

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

ANTONIO CLÁUDIO PONTE DE AGUIAR

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO
ANTI-ILHAMENTO BASEADO NA TRANSFORMADA WAVELET**

Maracanaú, Ceará

2022

ANTONIO CLÁUDIO PONTE DE AGUIAR

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO
ANTI-ILHAMENTO BASEADO NA TRANSFORMADA WAVELET

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros,
Coorientador: Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa

Maracanaú, Ceará

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A282m Aguiar, Antonio Cláudio Ponte de.
Metodologia para análise de um sistema de proteção anti-ilhamento baseado na transformada wavelet /
Antonio Cláudio Ponte de Aguiar. - 2022.
107 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus
Maracanaú, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros.
Coorientação: Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa.
1. Detecção de ilhamento. 2. Transformada wavelet. 3. Microgeração fotovoltaica. 4. Sistema de geração
distribuída. I. Título.

CDD 620.91

ANTONIO CLÁUDIO PONTE DE AGUIAR

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO
ANTI-ILHAMENTO BASEADO NA TRANSFORMADA WAVELET

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Aprovado em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará - UFC

Este trabalho é dedicado aos meus pais José Maria e Madalena (*in memoriam*),
e também a minha esposa Itamara e minhas filhas Cláudia, Cristina e Clara,

Agradecimentos

A Jesus e Maria Santíssima, por tornar tudo possível

Ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) pela oportunidade de realizar esse mestrado e ao Laboratório de Processamento de Energia (LPE) pelo suporte fornecido.

Ao professor Cláudio Marques de Sá Medeiros, pela disponibilidade em me acompanhar nessa jornada através de uma competente orientação, tornando possível a conclusão deste trabalho. Quero expressar o meu profundo reconhecimento e a minha admiração.

Aos professores José Renato de Brito Sousa e Fernando Luiz Antunes pela disponibilidade em participar da banca examinadora e pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Ao professor Luiz Daniel Santos Bezerra pelas valiosas contribuições técnicas e empréstimos de componentes fundamentais para realização desse trabalho.

Aos meus amigos do Laboratório de Processamento de Energia (LPE), em especial a Igor de Sousa, Maurílio de Lima Pereira, Navar de Medeiros, Paulo Ernesto e Poliana Silva pela ajuda técnica, pelas experiências compartilhadas e pela agradável convivência.

Resumo

O aumento dos custos dos combustíveis, questões ambientais, reestruturação do setor elétrico, aumento do consumo de energia elétrica e incentivo governamentais vem atraindo a indústria e comércio na instalação de sistemas de geração distribuída. Porém as questões referentes à qualidade e à proteção do sistema elétrico de potência (SEP) promovem a necessidade de pesquisas e estudos técnicos na área de controle e proteção devido aos mesmos criarem problemas de interferências na rede e segurança dos equipamentos e pessoas. No presente trabalho é apresentada uma metodologia para análise de um sistema de proteção anti-ilhamento baseado na transformada *wavelet*. São realizados estudos preliminares em ambiente de simulação computacional e, em seguida, são realizados ensaios em um sistema de microgeração solar fotovoltaica (FV) conectado à rede de distribuição de energia elétrica, instalado no Laboratório de Processamento de Energia (LPE), no bloco de Eletrotécnica do IFCE - Campus Fortaleza. Foi realizada a aplicação da transformada *wavelet*, com a análise multirresolução, para detecção de ilhamento e identificação de transientes em sistemas de microgeração FV conectados à rede elétrica. Para avaliação das condições de ilhamento no Ponto de Conexão Comum (PCC), foi instalado um sistema de aquisição de dados NI USB-6009, da *National Instruments*, com o auxílio de um aplicativo desenvolvido no ambiente computacional *Labview*. A frequência de amostragem utilizada é de 15,36 kHz, que equivale a 256 amostras por ciclo para uma frequência fundamental de 60 Hz. Os sinais de tensão adquiridos são analisados a partir da *toolbox wavelet* do programa *Matlab*, com uma decomposição em dez níveis. Utilizou-se a família *wavelet* Daubechies 5, por ser uma das famílias mais adequadas para analisar transitórios em sistemas de energia e detectar ilhamentos. Na comparação entre os sistemas real e simulado, foram verificados seis estudos de casos. Os resultados deste trabalho demonstram que a metodologia de proteção anti-ilhamento avaliada atende ao tempo máximo estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 62116 2012 para as condições analisadas (2 s). Os tempos totais de detecções são menores nos casos em que as potências geradas pelo sistema de microgeração FV são maiores ou menores do que as potências das cargas, quando comparados aos casos em que as potências geradas pelos sistemas FV são próximas das potências das cargas. Os níveis de detalhes das decomposições das AMRs D3 (960- 1920 Hz) e D4 (480 - 960 Hz), possibilitam melhores visualizações dos instantes de desligamentos das redes e dos inversores, tanto nos sistemas reais como nos simulados. Este trabalho tem o intuito de contribuir nos estudos e aplicações de sistemas FV conectados a rede de distribuição de energia elétrica, enfatizando a importância da transformada *wavelet* dentro das análises de sistemas anti-ilhamentos.

Palavras-chaves: Detecção de ilhamento, microgeração fotovoltaica, sistema de geração distribuída, transformada *wavelet*.

Abstract

The increase in fuel costs, environmental issues, industry restructuring electricity, increased consumption of electricity and government incentives have been attracting industry and commerce in the installation of distributed generation systems. But the issues concerning the quality and protection of the electric power system promote the need for research and technical studies in the area of control and protection due to the they create problems of interference in the electrical grid and security of the equipment and people. The present work show a methodology for analyzing a system anti-islanding protection based on the wavelet transform. Studies are carried out preliminary tests in a computer simulation environment and then tests in a photovoltaic solar microgeneration system connected the electrical grid, installed in the Laboratory of Energy Processing (LPE), in the Electrotechnical block of the IFCE - Fortaleza Campus. The application of the transform was carried out wavelet, with multi-resolution analysis, for islanding detection and identification of transients in photovoltaic microgeneration systems connected to the electrical grid. For evaluation of islanding conditions in the common connection point, a system for acquiring NI USB-6009 data, from National Instruments, with the aid of an application developed in the Labview computing environment. The sampling frequency used is 15.36 kHz, which is equivalent to 256 samples per cycle for a fundamental frequency of 60 Hz. The acquired voltage signals are analyzed from the program's wavelet toolbox Matlab, with a ten-level decomposition. The Daubechies wavelet family was used 5, as it is one of the most suitable families for analyzing transients in energy and detect islanding. In the comparison between the real and simulated systems, it was verified six case studies. The results of this work demonstrate that the anti-islanding protection methodology evaluated meets the maximum time established by Brazillian Association of Technical Standards (ABNT) 62116 2012 for the conditions analyzed (2 s). The total detection times are shorter in cases where the powers generated by the photovoltaic microgeneration system are higher or lower than the load powers, when compared to cases where the powers generated by the photovoltaic systems are proximate to the powers of the loads. The detail levels of decompositions of multi-resolution analysis D3 (960-1920 Hz) and D4 (480 - 960 Hz), allowed better visualization of the instantaneous shutdowns of the networks and inverters, both in the real as in the simulations. This work aims to contribute to the studies and applications of photovoltaic systems connected to the electrical grid, emphasizing the importance of the wavelet transform within the analysis of anti-islanding systems.

Key-words: Distributed generation system, islanding detection, photovoltaic microgeneration, wavelet transform.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama simplificado de um sistema FV conectado à rede | 21 |
| Figura 2 – Representação da Zona de Não Detecção (ZND) | 22 |
| Figura 3 – Estrutura básica de um PLL | 30 |
| Figura 4 – Técnicas de detecção de ilhamento | 31 |
| Figura 5 – Fluxograma processamento sinais | 34 |
| Figura 6 – Fluxograma classificador inteligente | 34 |
| Figura 7 – Wavelets de Haar - haar | 43 |
| Figura 8 – Wavelets Daubechies - dbN, em que db refere-se a <i>wavelet</i> mãe da família Daubechies e o fator N trata do nível da mesma, que está relacionado à resolução ou número de pontos da <i>wavelet</i> | 44 |
| Figura 9 – <i>Wavelets</i> Symlets - symN, em que sym refere-se a <i>wavelet</i> mãe da família Symlets e N trata do nível da mesma, que está relacionado à resolução ou número de pontos da <i>wavelet</i> | 44 |
| Figura 10 – <i>Wavelet</i> Chapéu Mexicano - mexh | 45 |
| Figura 11 – Escalonamento de uma função chapéu mexicano | 45 |
| Figura 12 – <i>Wavelet</i> Chapéu Mexicano - mexh | 46 |
| Figura 13 – Tradução da função chapéu mexicano da Figura 12 | 46 |
| Figura 14 – Transformada <i>wavelet</i> - Decomposição dos coeficientes de Aproximação de um sinal de tensão | 48 |
| Figura 15 – Transformada <i>wavelet</i> - Decomposição dos coeficientes de Detalhes de um sinal de tensão | 49 |
| Figura 16 – Decomposição hierárquica (árvore) em faixas de uma oitava sucessivas | 50 |
| Figura 17 – Transformada <i>wavelet</i> - Processo de decomposição do sinal original (S) | 51 |
| Figura 18 – Sinal original = $S = A_{10} + D_{10} + D_9 + D_8 + D_7 + D_6 + D_5 + D_4 + D_3 + D_2 + D_1$ | 52 |
| Figura 19 – <i>Wavelet</i> Daubechies db5 | 53 |
| Figura 20 – Decomposição <i>wavelet</i> Daubechies db5 | 53 |
| Figura 21 – Processo de associação aos níveis correspondentes | 54 |
| Figura 22 – Circuito de Simulação no PSIM com Sistema Convencional (C) | 57 |
| Figura 23 – Circuito de Simulação no PSIM com Sistema Simplificado (S) | 58 |
| Figura 24 – V_{pccC} e V_{pccS} - Tensões (V) nos pontos de conexões comuns dos sistemas convencional e simplificado | 59 |
| Figura 25 – I_{cargaC} e I_{cargaS} - Correntes (A) nas cargas dos sistemas convencional e simplificado | 60 |
| Figura 26 – P_{invC} e P_{invS} - Potências ativas (W) fornecidas pelos inversores dos sistemas convencional e simplificado respectivamente | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 – PredeC e PredeS - Potências ativas fornecidas pelas redes (W) dos sistema convencional e simplificado respectivamente | 61 |
| Figura 28 – VARinvC e VARinvS - Potências reativas (var) fornecidas pelos inversores dos sistemas convencional e simplificado respectivamente) | 61 |
| Figura 29 – VARredeC e VARredeS - Potências reativas (var) fornecidas pelas redes dos sistemas convencional e simplificado respectivmanete) | 62 |
| Figura 30 – Circuito de Simulação, carga resistiva e $\Delta P = 6,5 \%$ | 63 |
| Figura 31 – Tensão no PCC - Cenário fluxos de potências | 64 |
| Figura 32 – Correntes inversor, carga e injetada na rede - Cenário fluxos de potências | 64 |
| Figura 33 – Potencias ativas e reativas, rede, carga e inversor - Cenário dos fluxos de potências | 65 |
| Figura 34 – Tensões PCC - Cenário fluxos de potências | 66 |
| Figura 35 – Transformada de Fourier - Cenário fluxos de potências | 67 |
| Figura 36 – Transformada <i>wavelet</i> -Decomposição em AMR da tensão - Sistema Equilibrado Sem Desligamento (ESD) | 68 |
| Figura 37 – Transformada <i>wavelet</i> -Decomposição em AMR da tensão - Sistema Equilibrado Com Desligamento (ECD) | 69 |
| Figura 38 – Transformada <i>wavelet</i> -Decomposição em AMR da tensão - Sistema Desequilibrado Com Desligamento (DCD) | 70 |
| Figura 39 – EPLL | 71 |
| Figura 40 – Detector de ilhamento | 73 |
| Figura 41 – Diagrama simplificado do sistema proposto | 74 |
| Figura 42 – Desconexão do inversor em função do Q_f | 75 |
| Figura 43 – Saída de controle do detector de ilhamento em função do Q_f | 75 |
| Figura 44 – Transformada <i>wavelet</i> - Terceiro nível de detalhe da tensão sem o desligamento do inversor | 76 |
| Figura 45 – Transformada <i>wavelet</i> - Terceiro nível de detalhes da tensão com o desligamento do inversor | 76 |
| Figura 46 – <i>String</i> composta de 8 módulos fotovoltaicos instalados na laje de uma caixa d'água | 77 |
| Figura 47 – Disposição do inversor e de seus quadros de seccionamento e proteção CC e CA | 77 |
| Figura 48 – Diagrama unifilar - SGD - carga resistiva | 78 |
| Figura 49 – Diagrama unifilar - SGD - carga RLC | 78 |
| Figura 50 – Configuração física carga RLC | 79 |
| Figura 51 – Interface do Sistema de aquisição de dados - Parte-2 | 81 |
| Figura 52 – Interface do Sistema de aquisição de dados - Parte-1 | 82 |
| Figura 53 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-1 | 83 |
| Figura 54 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-1 . . | 84 |

