros que podem ser utilizados em aplicações de classificação de padrões.

O conceito de Análise Multiresolucional afirma que um sinal discreto pode ser decomposto e analisado em diversos coeficientes *wavelet* e escala distintos através do processo de filtragem digital (NETO, 2016). Com base nesse conceito foi criado o algoritmo piramidal, proposto por Mallat (1989), que possibilita o cálculo da TWD que tem como características um alto índice de confiabilidade, rapidez e simplicidade na implementação.

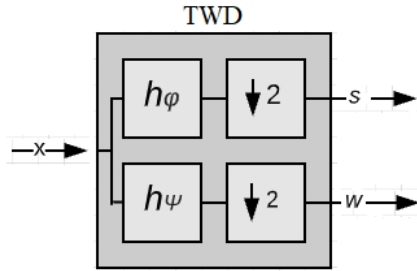
$$s_j(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_\phi(n-2k)s_{j-1}(n) \quad (3.28)$$

$$w_j(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_\psi(n-2k)s_{j-1}(n) \quad (3.29)$$

As Equações (3.28) e (3.29) representam processos de filtragem digital onde o primeiro nível de decomposição dos coeficientes escala, que atua como um filtro passa baixas e *wavelet*, que atua como um filtro passa altas, são representados por $s(k)$ e $w(k)$, respectivamente, onde s_0 simboliza o sinal a ser decomposto e h_ϕ representa as componentes de baixa e h_ψ as componentes de alta frequência no nível de decomposição j , com $j \geq 1$.

A Figura 11 simboliza o processo de divisão do sinal $s_0(x)$ em um nível de decomposição TWD para uma frequência de amostragem igual a f_s e um número de amostras iguais a k_t .

Figura 11 – Diagrama referente ao primeiro nível de decomposição da TWD.



Fonte: Adaptada. (NETO, 2016)

Na Figura 11 o sinal original $s_0(x)$ será decomposto em um número de coeficientes escala e *wavelet* referente a metade do número de amostras iniciais do sinal $s_0(x)$, ou seja, para um número de amostras iniciais igual a $k(t)$ o número de amostragens resultantes será de $k(t)/2$, resultado decorrente do processo de subamostragens por dois existente na TWD.

3.6.1 Filtros escala e *wavelet*

O número de coeficientes dos filtros *wavelet* e escala variam com a *wavelet* mãe da família escolhida (PAIVA, 2015). Para investigar distúrbios em sistemas elétricos de potência, uma das mais utilizadas é a *wavelet* mãe da família Daubechies, também chamada de db (4), cujos filhos são os filtros *wavelet* e escala que resultam em quatro coeficientes, sendo ideais para aplicações em tempo real por proporcionarem um rápido resultado (NETO, 2016). Para a *wavelet* mãe da família db (4), os filtros escala e *wavelet* podem ser obtidos a partir das seguintes relações.

$$h\phi(0) = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h\phi(1) = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h\phi(2) = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h\phi(3) = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad (3.30)$$

Os coeficientes *wavelet* do filtro, para a *wavelet* mãe db (4), são dados por:

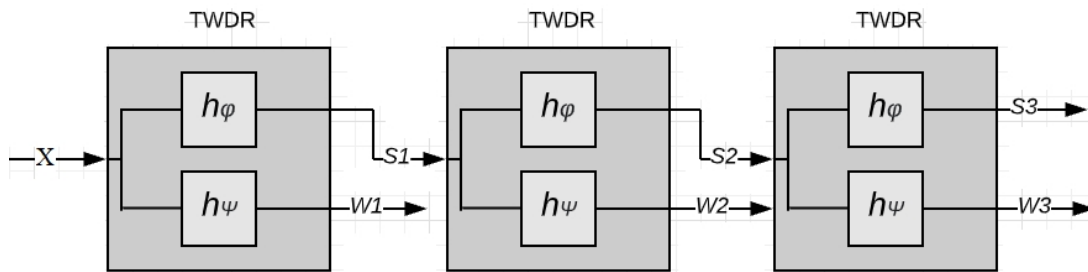
$$h\psi(0) = h\phi(3), h\psi(1) = -h\phi(2), h\psi(2) = h\phi(1), h\psi(3) = -h\phi(0) \quad (3.31)$$

3.6.2 Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR)

A Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR) assim como a TWD permite a decomposição e análise em tempo e frequência de um dado sinal de entrada em coeficientes escala e *wavelet* com suas respectivas informações de baixas (filtro escala h_ϕ) e altas frequências (filtro *wavelet* h_ψ) (MEDEIROS, 2017). De acordo com Costa (2014), para análises em tempo real, a TWDR fornece uma maior precisão e rapidez na detecção de distúrbios ou quaisquer anormalidades em um sistema pois, ao contrário da TWD, a TWDR não possui processos de subamostragem por dois, o que a torna uma transformada invariante no tempo.

A Figura 12 ilustra o processo de decomposição em três níveis de um sinal de entrada x em seus respectivos coeficientes escala e *wavelet*.

Figura 12 – Diagrama referente aos três primeiros níveis de decomposição da TWDR.



Fonte: Adaptada. (NETO, 2016)

Os coeficientes escala e *wavelet* foram obtidos até o terceiro nível de decomposição onde, para cada nível, os coeficientes escala (S_1, S_2 e S_3) servem como entrada para o próximo estágio de filtragem escala e *wavelet*, conforme ilustrado na Figura 12.

De acordo com Percival e Walden (2000), os coeficientes escala e *wavelet* podem ser obtidos de forma análoga a TWD, conforme as Equações abaixo.

$$s_j(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_\phi(n-k) s_{j-1}(n) \quad (3.32)$$

$$w_j(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_\psi(n-k) s_{j-1}(n) \quad (3.33)$$

Nas Equações (3.32) e (3.33) os filtros passa baixas (escala) e passa altas (*wavelet*) são representados por h_ϕ e h_ψ , respectivamente, onde os coeficientes escala e *wavelet* são obtidos através da convolução dos fatores $s_{j-1}(k)$ para um nível de decomposição equivalente a $j-1$ juntamente com os filtros h_ϕ e h_ψ .

3.6.3 Energia dos Coeficientes Escala e *Wavelet* da TWDR

O Teorema de Parseval para a transformada de Fourier declara que a potência média de um sinal periódico é igual a soma das potências médias das suas componentes (LIRA, 2004). Para

as transformadas *wavelets* o teorema afirma que a energia espectral de um sinal $x(k)$ resulta na soma de seus coeficientes escala e *wavelet* nos níveis de resolução J e $1 \leq j \leq J$, respectivamente.

$$\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2 = \sum_{k=1}^{k_t} |sj(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{k_t} |wj(k)|^2, \quad (3.34)$$

Sendo:

- $\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2$ simboliza a energia do sinal original $x(k)$;
- $\sum_{k=1}^{k_t} |sj(k)|^2$ simboliza a energia dos coeficientes escala do nível de decomposição j ;
- $\sum_{k=1}^{k_t} |wj(k)|^2$ simboliza a energia dos coeficientes *wavelet* do nível de decomposição j .

3.6.4 Cálculo Recursivo para as Energias dos Coeficientes Escala e *Wavelet* em Tempo Real

Para implementações em tempo real, as energias dos coeficientes escala ($\ddot{\epsilon}$) e *wavelet* ($\dot{\epsilon}$), para o primeiro nível de decomposição da TWDR podem ser realizadas após a aquisição de uma amostra dos coeficientes escala e *wavelet*, dados por:

$$\ddot{\epsilon}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k s^2(k) \quad (3.35)$$

$$\dot{\epsilon} = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k w^2(k) \quad (3.36)$$

sendo $k > \Delta k$ e $\ddot{\epsilon}$ e $\dot{\epsilon}$ são calculados amostra à amostra (NETO, 2016).

Em tempo real as energias dos coeficientes escala e *wavelet* podem ser calculadas de maneira recursiva, como mostrado nas Equações (3.37) e (3.38).

$$\ddot{\epsilon}(k) = \ddot{\epsilon}(k-1) - [s(k-\Delta k)]^2 + [s(k)]^2 \quad (3.37)$$

$$\dot{\epsilon}(k) = \dot{\epsilon}(k-1) - [w(k-\Delta k)]^2 + [w(k)]^2 \quad (3.38)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados de simulação são bastante importantes para verificar o comportamento do sistema e para servir como base para implementações experimentais. Com base nisso, foi desenvolvido um estudo de simulação de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica por meio de conversores de potência. O sistema fotovoltaico monofásico fornece 1 kW de potência com tensão de pico de 180 V e as principais especificações do sistema são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do sistema simulado.

Rede	$R_g = 0,26 \, \Omega$	$L_g = 0,2 \, mH$	
Linha	$R_L = 0,065 \, \Omega$	$L_L = 0,2 \, mH$	
Carga linear e resistência de falta	$R_l = 20 \, \Omega$	$L_l = 60 \, mH$	$R_{sc} = 2,5 \, \Omega$

Uma falta foi inserida ao sistema por meio de uma chave bidirecional controlada por um contador e a detecção das condições de ilhamento é baseada na análise, realizada em tempo real, das energias dos coeficientes escala e *wavelet* utilizando a *wavelet* mãe db (4). De acordo com a norma IEEE 1547-2018, os parâmetros de proteção de subtensão/sobretensão e subfrequência/sobrefrequência encontram-se representados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros de desconexão de acordo com as variações de tensão.