| | |
|---|-----|
| Figura 55 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-1 | 85 |
| Figura 56 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-1 | 85 |
| Figura 57 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-2 | 86 |
| Figura 58 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-2 . . | 86 |
| Figura 59 – Transitório da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-2 | 87 |
| Figura 60 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-2 | 88 |
| Figura 61 – Transitório da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-3 | 89 |
| Figura 62 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-3 . . | 89 |
| Figura 63 – Transitório da tensão PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-3 | 90 |
| Figura 64 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-3 | 91 |
| Figura 65 – Transitório de tensão no PCC sistema real - CASO-4 (potência de carga de 927 W e de geração de 309 W). | 92 |
| Figura 66 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-4 (potência da carga 927 W e de geração de 309 W) | 93 |
| Figura 67 – Transitório de tensão no PCC - sistema simulado - CASO-4 (potência de carga de 927 W e de geração de 309 W). | 94 |
| Figura 68 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-4 (potência de carga 927 W e de geração 309 W) | 94 |
| Figura 69 – Transitório da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-5 (potência de carga de 927 W e de geração 1654 W) | 95 |
| Figura 70 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-5 (potência de carga 927 W e de geração 1654 W) | 96 |
| Figura 71 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-5 (potência de carga de 927 W e de geração de 1654W). | 97 |
| Figura 72 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-5 (potência de carga 927 W e de geração 1654 W) | 97 |
| Figura 73 – Transitório do sinal de tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-6 (potência de carga 927 W e de geração 1000 W) | 98 |
| Figura 74 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-6 (potência de carga 927 W e de geração 1000 W) | 99 |
| Figura 75 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-6 (potência de carga de 927 W e de geração de 1000W). | 100 |
| Figura 76 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-6 (potência de carga 927 W e de geração de 1000 W) | 100 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Condições de ensaio | 24 |
| Tabela 2 – Ajustes de sobretensão e subtensão - BT | 26 |
| Tabela 3 – Ajustes de sobrefrequência e subfrequência - BT | 26 |
| Tabela 4 – Limites de distorção harmônica de corrente | 27 |
| Tabela 5 – Fator de potência | 27 |
| Tabela 6 – Frequência em cada nível de decomposição | 67 |
| Tabela 7 – Variações do fator de qualidade em função de R, L e C | 71 |
| Tabela 8 – Variações do fator de qualidade em função do tempo de detecção | 75 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AMR | Análise Multirresolução |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BT | Baixa Tensão |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| DFT | <i>Discret Fourier Transform</i> |
| DWT | <i>Discret Wavelet Transform</i> |
| ENEL | Enel Distribuição Ceará |
| EPLL | <i>Enhanced Phase-Locked Loop</i> |
| ESE | Equipamento Sob Ensaio |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| FT | <i>Fourier Transform</i> |
| FV | Fotovoltaico |
| GD | Geração Distribuída |
| IDWT | <i>Inverse Discrete Wavelet Transform</i> |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| M-SOGI-FLL | <i>Multiple Second Order Generalized Integrator Frequency Locked Loop</i> |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| NBR | Norma Brasileira |
| NT | Norma Técnica |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PARK-PLL | <i>Inverse Park-based Phase-Locked Loop</i> |
| PCC | Ponto de Conexão Comum |

| | |
|---------|--|
| PDS | Processamento de sinais |
| PLL | <i>Phase-Locked Loop</i> |
| P-PLL | <i>Power-based Phase-Locked Loop</i> |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| QEE | Qualidade de Energia Elétrica |
| QF | <i>Quality Factor</i> |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SFCR | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede |
| SGD | Sistema de Geração Distribuída |
| STFT | <i>Short time Fourier Transform</i> |
| TW | Transformada Wavelet |
| TWC | Transformada Wavelet Contínua |
| TWD | Transformada Wavelet Discreta |
| ZND | Zona de Não Detecção |

Sumário

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 16 |
| 1.1 | Justificativa | 17 |
| 1.2 | Objetivos | 18 |
| 1.2.1 | Objetivo geral | 18 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 1.2.3 | Organização do texto | 18 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1 | Zona de Não Detecção - ZND | 20 |
| 2.2 | Normas e padrões técnicos | 23 |
| 2.2.1 | Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica - NBR-IEC-62116-2012 | 23 |
| 2.2.2 | Conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema elétrico da ENEL - Especificação técnica 122 - versão 02 - 2018 | 25 |
| 2.2.2.1 | Ajustes de nível de tensão | 26 |
| 2.2.2.2 | Faixas de frequência | 26 |
| 2.2.2.3 | Limites de distorção harmônica | 26 |
| 2.2.2.4 | Faixas recomendadas para o fator de potência | 27 |
| 2.2.2.5 | Critério para ilhamento | 27 |
| 2.2.2.6 | Critério para reconexão | 28 |
| 2.2.2.7 | Condições para religamento automático de rede | 28 |
| 2.3 | Fator de Qualidade | 28 |
| 2.4 | <i>Phase-Locked Loop</i> (PLL) | 29 |
| 2.5 | Técnicas de Proteção Anti-ilhamento | 30 |
| 2.5.1 | Técnicas remotas | 31 |
| 2.5.1.1 | Técnicas passivas | 32 |
| 2.5.1.2 | Técnicas ativas | 32 |
| 2.5.1.3 | Técnicas híbridas | 33 |
| 2.5.2 | Técnicas de processamento de sinais | 33 |
| 2.6 | Técnicas de análises dos Sistemas de Proteção Anti-ilhamento | 33 |
| 2.7 | Transformada Wavelet | 41 |
| 2.7.1 | Transformadas <i>wavelet</i> contínua e discreta | 42 |
| 2.7.2 | Famílias <i>wavelets</i> | 43 |
| 2.7.3 | Escalonamento e translação | 45 |
| 2.7.4 | Análise multirresolução | 46 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 2.7.5 | Aproximações e Detalhes | 47 |
| 2.7.6 | Processo de filtragem | 49 |
| 2.8 | Considerações finais | 55 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 56 |
| 3.1 | Simulações preliminares para validação da metodologia proposta | 56 |
| 3.2 | Cenário para análises dos fluxos de potências no SGD | 62 |
| 3.3 | Cenários para análises das transformadas de Fourier e Wavelet | 65 |
| 3.4 | Finalização do sistema proposto | 70 |
| 3.4.1 | <i>Phase-Locked Loop (PLL)</i> | 70 |
| 3.4.2 | Carga indutiva e capacitiva | 71 |
| 3.4.3 | Detector de ilhamento | 72 |
| 3.4.4 | Composição do SGD FV real utilizado | 76 |
| 3.4.5 | Considerações finais | 79 |
| 4 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 81 |
| 4.1 | Sistema de aquisição de dados | 81 |
| 4.2 | Resultados práticos envolvendo um sistema real, alimentando | |
| | cargas resistivas | 82 |
| 4.2.1 | Caso - 1 | 82 |
| 4.2.2 | Caso - 2 | 85 |
| 4.2.3 | Caso - 3 | 88 |
| 4.3 | Resultados práticos envolvendo um sistema real, alimentando | |
| | uma carga RLC | 91 |
| 4.3.1 | Caso - 4 | 91 |
| 4.3.2 | Caso - 5 | 95 |
| 4.3.3 | Caso - 6 | 98 |
| 4.4 | Considerações finais | 100 |
| 5 | CONCLUSÕES | 102 |
| 5.1 | Trabalhos futuros | 103 |
| | REFERÊNCIAS | 104 |

1 Introdução geral

O consumo crescente de energia elétrica, as questões ambientais e econômicas relacionadas ao esgotamento dos recursos naturais e o desenvolvimento constante de novas tecnologias contribuíram para iniciar um processo de diversificação da matriz energética brasileira. Segundo o Boletim Mensal de Energia de Janeiro de 2022, as fontes renováveis devem manter a participação acima de 83 % na oferta interna de energia elétrica deste ano, estimando que a energia hidráulica continue sendo a mais importante na matriz elétrica, respondendo por 57,3 % (BRASIL, 2022). Embora os números explicitem a predominância hídrica, a matriz vem apresentando um expressivo aumento de outras fontes renováveis, como a eólica e a solar fotovoltaica (FV).

As perspectivas a longo prazo para as fontes renováveis são bastante positivas. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 prevê a continuidade de uma forte presença das fontes renováveis na matriz energética brasileira, atingindo um percentual de 45,2 % . Para energia elétrica, as renováveis deverão representar aproximadamente 86 % na matriz de geração em 2024 (EPE, 2015).

A expansão das energias renováveis é uma das metas do Ministério de Minas e Energia. Em 2015, o Brasil assinou o compromisso internacional na 21ª Conferência das Partes (COP - Órgão supremo da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima) de aumentar a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23 % até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar FV. A expectativa é que os projetos de energia solar FV possam chegar a 25 gigawatts (GW) em potência instalada até 2030, ao passo que a energia eólica deverá atingir o valor de 8 % em 2024, devido à expansão de 20 GW no período (SILVA, 2018).

A partir dessa contextualização o uso de energias renováveis, vêm atraindo a indústria e o comércio na instalação de sistemas de geração distribuída na área de energia elétrica, por meio de sistemas eólicos, fotovoltaicas e outros (SEVERO et al., 2011). Além disso as questões referentes à qualidade e à proteção do sistema elétrico de potência (SEP) promovem a necessidade de pesquisas e estudos técnicos nas áreas de controle e proteção, pois os mesmos criam problemas no restabelecimento da energia, interferências na rede e segurança dos equipamentos e pessoas (RAZA et al., 2015).

Devido a isso os sistemas de geração distribuída precisam estar preparados para garantir a qualidade e a proteção do sistema elétrico de potência. Conforme IEC (2012), a proteção contra ilhamento é uma das mais importantes para garantir essa qualidade. Essa norma define ilhamento como a condição na qual parte da instalação elétrica, contendo

carga e gerador, fica isolada do restante da rede elétrica, situação que deve ser evitada para não comprometer a qualidade, segurança e confiabilidade do sistema. Segundo a referida norma, a indústria FV foi pioneira no desenvolvimento de sistemas de detecção e prevenção do ilhamento. Para satisfazer os requisitos dos fornecedores de energia elétrica, inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) utilizam diversas técnicas de detecção e prevenção do ilhamento para proteção do sistema.

Diante disso, fica evidente a necessidade de pesquisas e estudos técnicos que visem analisar com detalhes o comportamento dos sinais elétricos durante as ocorrências de transitórios no sistema de geração distribuída. Com intenção de estudar e analisar os perfis do comportamento do sinal de tensão para detecção de ilhamento, neste trabalho opta-se por utilizar a transformada *wavelet* (TW) para realizar uma análise multirresolução (AMR) dos sistemas de geração distribuída.

1.1 Justificativa

Em geral os inversores não apresentam em suas interfaces, detalhes sobre o perfil do sinal de tensão no ponto de conexão comum (PCC) no instante do ilhamento.

Vale ressaltar que é importante uma análise através de faixas de frequências do perfil da tensão no PCC ocorridas durante um ilhamento para diferenciar uma ocorrência de ilhamento de outras perturbações passageiras que não comprometem a segurança e qualidade do sistema elétrico. Além disso, facilita nos estudos e análises não somente no meio acadêmico como também pelos projetistas e mantenedores de sistemas FV conectados a rede de distribuição elétrica.

Logo, há uma necessidade em se estudar e analisar os sistemas de detecção de ilhamento através de uma metodologia proposta que seja similar a um sistema real com o objetivo de verificar se o método de detecção de ilhamento aplicado a determinado inversor atende as normas vigentes.