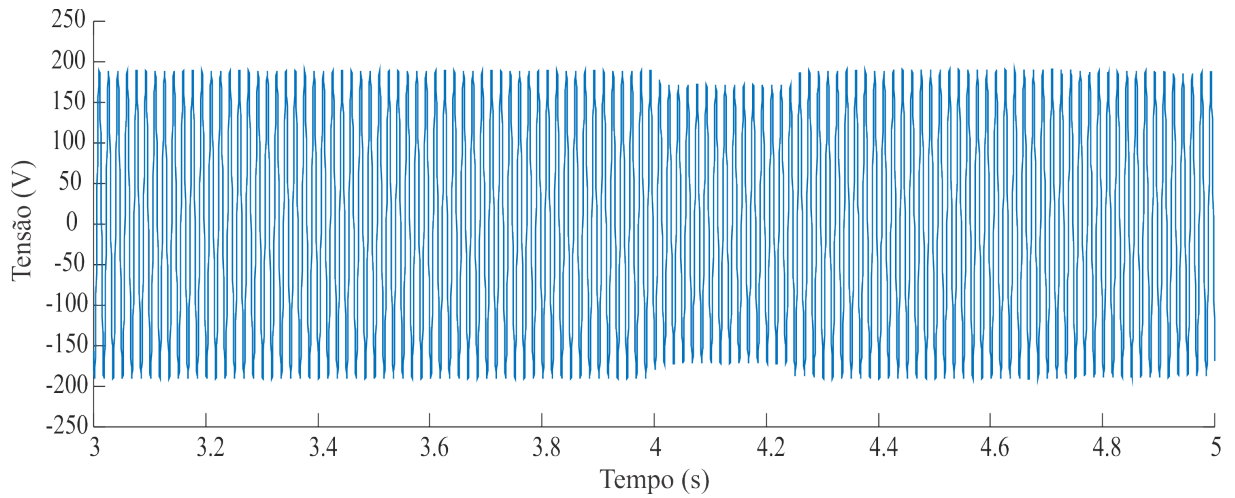
Faixa de tensão (%)	Faixa de energia dos coeficientes escala (%)	Tempo (s)
$V_{rms} < 50$	$\ddot{\epsilon}_v < 25$	0,16
$50 \leq V_{rms} < 88$	$50 \leq \ddot{\epsilon}_v < 77$	2,00
$V_{rms} \geq 120$	$\ddot{\epsilon}_v \geq 144$	0,16

Tabela 3 – Parâmetros de desconexão de acordo com as variações de frequência.

Potência do sistema (kW)	Faixa de frequência (Hz)	Tempo (s)
>30	$f > 60,5$	0,16
	$f < 59,3$	0,16

Na Figura 13 é apresentada a tensão no PAC durante o intervalo da ocorrência da falta. De acordo com a Figura 13, após início da falta houve uma redução da amplitude da tensão, retornando ao seu valor de pico ao término da falta.

Figura 13 – Tensão no PAC



Nas Figuras 14 e 15 são ilustrados o processo de decomposição, no primeiro nível de resolução, de um sinal de tensão nos coeficientes escala e *wavelet*, com frequência de amostragem de 10 kHz e frequência fundamental de 60 Hz, utilizando a *wavelet* mãe db(4). Os coeficientes escala correspondem a saída de um filtro passa-baixa, contendo as informações de baixa frequência do sinal de tensão, enquanto os coeficientes *wavelet* correspondem a saída de um filtro passa-alta, sendo sensíveis às componentes de alta frequência do sinal e indicam o período transitório da falta.

Figura 14 – Coeficientes escala

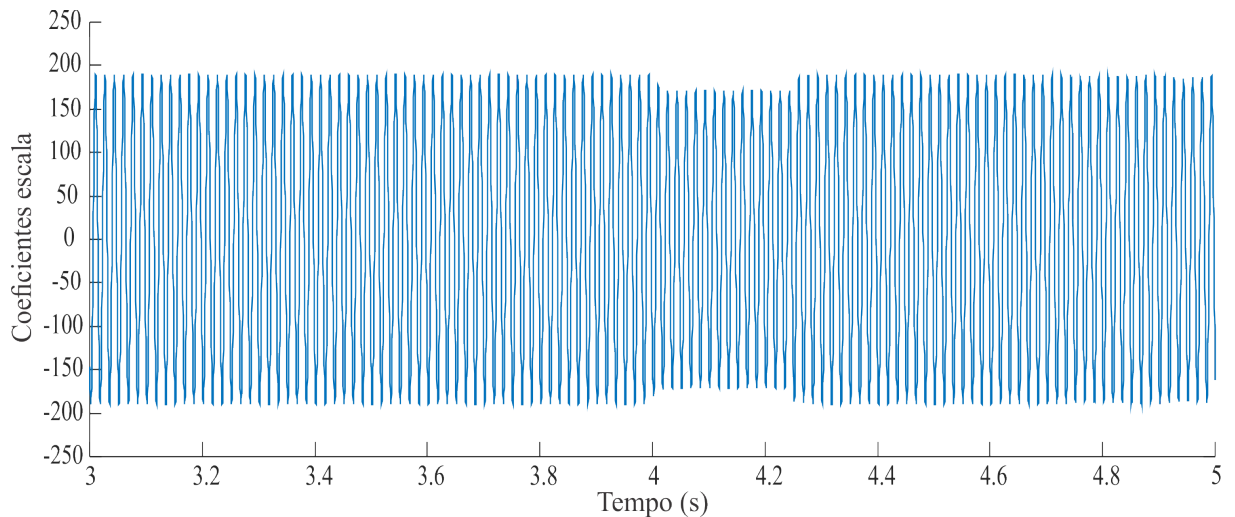
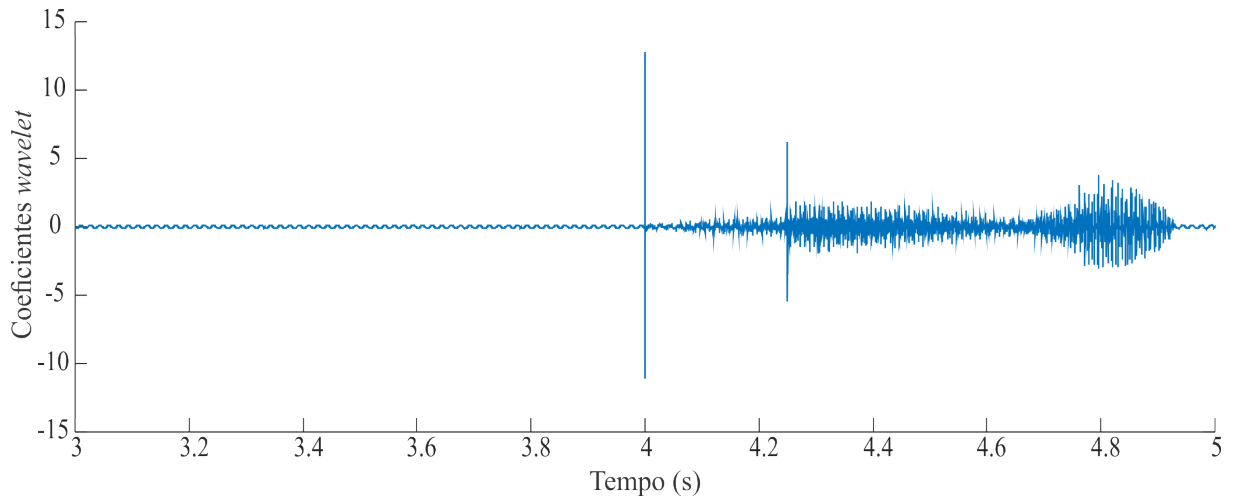


Figura 15 – Coeficientes *wavelet*

As Figuras 16 e 17 ilustram as energias dos coeficientes escala e *wavelet* em tempo real, em que a energia normalizada de um ciclo dos coeficientes escala apresenta uma forma de onda semelhante ao valor em sua representação RMS e apresenta um afundamento na amplitude da tensão original. De acordo com a Figura 16, a energia dos coeficientes escala podem fornecer a caracterização do afundamento na tensão tensão do PAC do sistema, tais como amplitude e duração. Por outro lado, a energia dos coeficientes *wavelet* fornece uma informação precisa sobre o ponto de início e final do afundamento da tensão do PAC.