Uma das maneiras que podem ser efetuadas essas análises, é através das informações dos conjuntos de dados obtidos na metodologia proposta e também no sistema real, utilizando técnicas de processamentos de sinais (PDS) da transformada *wavelet* (TW) com a análise multirresolução (AMR).

Essa técnica é utilizada para melhorar a análise de desempenho das técnicas passivas, nas quais podem ocorrer situações de não atuação do sistema de detecção de ilhamento, ajudando os pesquisadores a extrair as características ocultas dos sinais medidos durante a detecção de ilhamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Aplicar uma metodologia para análise de proteção de um sistema anti-ilhamento através da comparação entre um Sistema de Geração Distribuída (SGD) real com um simulado, através da TW, com a análise multirresolução, com isso criando facilidades para que os estudos e desenvolvimento de sistemas anti-ilhamentos de sistemas FV possam ser avaliados através de simulações antes de serem instalados e também sem ter que se deslocar para coleta de informações em sistemas existentes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre técnicas de anti-ilhamento, geração distribuída, detecção de condições de ihamento e aplicações da transformada *wavelet* com análise multirresolução;
- Desenvolver uma metodologia de análise de proteção de sistemas anti-ilhamento, para um sistema FV de geração distribuída conectado a uma rede de baixa tensão;
- Validar a metodologia proposta;
- Aplicar a metodologia proposta em um sistema instalado no IFCE - Fortaleza cargas reais conforme NBR-62116, extraindo conjuntos de dados através de um sistema de aquisição de dados projetado;
- Estudar e aplicar métodos para avaliações de sistemas anti-ilhamento, que utilizam técnicas de processamento de sinais (PDS), através da TW;
- Analisar o desempenho da metodologia desenvolvida comparado com o sistema instalado no IFCE - Fortaleza.

1.2.3 Organização do texto

O documento é estruturado em mais quatro capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica utilizada por meio dos principais conceitos dos temas relacionados com as principais técnicas de detecção anti-ilhamento a fim de facilitar a compreensão do estudo proposto. São apresentados no Capítulo 3 os materiais e métodos utilizados por meio de uma metodologia em programas computacionais de um sistema fotovoltaico de geração distribuída. No capítulo 4 são apresentados os resultados práticos envolvendo um sistema real de geração distribuída. Por fim, no Capítulo 5 é apresentado as conclusões e indicações de trabalhos futuros para desdobramentos desse trabalho.

2 Fundamentação teórica

Com a escassez dos recursos não renováveis para geração de energia elétrica, as fontes de energias renováveis vem ganhando destaque, principalmente a energia solar fotovoltaica, cuja utilização é regida por especificações e normas técnicas específicas visando sua utilização de forma padronizada e segura.

A Especificação Técnica 122-versão 02 - 2018, ENEL, define Geração Distribuída (GD) como sendo um conjunto de centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachada – ou não – pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) (ENEL, 2018).

A GD proporciona diversos benefícios, a exemplo da redução das perdas ôhmicas nas linhas de transmissão, pelo fato de ser uma geração que se localiza próxima à carga. Além disso, permite o atendimento da demanda crescente de forma rápida, já que a construção de grandes usinas hidroelétricas, por exemplo, que é o modelo de geração mais utilizado no Brasil, é um processo demorado. Com isso, a inserção de geradores distribuídos no sistema brasileiro, em especial provenientes de fontes renováveis, tende a se tornar a cada ano mais comum, como tem ocorrido no exterior (PAIVA, 2015).

O crescimento do uso de redes com GD e o surgimento das redes inteligentes (*Smart Grids*) fizeram aumentar muito a preocupação com a QEE (Qualidade de Energia Elétrica). Se por um lado as fontes renováveis de energia e as técnicas para gerenciá-las trazem muitos benefícios e vantagens para os consumidores, por outro lado, novos padrões de QEE são inseridos no contexto nacional e internacional, o que aumenta a confiabilidade exigida no controle da QEE (NAGATA, 2018).

A geração distribuída traz muitas vantagens quando comparada com a geração centralizada, mas também apresenta inconvenientes que podem afetar a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico de potência (SEP), destacando-se o ilhamento.

O fenômeno do ilhamento ocorre quando a rede principal de energia elétrica encontra-se desconectada e o sistema elétrico da geração distribuída continua em operação. Esse fenômeno promove uma série de falhas técnicas e problemas, não só para os equipamentos do SEP, como também para a própria segurança dos operadores e equipes que realizam manutenções no referido sistema.

Dessa maneira, é necessário que o sistema fotovoltaico conectado a rede (SFCCR) possa identificar a ocorrência do ilhamento e cessar o fornecimento de energia para o SEP. Com isso, o inversor que faz a conversão e proteção da geração solar FV deve possuir

internamente um algoritmo de proteção anti-ilhamento.

Nesse contexto, os conversores situados dentro da ilha de geração, desempenham papel fundamental, devendo não apenas realizar a conversão da energia como também a proteção de ilhamento (SEVERO et al., 2011). As normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnica), NBR 16149-2013 (ABNT, 2013a), NBR 16150-2013 (ABNT, 2013b), NBR 62116-2012 (IEC, 2012), resolução 482-2012 – ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (ANEEL, 2012), Especificação Técnica 122-versão 02-2018 (Enel Distribuição Ceará) (ENEL, 2018), dentre outras, não permitem que os sistemas de geração distribuída operem de modo ilhado em tempo superior a 2 s.

A partir dessa contextualização existe toda uma fundamentação teórica para estudos de SGD's. Inicia-se com as definições da zona de não detecção, mostrando através de diagramas sua importância na detecção de ilhamento, seguindo pela apresentação de normas e padrões técnicos que foram elaborados para disciplinar as operações nos SGDs. Depois é definido fator de qualidade que é utilizado para normalização das cargas a serem inseridas nos inversores durante as certificações dos mesmos. Phase-locked loop (PLL) é mostrado em seguida através da estrutura básica e suas importâncias nos SGDs. São mostradas as principais técnicas de proteção anti-ilhamento existentes na literatura, até chegar nas técnicas de análises dos sistemas de proteção anti-ilhamento.

2.1 Zona de Não Detecção - ZND

Conforme Silva (2016), todos os inversores empregados em sistemas FV devem apresentar proteções de tensão e frequência, sendo eles: proteção por subtensão (*Under Voltage Protection* - UVP), proteção por sobretensão (*Over Voltage Protection* - OVP), proteção por subfrequência (*Under Frequency Protection* - UFP) e proteção por sobre-frequência (*Over frequency Protection* - OFP). Essas proteções são padronizadas e recebem um número de identificação. De acordo com a norma IEE. C37.2-2008, suas identificações são:

Função ANSI 27 - subtensão (*Undervoltage Relay*)

Função ANSI 59 - sobretensão (*Overvoltage Relay*)

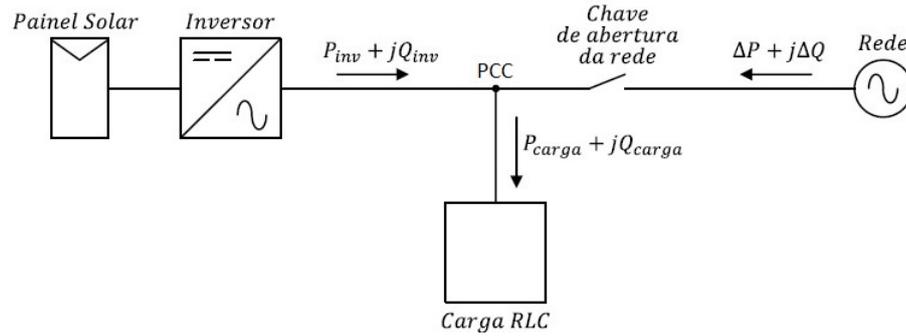
Função ANSI 81 - frequência (*Frequency Relay*)

Na maioria dos casos essas funções de proteção previnem o ilhamento dos sistemas FV. No entanto, em certas condições, o ilhamento pode não ser detectado e o inversor permanece operando indefinidamente. O diagrama elétrico simplificado apresentado na Figura 1 representa a conexão típica de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, alimentando uma carga RLC em paralelo.

Sua composição simplificada é realizada através do painel FV que absorve a energia

solar durante o dia e a transforma em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, fornecendo energia em corrente contínua (CC) à entrada do inversor. A saída do inversor é em corrente alternada (CA) e se conectará com a saída da chave de abertura da rede e também com a carga RLC no ponto de conexão comum (PCC). A entrada da chave de abertura será alimentada pela fonte de energia CA da rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 1 – Diagrama simplificado de um sistema FV conectado à rede



Fonte: (SILVA, 2016)

Conforme [Silva \(2016\)](#) o balanceamento das potências no ponto de conexão comum (PCC) do sistema da Figura 1 é dado por:

$$P_{carga} = P_{inv} + \Delta P$$

e

$$Q_{carga} = Q_{inv} + \Delta Q.$$

Se a potência ativa fornecida pelo inversor P_{inv} for igual a potência ativa que P_{carga} necessita, o desbalanceamento de potência entre eles será nulo, de modo que a rede não participa do suprimento de potência ($\Delta P=0$)

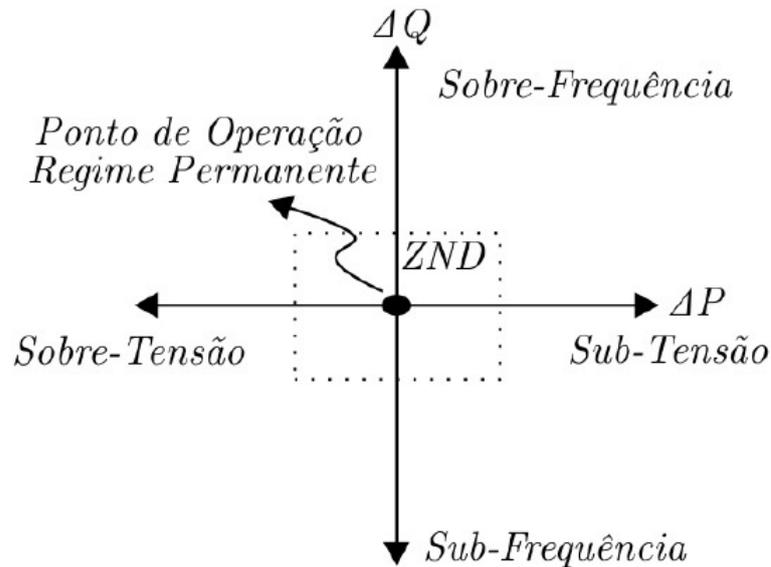
A mesma análise é válida para potência reativa do sistema. Como na maioria dos casos o inversor opera com fator de potência unitário, a potência reativa fornecida por ele é zero $Q_{inv} = 0$, resultando em $\Delta Q = Q_{carga}$. Entretanto se a frequência de ressonância da carga RLC for exatamente igual a frequência da rede, o fator de potência da carga também será unitário e o resultado será $Q_{carga} = \Delta Q = 0$

O comportamento da tensão e frequência no PCC com o sistema ilhado dependerá de ΔP e ΔQ no instante anterior a abertura da chave. Se ambos forem zeros ou possuírem valores muito próximo de zero, a variação da tensão e frequência será nula ou muito pequena, de modo que as funções de proteção de tensão e frequência não atuarão, e o sistema FV continuará sua operação indefinidamente.

Segundo [Severo et al. \(2011\)](#), a eficiência dos métodos AI (anti-ilhamento) pode ser representada utilizando os gráficos de ZND. Tais gráficos fornecem uma indicação da

variação de potência ativa e reativa no momento do ilhamento, conforme é ilustrado na Figura 2. Os gráficos de ZND também podem ser compreendidos como sendo a área “cega” em que o método AI não consegue realizar a detecção e, portanto, é ineficiente.

Figura 2 – Representação da Zona de Não Detecção (ZND)



Fonte: (SEVERO et al., 2011)

O eixo das abscissas no gráfico da Figura 2 está relacionado com a variação da potência ativa da rede de distribuição ilustrada na Figura 1.