Figura 16 – Energia dos Coeficientes escala

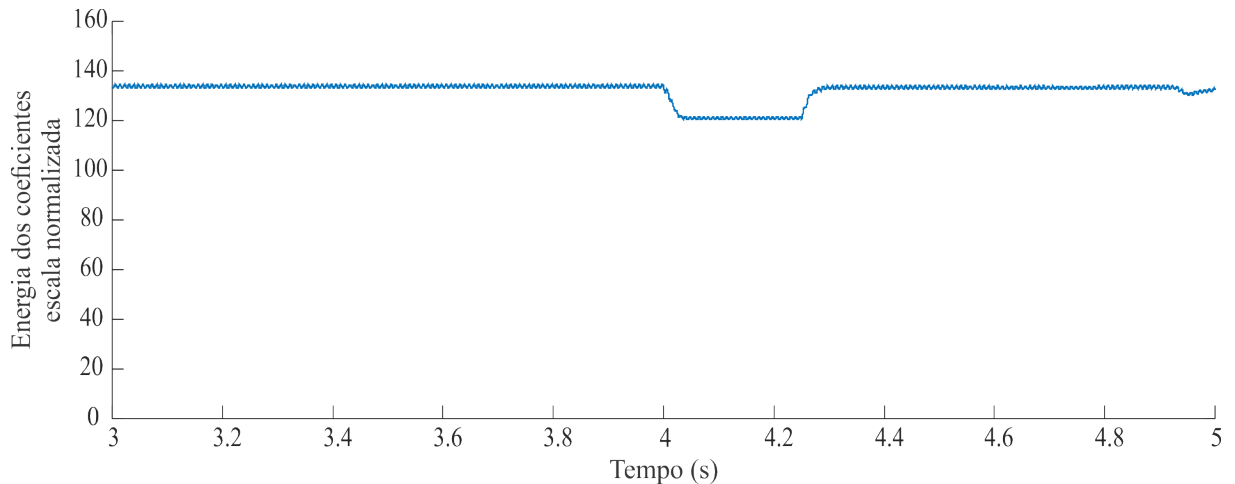
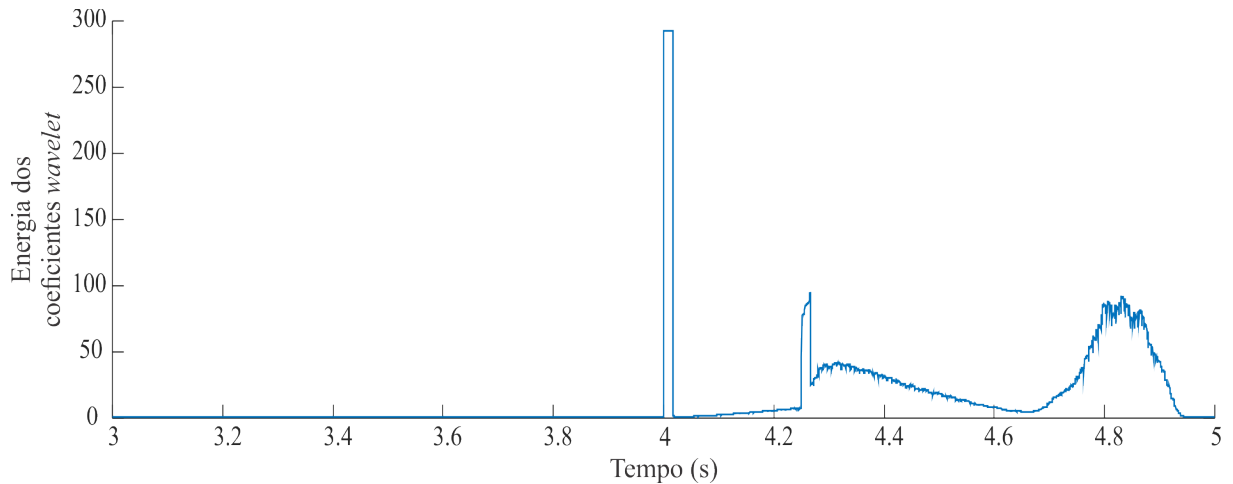
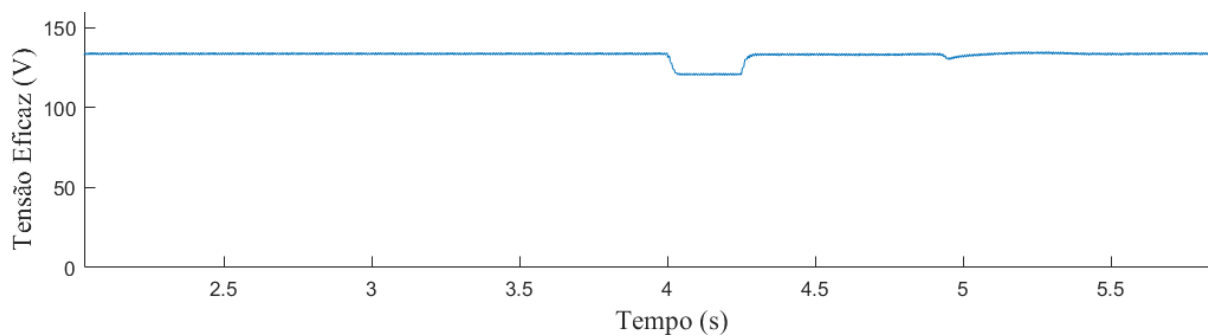


Figura 17 – Energia dos Coeficientes *wavelet*

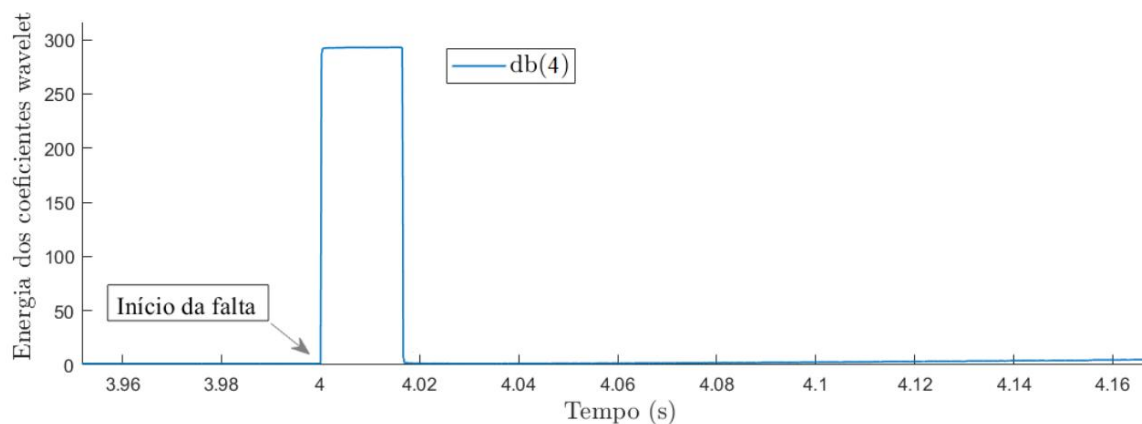
A Figura 18 apresenta a forma de onda da tensão no PAC em seu valor eficaz. Através da extração do valor RMS do sinal, percebe-se que a forma de onda é semelhante à forma de onda obtida com a decomposição em tempo real do sinal nos coeficientes escala (Figura 16) e que durante o período transitório houve um afundamento na amplitude da tensão.

Apesar de os coeficientes escala da db (4) e da tensão RMS apresentarem o mesmo desempenho na análise de queda ou aumento de tensão na ocorrência de falta, os coeficientes escala exigem um esforço computacional menor em relação ao valor RMS, podendo ser obtidos de forma mais rápida através do uso de DSP (BARRETO, 2014).

Figura 18 – Tensão eficaz no PAC

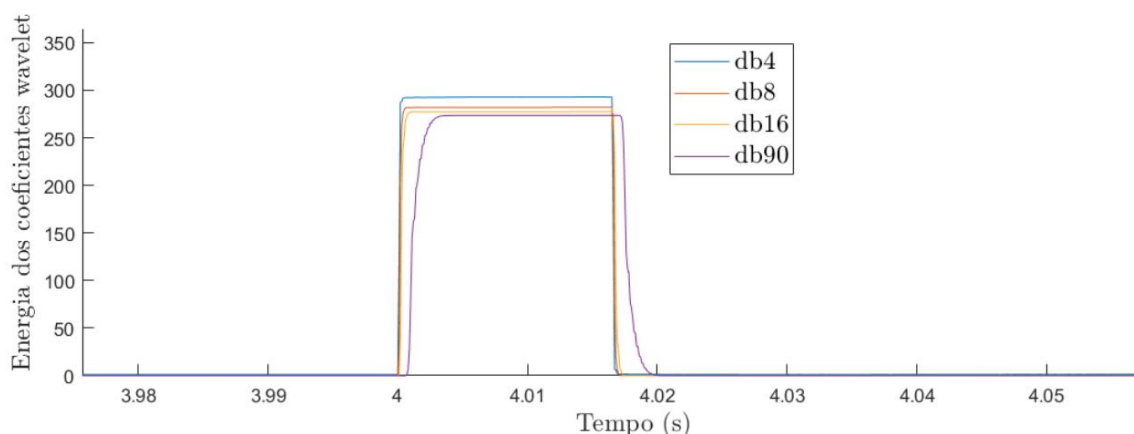


Tanto a energia normalizada dos coeficientes escala quanto a tensão RMS apresentam uma imprecisão na detecção do momento inicial da falta e no início do ilhamento, porém, a energia dos coeficientes *wavelet* da db (4) fornecem o instante exato do início e do término do distúrbio em tempo real, bem como o momento exato do início da condição de ilhamento, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Energia dos coeficientes *wavelet*

Ao término da análise, o sistema mostrou-se ilhado devido ao afundamento na amplitude da tensão e tempo de intervalo da falta e de acordo a norma 1547-2018, o sistema deve ser desconectado da rede.

A análise baseada em transformada *wavelet* é altamente dependente do tipo de *wavelet* mãe escolhida e dependendo do tipo de aplicação, os resultados podem ser completamente alterados com o tipo selecionado. A Figura 20 ilustra a decomposição em tempo real dos coeficientes *wavelet* com as *wavelets* db (4), db (8), db (16) e db (90) afim de ilustrar a influência da *wavelet* mãe.