- Se a potência do inversor for igual a potência da carga, a potência ativa será zero e ficará dentro de uma zona de não detecção;

- Caso a potência ativa fornecida pelo inversor seja maior que a potência da carga, o restante dessa potência será fornecida para a rede elétrica, que ficará representada no semi-eixo negativo. No instante do desligamento da rede a potência que o inversor estava fornecendo para rede elétrica será direcionada para a carga, ocorrendo portanto uma sobretensão;

- Caso a potência ativa fornecida pelo inversor seja menor que a potência da carga, toda potência do inversor será fornecida para carga, sendo ainda complementada pela rede elétrica, sendo representada no semi-eixo positivo. No instante do desligamento da rede elétrica o inversor continuará fornecendo a mesma potência para carga sem a complementação da rede elétrica, ocorrendo portanto uma subtensão.

O eixo das ordenadas da Figura 2 está relacionado com a variação da frequência no ponto de conexão comum, com o fator de potência da carga e variação da potência reativa. A maioria dos inversores opera com um fator de potência unitário para ter um maior rendimento. Quando o sistema de geração distribuída está conectado a rede, toda potência reativa necessária para carga será fornecida pela rede elétrica.

- Se a potência da carga é puramente resistiva ou ressonante no instante do desligamento da rede elétrica, a potência reativa será zero e ficará dentro de uma zona de não detecção;

- Caso a potência da carga seja reativa indutiva, a corrente ficará atrasada em relação a tensão. No instante do desligamento da rede elétrica, o inversor deverá fornecer tanto a potência ativa, quanto a reativa indutiva. Assim, o sistema de controle do inversor detectará o atraso da corrente e tentará impor o adiantamento do fasor de corrente a partir do aumento de frequência, o que resultará em sobrefrequência;

- Caso a potência da carga seja reativa capacitiva a corrente ficará adiantada em relação a tensão. No instante do desligamento da rede elétrica, o inversor deverá fornecer tanto a potência ativa, quanto a reativa capacitiva. Assim, o sistema de controle do inversor detectará o adiantamento da corrente e tentará impor o atraso do fasor de corrente a partir da redução da frequência, o que resultará em subfrequência.

Representações deste gráfico que possuem grande área ZND indicam baixa eficiência do método representado e, por consequência, maior suscetibilidade de falhas e falsas sinalizações AI. Ao passo que representações deste gráfico que possuem pequena área ZND ou mesmo inexistente indicam métodos AI de alta eficiência e, portanto, portadores de maior confiabilidade e segurança. Embora este gráfico represente as variações de potência ativa e reativa, no momento do ilhamento, outras formas são usadas para representá-las, sendo essa a mais usual.

2.2 Normas e padrões técnicos

O contexto da GD no Brasil envolve normas nacionais e internacionais. As normas que são descritas a seguir foram selecionadas porque, além de serem necessárias para o desenvolvimento e entendimento desse trabalho, fazem referências às outras normas nacionais, internacionais, resoluções normativas publicadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), portarias do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e aos módulos do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico).

2.2.1 Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica - NBR-IEC-62116-2012

O objetivo desta Norma é fornecer um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas FV conectados à rede elétrica (SFCR).

A referida norma define ilhamento como a condição na qual uma porção da

instalação elétrica, contendo carga e geração, fica isolada do restante da rede elétrica. Dá-se o nome de ilha intencional à situação em que uma ilha é criada intencionalmente pela distribuidora - para isolar partes da rede elétrica, por exemplo. Uma ilha não intencional, entretanto, ocorre quando um segmento da rede contendo somente a geração de uso privado e a carga está fora do controle da distribuidora. Por exemplo, mesmo que um sistema FV de uso privado seja projetado para alimentar as suas cargas locais quando a eletricidade da rede não estiver disponível, normalmente não é permitido alimentar outros consumidores.

A perda da rede elétrica pode ocorrer por diversas razões:

- Resultado de 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;
- Manobra feita pela distribuidora no sistema de distribuição e nas cargas;
- Erro humano ou sabotagem;
- Catástrofes naturais.

Nesta norma também são descritas as diretrizes para avaliar o desempenho das medidas automáticas de prevenção de ilha utilizadas em conjunto com ou embarcadas nos inversores empregados nos SFCR. O procedimento de ensaio e os critérios descritos são os requisitos mínimos que permitem a repetibilidade.

Segundo a referida norma, o inversor com função anti-ilhamento é aquele que interrompe o fornecimento de energia quando a rede elétrica está fora das condições normais de tensão e/ou frequência especificadas (IEC 61727, Ed. 2.0).

O procedimento de ensaio aplica-se ao inversor monofásico ou polifásico e sugere a utilização de uma carga RLC ressonante na frequência nominal do ESE (Equipamento Sob Ensaio) (50 Hz ou 60 Hz) e adequada à potência de ensaio.

O fabricante do inversor deve especificar os ajustes de desligamento para tensão e frequência e os tempos de desligamento com os quais a unidade deve ser ensaiada. As configurações recomendadas apresentadas na Tabela 1 devem servir para a maior parte dos requisitos exigidos pelas distribuidoras.

Tabela 1 – Condições de ensaio

| Parâmetro | Magnitude | Tempo de desligamento (s) |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Sobretensão | 115 % da tensão nominal | 2 |
| Subtensão | 85 % da tensão nominal | 2 |
| Sobrefrequência | 1,5 Hz acima da frequência nominal | 1 |
| Subfrequência | 1,5 Hz abaixo da frequência nominal | 1 |

A aprovação neste ensaio indica que a unidade oferece proteção adequada contra ilhamento para os ajustes utilizados e também para ajustes mais restritivos.

Se um ESE for aprovado no ensaio com ajuste de desligamento por frequência igual à frequência nominal $\pm 1,5$ Hz, então com ajuste de, por exemplo, $\pm 0,5$ Hz, também desligará dentro do tempo máximo de permanência da alimentação. Por outro lado, quando ajustado com configurações menos restritivas ou seja, no exemplo anterior alterando o ajuste para uma faixa mais larga que $\pm 1,5$ Hz, o ESE pode apresentar tempo de permanência da alimentação maior. Recomenda-se que os ajustes de frequência de $\pm 1,5$ Hz em torno do valor nominal e ± 15 % em torno da tensão nominal, para os propósitos deste ensaio, sejam suficientemente amplos para englobar a maior parte das exigências das distribuidoras. A medida que se ampliam as faixas dos ajustes de desligamento por tensão e frequência, o tempo de detecção tende a aumentar e métodos ativos de anti-ilhamento mais eficazes podem ser necessários, o que pode impactar negativamente a qualidade da energia.

No critério de aprovação/reprovação da referida norma, um ESE é considerado em conformidade com os requisitos da proteção contra ilhamento quando cada registro do tempo de permanência da alimentação é inferior a 2 s ou respeita os requisitos dos códigos locais.

2.2.2 Conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema elétrico da ENEL - Especificação técnica 122 - versão 02 - 2018

Essa especificação técnica estabelece as condições de acesso e define critérios técnicos, operacionais e requisitos de projetos aplicáveis à conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição da Enel Distribuição Ceará (ENEL), das unidades consumidoras que optarem pelo sistema de compensação de energia, de forma a garantir que ambos os sistemas, após a conexão, operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade.

A aplicação desta especificação segue a regulamentação da ANEEL e abrange o processo de conexão de micro e minigeração em unidades consumidoras cativas, que utilizem fontes renováveis de energia elétrica. A potência instalada deve ser menor ou igual a 75 kW (microgeração) ou potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para fontes hídricas, ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada e demais fontes renováveis de energia elétrica (minigeração).

Os ajustes de proteção no ponto de conexão para as unidades consumidoras em baixa tensão devem ser realizadas conforme segue.

2.2.2.1 Ajustes de nível de tensão

As proteções de sobretensão e subtensão no ponto de conexão para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão devem ser ajustadas conforme apresentado na Tabela 2, em que TL é a Tensão de Leitura.

Tabela 2 – Ajustes de sobretensão e subtensão - BT

| Faixa de tensão no ponto de conexão (V) | Tempo de desconexão (s) |
|---|-------------------------|
| $TL > 231$ | 0,2 |
| $191 \leq TL \leq 231$ | Operação Normal |
| $TL < 191$ | 0,4 |

2.2.2.2 Faixas de frequência

As proteções de sobrefrequência e subfrequência para as unidades conectadas em baixa tensão devem ser ajustadas conforme Tabela 3, em que f é a frequência no ponto de conexão.

Tabela 3 – Ajustes de sobrefrequência e subfrequência - BT

| Faixa de frequência no ponto de conexão (Hz) | Tempo de Desconexão (s) |
|--|-------------------------|
| $f \leq 56,5$ | Instantâneo |
| $56,5 < f \leq 57,5$ | 5 |
| $57,5 < f \leq 58,5$ | 10 |
| $59,9 \leq f \leq 60,1$ | Operação Normal |
| $62 \leq f < \leq 63,5$ | 30 |
| $63,5 \leq f < 66$ | 10 |
| $f \geq 66$ | Instantâneo |

2.2.2.3 Limites de distorção harmônica

Os limites de distorção harmônica estão definidos na Tabelas 4 e a distorção total não deve ser superior a 5 %.

Tabela 4 – Limites de distorção harmônica de corrente

| Harmônicas ímpares | Limite de distorção (%) |
|--------------------|-------------------------|
| 3° a 9° | < 4,0 |
| 11° a 15° | < 2 |
| 17° a 21° | < 1,5 |
| 23° a 33° | < 0,6 |
| Harmônicas pares | Limite de distorção (%) |
| 2° a 8° | < 1 |
| 10 a 32° | < 0,5 |

2.2.2.4 Faixas recomendadas para o fator de potência

O sistema de geração deve garantir o ponto de operação dentro das faixas de fator de potência, mesmo quando o limite de potência injetada for superior à 20 % da potência nominal do gerador, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Fator de potência

| Pot. Nominal - P _n (kW) | Faixa fator de potência | Fator pot. config. fáb. |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $P_n \leq 3$ | 0,98 ind. - 0,98 cap. | 1 |
| $3 < P_n \leq 6$ | 0,95 ind. - 0,95 cap. | 1 |
| $P_n > 6$ | 0,90 ind. - 0,92 cap. | 1 |

2.2.2.5 Critério para ilhamento

O sistema de geração distribuída deve desconectar-se e interromper a injeção de energia à rede de distribuição da ENEL ou de qualquer outra concessionária que segue a regulamentação da ANEEL, em até 2 (dois) segundos após a interrupção do fornecimento de energia.

A presente dissertação utiliza os documentos da concessionária ENEL, mas o estudo pode ser avaliado para outras concessionárias que seguem a regulamentação da ANEEL.

NOTA: Os inversores aplicados em sistemas FV devem atender ao estabelecido na NBR-IEC-62116-2012.

As unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída podem operar em modo de ilha, desde que desconectadas fisicamente da rede de distribuição.

2.2.2.6 Critério para reconexão

A reconexão do sistema de geração distribuída somente é permitida após 180 (cento e oitenta) segundos de condições normais de operação de tensão e frequência do sistema elétrico da ENEL.

2.2.2.7 Condições para religamento automático de rede

O sistema de geração distribuída deve suportar religamento automático da rede de distribuição da ENEL, assim como religamento fora de fase, na pior condição possível, ou seja, em oposição de fase, conforme ABNT-NBR 16149-2014 - Sistemas FV - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.

2.3 Fator de Qualidade

Na Especificação Técnica 122 - versão 02 - 2018 - ENEL, não são apresentadas informações sobre o Fator de Qualidade. Porém o mesmo é necessário para o estudo de detecção de ilhamento em sistemas de geração distribuída conectados á rede elétrica, para caracterizações das cargas durante a realização dos ensaios anti-ilhamento dos inversores.

Segundo a NBR-62116-2012, fator de qualidade Q_f é uma medida do potencial de ressonância da carga de ensaio de ilhamento.

Em um circuito ressonante paralelo, tal como uma carga de uma rede elétrica, o fator de qualidade Q_f é definido como:

$$Q_f = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (2.1)$$

em que,

Q_f é o fator de qualidade de um circuito ressonante paralelo;

R é a resistência da carga em Ohm;

C é a capacitância da carga em farad (incluindo capacitores shunt);

L é a indutância da carga em henry.

Q_f pode ser também determinado pela equação 2.2

$$Q_f = \frac{1}{P} \cdot \sqrt{|Q_L| \cdot |Q_C|} \quad (2.2)$$

em que

P é a potência ativa em watt;

Q_L é a potência reativa para carga indutiva em var indutivo;

Q_C é a potência reativa para carga capacitiva em var capacitivo.