Figura 20 – Energia dos coeficientes *wavelet*

É possível perceber que o tempo de detecção da falta varia de acordo com a *wavelet* mãe escolhida, por exemplo, a db (90) apresenta um atraso na detecção inicial e no término da falta quando comparada a db (4), além disso, há uma redução significativa na amplitude desses coeficientes que podem comprometer a detecção de ilhamento e danificar o sistema caso não seja solicitado o desligamento. Já a *wavelet* mãe db (4) apresenta informações precisas em tempo de detecção e término da falta e em amplitude da energia dos coeficientes.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a aplicabilidade da transformada *wavelet* na detecção de condições deilhamento através da implementação de um algoritmo baseado no método passivo de proteção de sub/sobretensão e sub/sobrefrequência.

Ao final da análise foi constatada a eficiência da transformada *wavelet* discreta redundante na detecção de distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica. A energia dos coeficientes escala podem ser utilizados para determinar a necessidade de desconexão do sistema em caso de ilhamento e a energia dos coeficientes *wavelet* podem detectar os instantes inicial e final das faltas.

A análise comparativa entre o método do valor RMS e a energia dos coeficientes escala apresentaram desempenho similar na detecção das variações de tensão, com a ressalva de que esta última demanda de um menor esforço computacional.

O efeito da *wavelet* mãe escolhida também foi avaliado, onde as *wavelets* longas forneceram atraso na detecção inicial e final das faltas, além de redução da amplitude da energia dos coeficientes *wavelet*, enquanto a *wavelet* da família Daubechies com quatro coeficientes não apresentou atraso de tempo.

O estudo de condições de ilhamento proposto nesse trabalho teve o objetivo de analisar o desempenho dos métodos de proteção baseados na transformada *wavelet* e nas energias dos coeficientes escala e *wavelet* para detecção de níveis anormais de tensão e frequência. Com a análise dos resultados foi concluído que as energias dos coeficientes escala e *wavelet* são uma boa ferramenta para detecção rápida das condições de ilhamento em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade do trabalho, são destacados alguns pontos que podem servir de base para pesquisas que contribuam de forma significativa com a temática abordada, tais como:

- Estudo de métodos de proteção anti-ilhamento em sistemas trifásicos;
- Análise para múltiplos inversores conectados de forma simultânea;
- Métodos de proteção anti-ilhamento baseados em proteção de sub/sobrecorrente.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST, qualidade da energia elétrica, módulo 8. 2014

BALAGUER, I. J.; KIM, H.; PENG, F. Z.; ORTIZ, E. I. "**Survey of photovoltaic power island detection methods**". In: INDUSTRIAL ELECTRONICS CONFERENCE - IECON, 34., 2008, Orlando. Proceedings... Orlando: IEEE, 2008. p. 2247-2252.

BARRETO, Rodrigo Lopes Barreto. **Contribuições ao Método de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPGEEC, Natal – RN, 2014.

BENEDITO, Ricardo da Silva Benedito. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP/PPGE, São Paulo – SP, 2009.

BOWER, W; ROPP, M. "**Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility Interactive Inverters in Photovoltaic Systems**". Sandia Report SAND 2002-3591.

CÂMARA, Carlos Fernando Câmara. "**Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica**". Tese de Mestrado. Universidade Federal de Lavras – UFL/PPGLSFAE, Lavras – MG, 2011.

CAMPANHOL, Leonardo Bruno Garcia Campanhol. "**Sistema Fotovoltaico Trifásico de Único Estágio Conectado a Sistemas de Geração Distribuída Operando como Condicionador de Qualidade de Energia Unificado Usando uma Estratégia Dual de Compensação Ativa de Potência**". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, USP/PPGEE, São Carlos – S, 2017.

CARVALHO, Domingos Miguel Sequeira Carvalho. "**Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica**". Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP/ PPGEEC, Porto, 2011.

CIOBOTARU, M.; AGELIDIS, V.; TEODORESCU, R. "**Accurate and less-disturbing active anti-island method based on PLL for grid-connected PV inverters**". In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE - PESC, 39., 2008, Rhodes. Proceedings... Rhodes: IEEE, 2008. p. 4569-4576.

COELHO, Francisco Carlos Rodrigues Coelho. "**Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica via Metaheurística Empírica Discreta**". Tese de Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora-UFJF/PPGEE, Juiz de Fora - MG.

EPE - **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano Base 2019. Rio de Janeiro, 2020. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. [<http://www.epe.gov.br>].

FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. "**MPPT techniques for PV systems: Energetic and cost comparison**". In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - PESGM, 9., 2008, Pittsburgh. Proceedings... Pittsburgh: IEEE, 2008. p. 1-6.

FUZATO, Guilherme Henrique Favaro Fuzato. "**Análise de um Conversor Boost Interleaved com Multiplicador de Tensão para Sistemas de Geração Distribuída que Utilizam Células a Combustível como Fonte Primária**". Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP/PPGEE, São Carlos – SP, 2015.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. "Energias Renováveis: Um Futuro Sustentável". REVISTA USP, São Paulo, n.72, p. 6-15, dezembro/fevereiro 2006-2007.