Segundo CARVALHO et al. (2016), fator de qualidade é uma grandeza proporcional a razão entre a máxima energia armazenada e a energia dissipada em um ciclo e em uma dada frequência. Q_f da carga igual ou maior do que 2,5 permite uma maior oscilação do circuito na frequência de ressonância, dificultando detecção de ilhamento baseada em frequência. Isso ocorre devido a um maior potencial de ressonância da carga.

A NBR-IEC-62116-2012 determina que o valor apropriado do fator de qualidade utilizado para os procedimentos de ensaios dos inversores é $Q_f = 1$.

Vale salientar que a carga tem que ficar sempre ressonante para proporcionar um rendimento máximo ao inversor. Devido as possibilidades de variações de fator de qualidade nas cargas no sistema de GD, é necessário que os inversores tenham um sistema de *Phase-Locked Loop* (PLL) embarcados ou não, para detecção de variações de frequência e ângulo de fase, quando na ocorrência de um desligamento da rede de distribuição elétrica, ficando o inversor protegendo o sistema elétrico, operadores e usuários da rede elétrica.

2.4 *Phase-Locked Loop* (PLL)

No sistema da geração distribuída o PLL pode estar ou não residente no inversor, sendo fundamental para o sincronismo com a rede elétrica e também para informação de frequência para o sistema de proteção anti-ilhamento por meio da realimentação ao inversor. Então, no instante do ilhamento e dependendo do fator de potência da carga, o PLL poderá diminuir ou aumentar a frequência na saída do inversor para que a carga fique ressonante, ou seja com fator de potência unitário, proporcionando um rendimento máximo ao inversor. Dependendo do valor dessa frequência e da zona de não detecção haverá ou não a atuação do sistema anti-ilhamento.

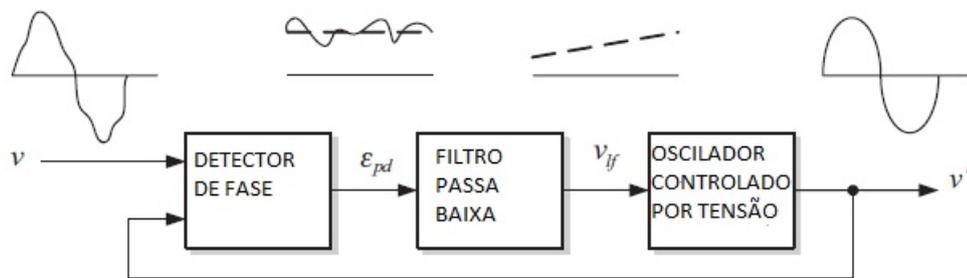
A detecção precisa e rápida da frequência e do ângulo de fase da onda fundamental da tensão da rede elétrica é de grande interesse para sistemas de controle e aplicações eletrônicas nos SEPs. Nos últimos anos, diferentes algoritmos e circuitos foram propostos no sentido de obter tais informações, com resposta dinâmica rápida, precisão em regime e robustez na presença de distorções harmônicas e/ou transitórios na tensão da rede. O PLL é um desses algoritmos. Com as informações por ele fornecidas é possível gerar ondas filtradas e sincronizadas com as medidas.

É constituído basicamente por um detector de fase, um filtro passa-baixas e um oscilador controlado por tensão. Este último é responsável pelo sinal que será comparado

com o sinal de entrada no detector de fase (PADUA et al., 2006).

A estrutura básica de um PLL é ilustrada na Figura 3. Consiste em três blocos fundamentais: O detector de fase, que gera um sinal de saída proporcional à diferença de fase entre o sinal de entrada, v , e o sinal gerado pelo oscilador interno do PLL, v' ; o filtro passa-baixa para atenuação dos componentes de alta frequência contidas no sinal de diferença de ângulo de fase; e um oscilador controlado por tensão, que gera na saída um sinal CA cuja frequência é deslocada em relação a uma determinada frequência central, em função da tensão de entrada fornecida pelo filtro passa-baixa (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011).

Figura 3 – Estrutura básica de um PLL

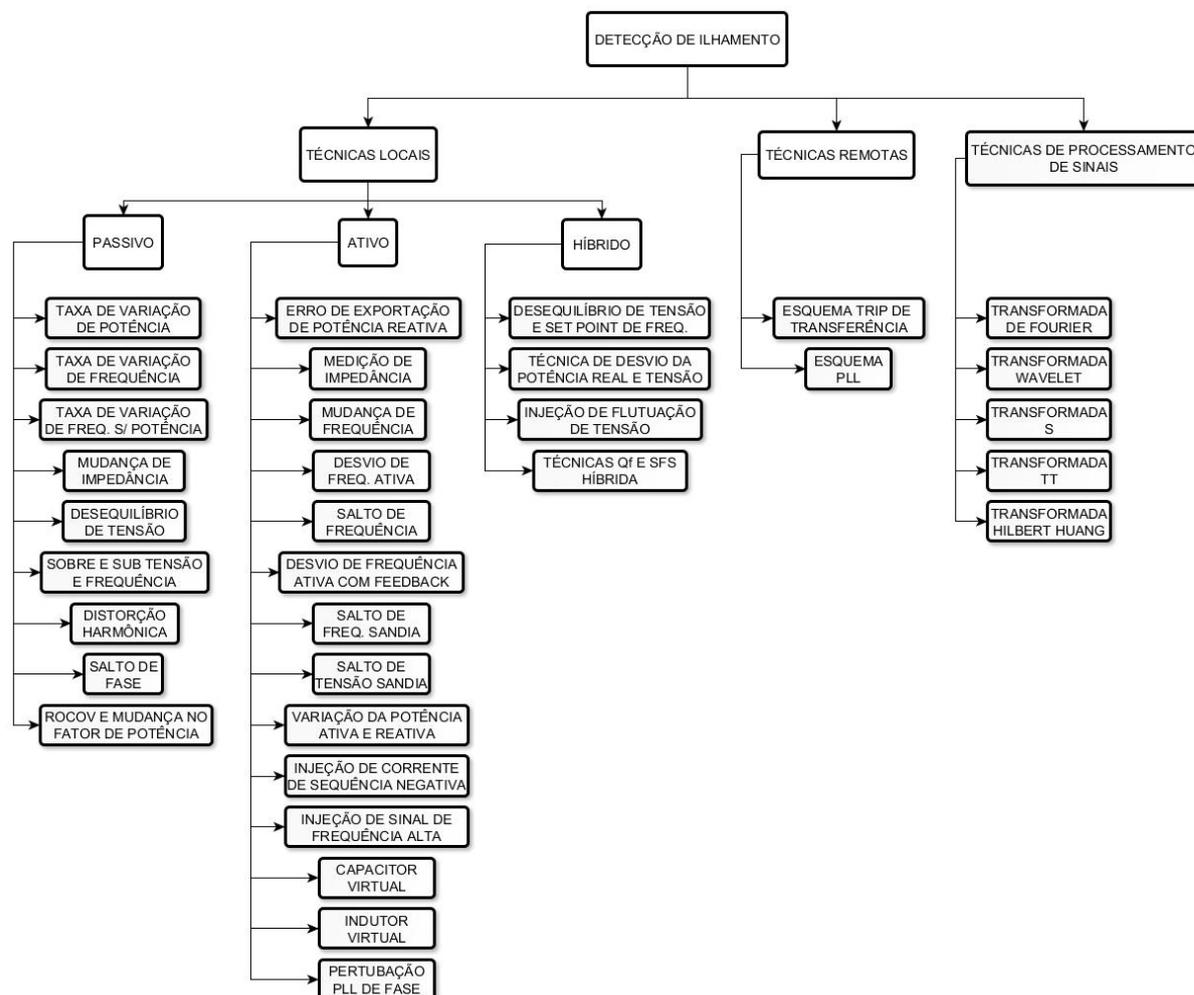


Fonte: Adaptado de Teodorescu, Liserre e Rodriguez (2011)

2.5 Técnicas de Proteção Anti-ilhamento

Segundo Raza et al. (2015) as técnicas de detecção de ilhamento são classificadas em técnicas remotas e locais. As técnicas locais são classificadas em passivas, ativas e híbridas. Destas, as técnicas passivas são mais vantajosas devido à menor degradação da qualidade de energia, menor custo e uso generalizado por utilitários de energia. No entanto, as principais limitações dessas técnicas são que elas possuem uma grande zona de não detecção e requerem uma configuração de limite. Várias técnicas de processamento de sinais e classificadores inteligentes tem sido utilizadas para superar as limitações dessas técnicas passivas. Técnicas de processamento de sinal, em particular, são adotadas devido à sua versatilidade, estabilidade, relação custo-benefício e facilidade de modificação. É apresentada na Figura 4 uma classificação dessas técnicas.

Figura 4 – Técnicas de detecção de ilhamento



Fonte: Adaptado de [Raza et al. \(2015\)](#)

A seguir é apresentada uma descrição geral sobre as técnicas da Figura 4, mostrando as principais vantagens e desvantagens das mesmas.

2.5.1 Técnicas remotas

As técnicas remotas envolvem algum tipo de comunicação entre a concessionária, os dispositivos de proteção presentes na rede elétrica e os geradores distribuídos. Em sistemas de proteção anti-ilhamento, o princípio consiste em monitorar o estado de todos os disjuntores da rede, desde a subestação responsável pelo trecho até o gerador distribuído. Na ocorrência de um evento de ilhamento, um sistema supervisor identifica a região isolada, e um sistema de telecomando aciona o desligamento do gerador distribuído. São técnicas que necessitam de sistemas de comunicação avançados entre a fonte de energia distribuída e a carga. A principal vantagem é que não possuem zonas de não detecção, apresenta tempo de resposta rápido, não impacta na qualidade de energia, alta confiabilidade e operam

eficazmente para vários sistemas de geração distribuída. Por outro lado, são técnicas de alto custo quando aplicadas em pequenos sistemas de GD.

Segundo [Balaguer-Álvarez e Ortiz-Rivera \(2010\)](#), a técnica remota de esquema *trip* de transferência envolve a transmissão de dados entre o inversor e a rede elétrica. Esses dados são usados para determinar quando o inversor deve parar de operar. A comunicação da operadora para detectar a ilha usa as linhas elétricas. Para detectar a ilha, o transmissor envia um sinal que pode ser detectado pelo receptor. Se houver uma interrupção ao detectar este sinal, o receptor pode enviar um sinal ao inversor para que ele pare de funcionar.

2.5.1.1 Técnicas passivas

Monitoram os parâmetros do sistema como: frequência, tensão e harmônicas no PCC. Apresentam as seguintes vantagens: baixo custo, rapidez e não causam impactos na qualidade de energia. Por outro lado, possuem uma grande zona de não detecção e podem ter atuações intempestivas e erros elevados.

Segundo [Severo et al. \(2011\)](#), a técnica passiva de sobre e sub tensão e frequência, sob o ponto de vista dos conversores, define que os mesmos devem ter recursos de proteção em seu *hardware* e *software* que monitoram frequentemente a tensão e frequência em sua saída. Tal monitoramento deve cessar o processamento de energia se algum desses dois parâmetros elétricos ultrapassarem os limites preestabelecidos pela norma. Essas proteções, têm a dupla função de proteger os equipamentos conectados à ilha e também servir de proteção anti-ilhamento.

2.5.1.2 Técnicas ativas

São inseridas no sistema perturbações de corrente, tensão, frequência e harmônicos, verificando-se o impacto dessas perturbações no sistema. Se o impacto for pequeno, a ilha permanece conectada ao SEP e as perturbações provocadas pelo inversor FV são injetadas para fora da ilha, mantendo os parâmetros no PCC praticamente inalterados. Se o impacto for considerável, a ilha será formada e a desconexão ao SEP será detectada. Tem como vantagem, frente as técnicas passivas, uma menor zona de não detecção e taxa de erro. Por outro lado, necessitam de equipamentos adicionais para injetarem as perturbações no sistema e apresentam uma menor qualidade de energia.

Segundo [Marchesan et al. \(2016\)](#), a técnica ativa de medição de impedância baseia-se no fato de que, durante a ocorrência de um ilhamento, o valor da impedância equivalente medida a partir da geração distribuída se altera. Durante a operação normal a impedância equivalente do sistema elétrico interligado é mais baixa. Por outro lado, no caso de um ilhamento, esta impedância tende a ser maior.

2.5.1.3 Técnicas híbridas

As técnicas de detecção de ilhamento híbridas funcionam basicamente com características combinadas das técnicas passivas e ativas e são aplicadas a sistemas complexos. Durante a detecção de ilhamento, a técnica passiva funciona como primária, operando em grandes desvios dos parâmetros, enquanto a técnica ativa funciona como secundária, operando quando os desvios dos parâmetros são muito pequenos e indetectáveis. Portanto, a combinação dessas técnicas melhorará o desempenho do sistema de proteção anti-ilhamento. Essas técnicas possuem uma zona de não detecção muito pequena e a degradação na qualidade da energia também é reduzida porque as perturbações são introduzidas somente quando há suspeita de ilhamento. No entanto, essa combinação torna o sistema dispendioso.

Segundo [Chang \(2010\)](#), a técnica híbrida de injeção de flutuação de tensão proposta tem como base dois estágios de procedimentos de detecção para alcançar maior eficácia. Durante o procedimento de detecção, o método de detecção passiva é usado como proteção primária, e o método de detecção ativo é o *backup*.

2.5.2 Técnicas de processamento de sinais

As técnicas de processamento de sinais podem ser utilizadas como técnicas de análises dos sistemas de proteção anti-ilhamento. Essa aplicação pode ser realizada quando se tem a necessidade de analisar o perfil do sinal de tensão em diversas faixas de frequência durante a ocorrência de um ilhamento em um SGD conectado a rede elétrica. Na subseção a seguir será abordado com mais detalhes sobre a utilização dessas técnicas.

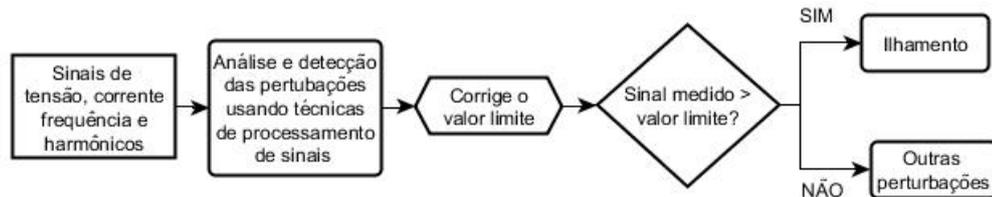
2.6 Técnicas de análises dos Sistemas de Proteção Anti-ilhamento

A confiabilidade das técnicas passivas é limitada e terá sempre uma ZND diferente de zero para pequenos desequilíbrios da energia. Assim, as técnicas passivas são combinadas com as técnicas ativas ([TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011](#)).

As técnicas de processamento de sinais para detecção de ilhas são usadas para melhorar o desempenho das técnicas passivas de detecção de ilhas. Versatilidade, estabilidade, relação custo-benefício e facilidade de modificação são as propriedades que as técnicas de processamento de sinais ajudam os pesquisadores a extrair as características ocultas dos sinais medidos para detecção de ilha. Com base nessas características extraídas, a decisão pode ser tomada sobre a ocorrência da ilha. São apresentados na Figura 5 as etapas básicas envolvidas na detecção de ilhas usando as técnicas de processamento de sinais. O processo inicia-se com a aquisição de dados de parâmetros elétricos, depois segue com análises dos sinais, em seguida os valores são corrigidos e comparados com valores de referências, finalizando com as decisões de ilhamento ou outras perturbações. As transformadas básicas

de processamento de sinais usadas para detecção de ilhas são as transformadas de Fourier, transformada S (*Stockwell transform*), transformada Hilbert Huang, transformada Wavelet e transformada TT (*time-time transform*) (RAZA et al., 2015).

Figura 5 – Fluxograma processamento sinais



Fonte: Adaptado de Raza et al. (2015)

Nas técnicas de processamento de sinais, as características desejadas são extraídas do sinal de entrada e comparadas com valores limites. A seleção dos valores limites é uma tarefa difícil e de grande importância. Se os valores estão configurados altos, então a ilha não será detectada, enquanto que se estiverem configurados muito baixos então haverá a detecção na GD mesmo para o caso de distúrbios. Para superar esta questão, classificadores inteligentes foram combinados com técnicas de detecção de ilhas baseadas em processamento de sinal. Os classificadores inteligentes comumente usados no processamento de sinais baseado nas técnicas de detecção de ilhas são a árvore de decisão (*Decision tree - DT*), rede neural artificial (*Artificial Neural Network - ANN*), rede neural probabilística (*Probabilistic Neural Network - PNN*), sistema de inferência neuro fuzzy adaptativo (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS*), floresta aleatória (*Random Forest - RF*), máquina de vetores de suporte (*Support Vector Machine - SVM*) e controle por lógica fuzzy. Esses classificadores inteligentes melhoraram a eficiência, velocidade, precisão e podem detectar ilhamento sem usar configurações de limite, como no caso de técnicas passivas baseadas em processamento de sinal comum. As etapas básicas envolvidas na detecção de ilhas usando classificadores inteligentes são mostradas na Figura 6. O processo inicia-se com a aquisição de dados de parâmetros elétricos, depois segue com análises dos sinais, em seguida são extraídas as características desejadas, finalizando com as decisões através do classificador inteligente para determinação de ilhamento ou outras perturbações (RAZA et al., 2015).

Figura 6 – Fluxograma classificador inteligente



Fonte: Adaptado de Raza et al. (2015)

No estudo e desenvolvimento das técnicas de processamento de sinais e classificadores inteligentes existem diversos trabalhos publicados conforme a seguir.

Segundo [Paiva \(2015\)](#), a transformada de Fourier (FT) é utilizada em diversas áreas da ciência como, por exemplo, em processamento de sinais e imagens. Os algoritmos baseados na análise de Fourier apresentam grande eficiência no processo de filtragem e na rejeição de componentes harmônicas. Entretanto, estes algoritmos apresentam problemas para sinais que não apresentam as mesmas componentes de frequência em toda a sua duração devido a uma única janela ser utilizada para analisar todas as frequências.

Segundo [Raza et al. \(2015\)](#), a transformada *wavelet* (TW) também é utilizada para a análise do sinal. É um modelo matemático semelhante a FT. Nesta transformada um sinal é decomposto em diferentes escalas de frequência. Representa um sinal nos domínios de tempo e frequência. Por isso, é adequado para examinar os sinais em aplicações em que deseja-se uma resolução em diferentes faixas de frequência. Tem sido amplamente utilizada em aplicações do sistema de energia, como detecção, transitórios devido a perturbação, eventos em qualidade de energia elétrica, extração de dados, proteção do sistema, e *denoising*. A transformada *wavelet* é mais vantajosa em comparação com transformadas baseadas em Fourier (STFT, FFT e DFT). Isto se deve ao fato que o tamanho da janela é fixo na transformada baseada em Fourier, mas varia na transformada *wavelet*. Portanto, as resoluções de tempo-frequência não são comprometidas. Além disso, a transformada *wavelet* determina informação de tempo e frequência simultaneamente para baixas e altas frequências por janelas longas e curtas, respectivamente.

[Lidula e Rajapakse \(2010\)](#), propõem uma nova abordagem baseada em reconhecimento de padrões para detecção de ilhamento em uma rede de distribuição. O método proposto utiliza sinais transitórios gerados durante um evento de ilhamento para detectar a formação da ilha. Um classificador com árvore de decisão é treinado para categorizar o evento transitório como ilhamento ou não-ilhamento. Para classificação foram extraídos a corrente transitória e sinais de tensão através da transformada discreta de *wavelet*. A técnica proposta é testada em um sistema de distribuição de média tensão com múltiplos geradores distribuídos. Os resultados indicam que esta técnica pode detectar com precisão os eventos de ilhamento dentro de 24 ms.

[Sharma e Singh \(2012\)](#) apresentam um esquema de detecção de ilhamento passivo baseado na transformada discreta de *Wavelet* (DWT). O modelo é baseado na medição de parâmetros do sistema em uma planta de GD, utilizando parâmetros de tensão, frequência, etc. A ideia principal era utilizar as mudanças espectrais nos componentes de frequência da tensão do PCC durante o ilhamento. O desempenho da *wavelet* foi testado com base em um esquema de ilhamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede, simulado utilizando as ferramentas Matlab / Simulink. O sistema discriminou os cenários de ilhamento e não-ilhamento em um tempo menor que 25 ms.

Segundo [Shayeghi e Sobhani \(2014\)](#), recentemente, técnicas baseadas em transformada *wavelet* foram aplicadas para detecção de ilhamento. Os mesmos apresentam uma nova técnica para detecção de ilhamento de GD com base na análise energética dos coeficientes *wavelet* e sistema de inferência fuzzy neuro adaptativo. A característica saliente do esquema proposto foi reduzir a ZND para próximo de zero. Todas as possíveis comutações de cargas lineares e não lineares, partida de motor, comutação de banco de capacitores, condição de comutação e ilhamento foram consideradas e os possíveis parâmetros passivos, como tensão, corrente e potências foram medidos. Os sinais foram selecionados para detecção de ilhamento e aplicados ao sistema de aprendizagem neuro-fuzzy. Os resultados da simulação confirmam o desempenho do algoritmo de detecção proposto em comparação com os métodos existentes.

[Freitas \(2016\)](#) propõe uma implementação de um algoritmo para detectar distúrbios de ilhamento no sistema elétrico, caracterizados por situações de sub ou sobretensão. O algoritmo também quantiza o tempo em que o sistema está operando nestas condições, para detecção de possíveis problemas que serão causados no sistema de energia elétrica. Com a finalidade de atingir este objetivo, foi empregada a técnica de *wavelet* de análise de multirresolução (AMR) para detecção dos distúrbios gerados. De acordo com os resultados apresentados nas simulações com a utilização da técnica AMR da transformada *wavelet*, utilizando-se a *wavelet* mãe Symlet, foi possível verificar a detecção dos distúrbios de ilhamentos com bastante precisão, no momento exato de sua ocorrência. Algumas famílias de *wavelets* não foram satisfatórias para o estudo principal, proposto no trabalho, por não realizarem a detecção do distúrbio no instante exato de sua ocorrência.

[Cesar \(2018\)](#) apresenta um estudo sobre a aplicação da transformada *wavelet* no monitoramento e análise da qualidade da energia elétrica e na detecção de ilhamento em sistemas de geração distribuída, abordando como estudo de caso um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Foi proposta uma análise multirresolução que utiliza a transformada *wavelet* discreta para análise da tensão no ponto de conexão comum entre o sistema de geração e a rede. O desvio padrão e a variação dos coeficientes de detalhes da transformada foram utilizados para a detecção e a classificação dos distúrbios. Na aplicação do método, foram consideradas tensões senoidais puras e com diferentes tipos de distúrbios: afundamento, elevação, interrupção, transitórios oscilatórios e ruídos. E foram simulados três casos de detecção de ilhamento dinâmica em um sistema fotovoltaico conectado à rede. Os resultados obtidos nos casos de ilhamento comprovaram a eficácia do algoritmo implementado em detectar condições de ilhamento em tempo real. O algoritmo proposto apresenta um método de baixa complexidade computacional, tempo de resposta rápido e que utiliza uma frequência de amostragem (15,36 kHz) compatível com a frequência de amostragem padrão dos Registradores Digitais de Perturbação (RDP).

[Raza et al. \(2020\)](#) propõem uma análise de parâmetros do sistema de energia para

detecção de ilhamento usando transformada *wavelet*. Os valores de diferentes parâmetros básicos do sistema de potência, como potência ativa, potência reativa, tensão e corrente, foram obtidos por simulações em um sistema de distribuição de 11 kV modelado em MATLAB / Simulink de acordo com o padrão IEEE 1547. Esses valores de parâmetros foram selecionados para várias situações de ilhamento e não ilhamento. Em primeiro lugar, a análise de sensibilidade foi feita usando diferentes *wavelets* mãe para selecionar a mais adequada e, em seguida, as condições de ilhamento e não ilhamento foram analisadas. Como resultado, descobriu-se que as características extraídas da potência reativa mostrou a maior capacidade de distinguir eventos de ilhamento de não ilhamento. Além disso, esta análise poderá servir como uma diretriz para pesquisadores e proprietários de sistemas de geração distribuída na seleção dos parâmetros para a técnica de detecção de ilhamento inteligente.