GUERRA, Fabiana; SANTIAGO, Gregory; VALE, Marcelo. "**Microgeração Solar Fotovoltaica Conectada À Rede: Análise Da Qualidade Da Energia**". VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

H. Cha and T. Vu. "**Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter**". 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, 2010.

IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for "**Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**", in IEEE Std 1547.2-2008 , vol., no., pp.1-217, 15 April 2009.

JUNIOR, Jair Urbanetz Junior. "**Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes De Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise Dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade**". Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/PPGEC, Florianópolis-SC 2010.

J. M. Sosa, G. Escobar, P. R. Martínez-Rodríguez, G. Vázquez, M. A. Juárez and M. Diosdado, "**Comparative evaluation of L and LCL filters in transformerless grid tied converters for active power injection**". 2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, 2014.

KITAMURA, A.; OKAMOTO, M.; YAMAMOTO, F.; NAKAJI, K.; MATSUDA, H.; HOTTA, K. **"Islanding phenomenon elimination study at rokko test center"**. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE - PVSC, 24., 1994, Waikoloa. Proceedings... Waikoloa: IEEE, 1994. p. 1531-1534.

KRAPF, Germano de Souza Krapf. **"Conversor Boost para Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes Empregado em Geração Eólica"**. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/CT, Santa Maria-RS, 2017.

LOPES, L. A. C.; HUILLI, S. **"Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods"**. IEEE Transactions on Energy Conversion, New York, v. 21, n. 1, p. 171-180, 2006.

LOPES, Ricardo Aldabo. **"Energia Solar Para Produção de Eletricidade"**. São Paulo: Artliber, 2012.

MEDEIROS, Rodrigo Prado de Medeiros. **"Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada Wavelet com Efeitos de Borda"**. Tese de Doutorado. Universidade federal do Rio Grande do Norte - UFRN/PPGEC, Natal - RN.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp Nascimento. **"Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas"**. 2017. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/32259>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

NETO, Aimé Fleury De Carvalho Pinto Neto. **"Avaliação do Impacto de Sistemas Fotovoltáicos Conectados À Rede de Distribuição de Baixa Tensão"**. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP/ PPGE, São Paulo – SP, 2016.

NETO, Cecílio Martins de Sousa Neto. **"Estabilizador de Sistema de Potência Baseada na Transformada Wavelet Para Sistemas de Geração"**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN/PPGEC, Natal - RN, 2016.

NETO, Celso de Carvalho Noronha Neto. **"INTEGRAÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO FILTRO DIGITAL DE BUTTERWORTH MEDIANTE ALGORITMO DE QUADRATURA NUMÉRICA DE ORDEM ELEVADA"**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - USP/PPGEE, São Carlos - SP, 2003.

OLIVEIRA, André Barros de Mello Oliveira. **"Diagnóstico De Falhas De Curto-Circuito Nos**

Interruptores De Um Vsi Monofásico Em Ponte Baseado Na Teoria De Conjuntos Aproximados". Tese de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – UFI/PPGEE, Itajubá – MG, 2017.

PAIVA, Sâmara de Cavalcante Paiva. **"Proteção em Sistemas Elétricos com Geração Distribuída Utilizando a Transformada Wavelet"**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN/PPGEC, Natal - RN, 2015.

RASHID, M. H.; RASHID, M. H.; RASHID, M. **"H.Power electronics: circuits, devices, and applications"**. [S.l.]: Prentice hall NJ, 1988.

ROCHA, Thiago de Oliveira Alves Rocha. **"Estratégia de Controle Robusto para Interconexão de Sistemas PV Trifásicos à Rede Elétrica"**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPGEEC, Natal – RN, 2014.

ROCHA, Thiago de Oliveira Alves Rocha. **"Estratégia de Controle Robusto para Interconexão de Sistemas PV Trifásicos à Rede Elétrica"**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPGEEC, Natal – RN, 2015.

SÁ, Nuno Rafael Silva Sá. **"Sistema de Conversão de Energia Solar Fotovoltaica para Carregamento de um Veículo Elétrico"**. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL/DEEEA, Lisboa, 2017.

SILVA, Leonardo Rosenthal Caetano Silva. **"Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede"**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia – UFU/PPGEE, Uberlândia – MG, 2015.

TEODORESCU, R; LISERRE, M; RODRÍGUEZ, P. **"Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems"**. 1. [s.l.]Wiley-IEE Press, 2011. 416 p. ISBN 978-04-700-5751-3.

VIDAKOVIC, B.; MUELLER, P. **"Wavelets for kids: A tutorial introduction"**. Technical report, Duke University, 1995.

XIAOYU, W.; FREITAS, W.; WILSON, X.; DINAVAH, V. **"Impact of DG interface controls on the sandia frequency shift antiislanding method"**. IEEE Transactions on Energy Conversion, New York, v. 22, n. 3, p. 792-794, 2007.