Sabarigiri e Gnanadass (2019) projetam um sistema de medição e identificação de problemas de qualidade de energia elétrica em cargas elétricas, como aumento e queda de tensão, harmônicas, etc, e suas análises usando a ferramenta da transformada *wavelet*. A medição dos problemas de qualidade de energia foi demonstrada em um sistema prático de distribuição de energia com cargas elétricas variáveis usando o analisador de qualidade de energia Fluke 435 Série II. Cinco níveis com *wavelet* Daubechies 4 (Db4) foram suficientes para obter informações necessárias para as análises. No espaço de trabalho do MATLAB, o sinal foi gravado e importado para uma *wavelet toolbox* para análise. Na caixa de ferramentas *wavelet (toolbox)*, db4 foi usada para detecção de sinal de *sag* e *swell* com frequência de amostragem de 4 kHz. A seleção da *wavelet* mãe exata foi essencial para reconhecer distúrbios de qualidade de energia. Os resultados das simulações apresentados através das decomposições da transformada *wavelet* mostram que a mesma é apropriada para analisar problemas de qualidade de energia, quando a informação tempo-frequência é necessária simultaneamente.

Fatama, Haque e Khan (2019) propõem uma classificação de ilhamento baseada em vários recursos técnicos para SGDs através do desenvolvimento de um algoritmo observando as várias questões associadas a sistemas fotovoltaicos conectados à rede durante condição de ilhamento e seus métodos de detecção. O principal objetivo foi desenvolver um conjunto de dados, que seja possível analisar todos os cenários possíveis de ilhamento. Um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede foi simulado no ambiente MATLAB / Simulink para determinar o estudo sobre ilhamento. Transformada *wavelet* e técnicas de aprendizado de máquina foram adaptados no desenvolvimento do processo. Várias técnicas de detecção de ilhamento foram adotadas para detectar a variação no sistema durante uma condição anormal. A detecção de ilhamento foi explorada usando máquina de vetor de suporte e a classificação foi realizada para determinar se o sistema está operando em modo de ilhamento ou não. A técnica de transformação *wavelet* foi usada para extração de características da tensão medida no PCC. As características obtidas são fornecidas como entrada para o

classificador SVM para especificar se o sistema éilhado ou não. Os resultados apresentam uma precisão de 100 % nas condições de treinamento e teste com tempo de treinamento de 18,9 segundos e tempo de detecção de 20 ms.

Kolli e Ghaffarzadeh (2020) apresentam uma nova abordagem de processamento de sinal baseada no algoritmo *phaselet* proposto para detectar o fenômeno do ilhamento. Para avaliar o desempenho da técnica proposta, vários eventos de ilhamento e não ilhamento foram implementados usando um sistema FV conectado a rede modelado em através das ferramenta *MATLAB / Simulink* baseados nas normas UL-1741 e IEEE 1547. Os resultados da simulação mostraram que a abordagem proposta foi capaz de distinguir com precisão a condição de ilhamento de outros distúrbios de qualidade de energia. Detecção de ilhamento em 0,02 s, zona de não detecção zero (NDZ) e nenhuma degradação da qualidade de energia foram as principais vantagens do método proposto.

Yilmaz e Bayrak (2019) propõem um método de detecção de falha baseado em transformada *wavelet* com o objetivo de superar as limitações dos métodos convencionais. O método foi implementado usando apenas o sinal de tensão para detectar os problemas de qualidade de energia automaticamente em uma microrrede baseada em sistemas FV. O sinal de tensão foi recebido no PCC por uma placa de aquisição de dados DAC e processado no *software Labview*. A decomposição foi realizada em cinco níveis usando a *wavelet* mãe Daubechies 8 (db8). O método proposto foi testado no laboratório para alguns eventos de qualidade de energia (queda de tensão / aumento de tensão). Os coeficientes de detalhe e o coeficientes de aproximação também foram determinados. Um sub programa com diferentes estudos de simulação foi realizado, e os mais adequados parâmetros foram determinados para definir o tipo de *wavelet*, nível de *wavelet*, e frequência de amostragem a ser usada no método proposto para detecção de falhas. Os resultados indicaram que a técnica proposta detecta a falha em tempo real com precisão, sendo um método insensível a ruído. A interrupção da tensão foi detectada com alta precisão sem usar qualquer filtragem de ruído, sendo confiável para microrredes.

Bayrak (2018) apresenta um método de detecção de falha baseado na transformada *wavelet* para geradores distribuídos baseados em energia de hidrogênio com o objetivo de superar falhas dos métodos convencionais de detecção de distúrbios de qualidade de energia. O método proposto usa a transformada *wavelet* discreta e Daubechies de ordem 4 para detectar o aumento de tensão, queda de tensão, interrupção de tensão e distúrbios transitórios em um sistema HEBDGs (*Integration of hydrogen energy-based distributed generators*). Os resultados comprovaram que os métodos convencionais não são capazes de detectar alguns distúrbios de qualidade de energia de forma adequada. Os resultados também sugerem que o método proposto é prático para os sistemas HEBDG para fornecer uma conexão de segurança.

Vatani, Sanjari e Gharehpetian (2013) propõem um método para detecção de

ilhamento na rede de distribuição com alta penetração de GDs. O método proposto é baseado na corrente da concessionária medido no lado da microgeração, antes do disjuntor principal, e processado pela transformada *wavelet* discreta. A *wavelet* db2 foi aplicada como a onda-mãe para extrair a energia do coeficiente de detalhe dos sinais de corrente. O sinal foi decomposto em cinco níveis de *wavelet*. O método proposto foi simulado utilizando o *software* PSCAD / EMTDC e o sinal da concessionária foi processado pelo *software* MATLAB / Toolbox para análise DWT. A DWT extraiu o recurso para distinguir entre eventos que causam a condição de ilhamento e outros distúrbios no sistema de energia. A condição de ilhamento foi detectada quando a variação do parâmetro medido excedia o limite permitido. Por causa da mudança no ponto de medição para antes do disjuntor principal do lado da microgeração, este método detectou condições de ilhamento mais rápido do que os outros métodos. O método proposto poderá ser útil para detecção de ilhamento nas redes com múltiplas gerações distribuídas. Para confirmar a precisão deste método, o mesmo foi validado por meio de três cenários: falta trifásica à terra do lado do disjuntor da rede elétrica, redução de carga e redução da frequência de 60 Hz para 59,6 Hz. Os resultados da simulação mostram que o método proposto distingue entre condições de ilhamento e não ilhamento com precisão, apoiando a robustez do método proposto para a aplicação considerada.

Lim et al. (2019) apresentam os resultados de estudos de caso sobre a falha na detecção da operação de ilhamento através de dispositivos experimentais capazes de simular uma fonte de energia fotovoltaica e sistema de armazenamento de energia. O teste foi realizado de acordo com várias condições estabelecidas nas normas sobre a relação de potência ativa com a potência reativa e utilizando fator de qualidade um. No entanto, quando dois inversores foram operados ao mesmo tempo sob a condição de ilhamento, a detecção de ilhamento pode falhar e os dois inversores continuarem a alimentar a carga RLC conectada. Diferentes algoritmos usados pelos fabricantes de sistemas de inversores para detectar ilhamento podem causar esse fenômeno. Portanto, é necessário um novo padrão de teste de inversores para detectar ilhamento, pois, em alguns casos, dois inversores em paralelo podem não detectar ilhamento pois quando um inversor muda a frequência ou o sinal de tensão para detectar uma ilha isolada, o outro inversor pode falhar em detectar ilhamento se seu sinal for adicionado ao sinal de outro inversor e eles compensarem um ao outro.

Abdullah et al. (2019) apresentam uma técnica de redução de ruído baseada em *wavelet* para medição do sinal de descarga parcial. O sinal foi medido a partir do cabo de energia de média tensão na subestação de distribuição de 11 kV. Nesta pesquisa, três *wavelets* principais foram escolhidas, a saber, Symlets, Daubechies e Coiflets. A análise foi realizada no ambiente de *software* MATLAB e a Daubechies 2 (db2) foi identificada como a melhor *wavelet* mãe no décimo nível de decomposição com tipo de limite suave. A partir disso, o processo de remoção de ruído para a análise do sinal foi medido. A bobina de

Rogowski ¹ foi usada como um sensor de medição. O sinal de descargas parciais foi medido junto com o ruído da medição no local. No geral, a Daubechies db2 é selecionada como o melhor nível de todas as *wavelets* mãe com base nas análises realizadas. Os resultados mostraram que Daubechies 2 pode ser usada como *wavelet* mãe como técnica de eliminação de ruído para obtenção de um sinal puro.

Marques et al. (2018) propõem uma metodologia para identificar e discriminar diferentes condições de falhas internas em transformadores de potência, bem como a discriminação entre condições operacionais transitórias que podem afetar a proteção diferencial. Além disso, para melhorar a confiabilidade da proteção do transformador, visa distinguir condições transitórias, como correntes de *inrush*, de condições de falhas internas. A identificação de transientes foi baseada na análise e monitoramento dos coeficientes de detalhe do 1º e 3º níveis por meio da decomposição DWT, usando a *wavelet* mãe Daubechies 4 (db4). Vários cenários de falhas foram simulados usando um sistema de energia de teste. Para obter os dados, um sistema elétrico foi modelado no *software* ATP (*Alternative Transient Program*). A metodologia foi testada em várias condições operacionais, incluindo falha *turn-to-turn* ² de até 5 % do enrolamento, e foi promissor nas identificações de transitórios em transformadores de potência.

Paiva et al. (2020) propõem um sistema híbrido baseado em *wavelets* (WB-HIDS) para detecção de condições de ilhamento em microrredes de corrente alternada. A implementação do WB-HIDS emprega um algoritmo CWT modificado, para realizar sua implementação em tempo real (RT-CWT). O uso do RT-CWT melhora a análise de sinal não estacionário gerando índices relacionados à qualidade de energia. A identificação do ilhamento é realizada através da análise de um conjunto de dados composto por índices de qualidade de energia, como amplitude de tensão, tempo de duração do evento, grau de desbalanceamento, frequência do sistema, impedância da rede e ângulo de fase. Cenários operacionais como curtos-circuitos (bifásicos e trifásicos), circuito aberto e ocorrência de ilhamento, foram realizados em uma microrrede CA experimental para avaliar a eficácia da do método proposto. As falhas produziram variações significativas em todos os índices estimados e apresentaram padrões diferentes em comparação com os casos de ilhamento. O WB-HIDS proposto apresentou um desempenho esperado para detectar condições de ilhamento e distinguir este evento de possíveis de ocorrências de falhas.

¹ Dispositivo eletrônico para medição de corrente elétrica, nomeada com o nome de Walter Rogowski. Em formato toróide, é um enrolamento uniformemente distribuído em um núcleo de material não magnético. A bobina de Rogowski tem a importante propriedade de medir o valor da corrente elétrica, independentemente da geometria do condutor. Seu funcionamento está fundamentado na Lei de Ampère, e na Lei de Faraday-Neumann-Lenz. Esta bobina fornece um sinal de saída em tensão elétrica. Devido ao sinal ter uma amplitude relativamente baixa concomitante com a presença de ruídos elétricos sobrepostos ao sinal mensurado, este deve ser tratado eletronicamente e amplificado.

² Um tipo de curto-circuito ao qual os transformadores de potência estão sujeitos durante sua operação e que são responsáveis por 70% - 80% das falhas em transformadores de potência, sendo a condição de falha entre espiras. Esses tipos de falhas são causados pela degradação do isolamento do enrolamento devido ao desgaste térmico, elétrico e mecânico.

Allan e Morsi (2021) propõem o uso da CNN (*Deep Learning Neural Networks*) para detecção de ilhamento passivo em uma microrrede com um inversor baseado em sistema fotovoltaico conectado à rede. O estudo considerou 66 casos e 31 recursos que foram extraídos das medições do sistema local usando a transformada *wavelet* contínua. O conjunto de dados foi usado para treinar a rede CNN com 100 % de precisão de treinamento. A precisão e o tempo de detecção comprovam que esta nova abordagem tem excelente desempenho, e capaz de detectar o ilhamento dentro de 2 s.

Khan et al. (2022) apresentam um levantamento das diversas técnicas de detecção de ilhamento desenvolvidos na literatura com identificação das suas vantagens e desvantagens. Uma estratégia de aprendizado de máquina baseada em processamento de sinal é proposta para superar as desvantagens das técnicas existentes na literatura técnica atual. A parte de processamento de sinal é implementada com a transformada *wavelet*, e um SVDD (*Support Vector Data Descriptor*) é treinado como classificador de aprendizado de máquina. Para avaliar a operação da abordagem proposta, a análise experimental é realizada em um sistema fotovoltaico de 4 kWp conectado à rede em diferentes condições de ilhamento. Os resultados identificaram 97,2 % de precisão de treinamento, 100 % de precisão de teste e um tempo médio de detecção inferior a 25 ms para todas as condições de teste.

A partir da síntese dos trabalhos apresentados acima foi verificada a importância do uso da transformada *wavelet* nas análises de sinais em sistemas elétricos, pois através das mesmas pode-se fazer análises de sinais no domínio do tempo e frequência. Foi visto também a importância da utilização da *wavelet* mãe da família Daubechies para detecção de ilhamento, análises de transitórios e estudos de qualidade de energia, pois através da mesma ser pode-se distinguir eventos que causam ilhamento de outros distúrbios. Os estudos foram relacionados em artigos recentes de revistas internacionais tratando de detecção de ilhamento, qualidade de energia, distúrbios em transformadores de potência e outros relacionados com transitórios em sistemas elétricos. A seguir, será feita uma descrição detalhada sobre a transformada *wavelet*, abordando suas principais definições e características.

2.7 Transformada Wavelet

Nas análises de sinais não estacionários através da transformada de Fourier (TF) não são obtidas informações sobre quando ocorre uma oscilação no sinal, ela só fornece informações de frequência (as oscilações que compõem o sinal). A Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) é uma solução para obter uma localização no tempo e na frequência na decomposição de um sinal. Ela é uma versão da transformada de Fourier que utiliza janelas no tempo, e seus respectivos deslocamentos, para decompor o sinal no tempo e na frequência. Uma desvantagem da STFT é que um único tamanho da janela é utilizada

para analisar toda extensão do sinal, fazendo com que a resolução tempo-frequência seja fixa (CESAR, 2018).

As *wavelets* foram introduzidas pelo matemático húngaro A. Haar, em 1909. Elas foram aplicadas pela primeira vez em geofísica para a análise de dados sísmicos. Uma das principais razões do desenvolvimento das *wavelets* foi a possibilidade de uma análise mais detalhada de sinais não estacionários que não podem ser detalhados devidos as limitações através da transformada de Fourier (FT) e da Transformada de Fourier de tempo curto (STFT).

Em 1983, o geofísico francês Jean Morlet sugeriu uma alternativa para a STFT para obter uma melhora na resolução dos transitórios de altas frequências como também, na resolução de frequência para as componentes de baixas frequências. Ele propôs o uso de versões escalonadas e deslocadas de uma única função para a análise de dados sísmicos. Para isso, Morlet introduziu primeiramente a ideia de *wavelets* como uma família de funções construídas por meio de translações e dilatações de uma única função chamada de *wavelet* mãe (CESAR, 2018).

Em 1985, o engenheiro eletricitista e matemático francês Stephane Mallat proporcionou um grande impulso às *wavelets* por meio de seu trabalho em processamento digital de imagens.

Em 1989, baseado nos resultados de Mallat, o matemático francês Yves Meyer construiu a primeira *wavelet* não-trivial (suave). As *wavelets* de Meyer são continuamente diferenciáveis, contudo, elas não possuem suportes compactos³.

Poucos anos mais tarde, a física e matemática belga Ingrid Daubechies usou os trabalhos de Mallat para construir um conjunto de bases ortonormais⁴ de *wavelets* suaves, continuamente diferenciáveis e com suportes compactos. Os trabalhos de Daubechies ainda são considerados os alicerces das aplicações atuais de *wavelets* (CESAR, 2018).

Em aplicações de análises de distúrbios do sistema elétrico de potência, a família Daubechies é uma das mais utilizadas (PAIVA, 2015).

2.7.1 Transformadas *wavelet* contínua e discreta

Segundo Freitas (FREITAS, 2016), a TW é uma excelente ferramenta e bem aceita para uma ampla faixa de sinais que não são periódicos e que podem conter ambos os componentes senoidais e de impulso, como os sinais típicos nos transitórios de sistemas de potência.

³ Anulam-se completamente fora de um intervalo finito de tempo.

⁴ Em algebra linear, dois vetores em um espaço vetorial são ortonormais se forem vetores ortogonais e unitários. Um conjunto de vetores formam um conjunto ortonormal se todos os vetores no conjunto são mutuamente ortogonais e todos de comprimento unitário. Um conjunto ortonormal na qual forma uma base, se chamará base ortonormal.

A TW pode ser encontrada de duas formas:

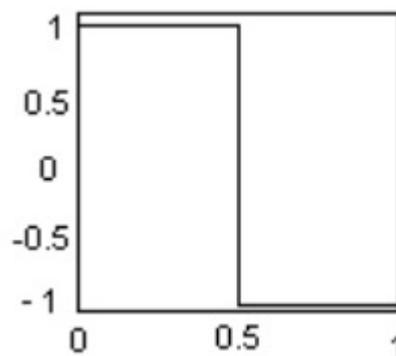
- A Transformada *wavelet* Contínua (TWC): Faz o mapeamento de uma função de uma variável contínua em uma função de duas variáveis contínuas.
- A Transformada *wavelet* Discreta (TWD): Decompõe um sinal discretizado em diferentes níveis de resolução. A Transformada *wavelet*, no domínio discreto no tempo, é uma técnica que realiza análise de sinais não estacionários. É uma técnica já bastante utilizada como uma alternativa ao método clássico da STFT (FREITAS, 2016).

Segundo Polikar (2002), embora a transformada *wavelet* contínua discretizada permita o cálculo da transformada *wavelet* contínua por computadores, ela não é uma transformada discreta verdadeira. Na verdade, a série *wavelet* é simplesmente uma versão de amostrada da TWC, e as informações que ela fornece são altamente redundantes no que diz respeito à reconstrução do sinal. Essa redundância, por outro lado, requer uma quantidade significativa de tempo de computação e recursos. A transformada *wavelet* discreta (TWD), por outro lado, fornece informações suficientes tanto para a análise quanto para a síntese do sinal original, com redução significativa no tempo de cálculo. A TWD é consideravelmente mais fácil de implementar quando comparado à TWC.

2.7.2 Famílias *wavelets*

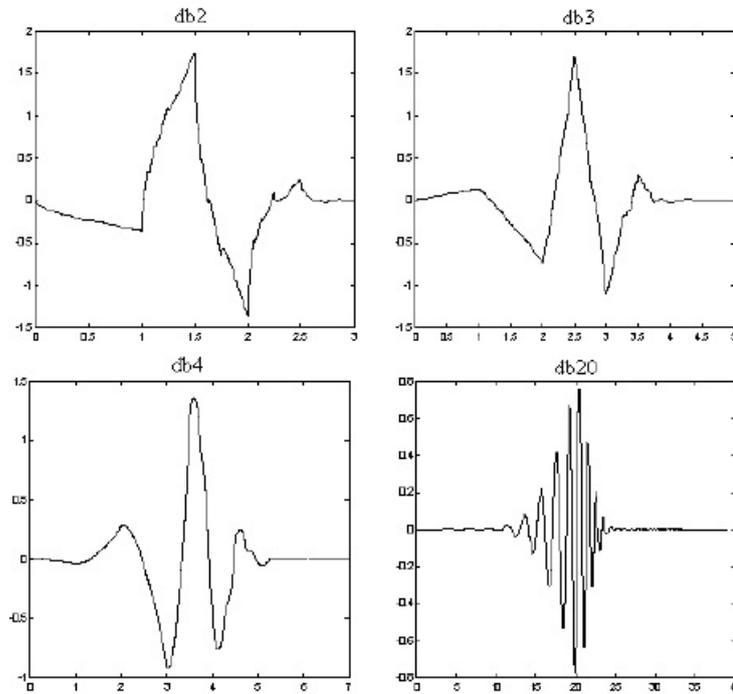
Existem diversas famílias de funções *wavelet* que podem ser utilizadas para análises contínuas e discretas. A escolha da *wavelet* mãe é determinada pelas características do sinal ou da imagem e a natureza da aplicação. Vários formatos de *wavelets* são ilustrados a seguir nas Figuras 7 a 10.

Figura 7 – Wavelets de Haar - haar



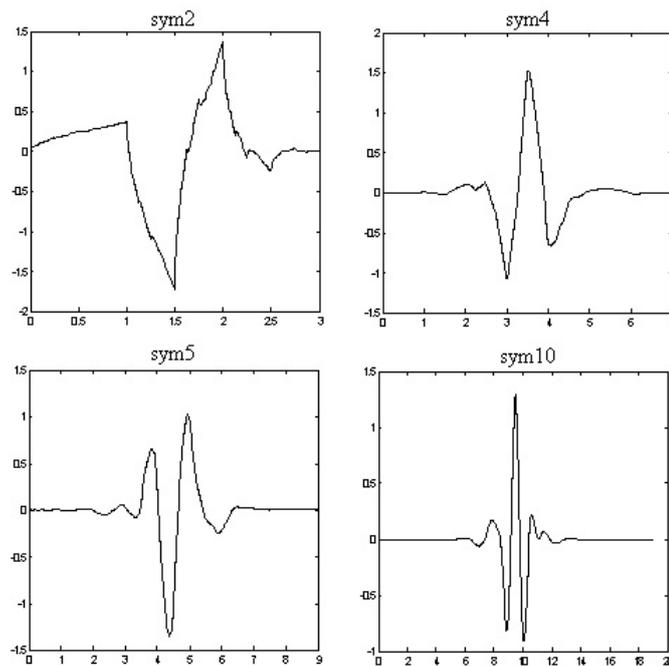
Fonte: (FILHO, 2003)

Figura 8 – Wavelets Daubechies - dbN, em que db refere-se a *wavelet* mãe da família Daubechies e o fator N trata do nível da mesma, que está relacionado à resolução ou número de pontos da *wavelet*

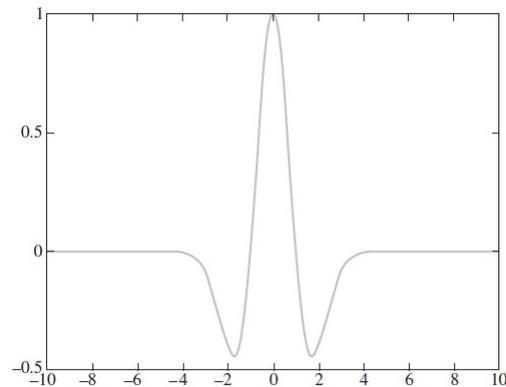


Fonte: (FILHO, 2003)

Figura 9 – Wavelets Symlets - symN, em que sym refere-se a *wavelet* mãe da família Symlets e N trata do nível da mesma, que está relacionado à resolução ou número de pontos da *wavelet*



Fonte: (FILHO, 2003)

Figura 10 – *Wavelet* Chapéu Mexicano - mexh

Fonte: (WEEKS, 2012)

2.7.3 Escalonamento e translação

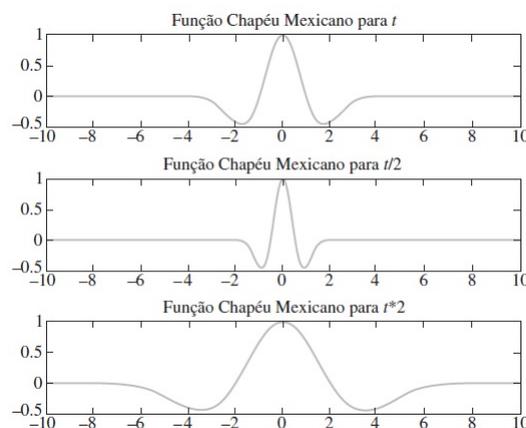
A transformada *wavelet* convolve o sinal de entrada por meio dos escalonamentos (dilatações e contrações) e dos deslocamentos (translações no tempo).

Escalar uma *wavelet*, significa dilatá-la ou comprimí-la, ou seja, introduzir um fator de escala conforme apresentado na Figura 11.

Segundo WEEKS (2012) a Figura 11 ilustra a função Chapéu Mexicano, definida através da Equação 2.3, para três parâmetros t diferentes. É apresentada a função Chapéu Mexicano original $\psi(t)$ na parte superior, seguida por $\psi(t/2)$ na parte central e $\psi(2t)$ na parte inferior. Nota-se que o eixo x apresenta o t original, com os valores retornados pela função ao longo do eixo y .

$$\psi(t) = (1 - t^2).e^{-t/2} \quad (2.3)$$

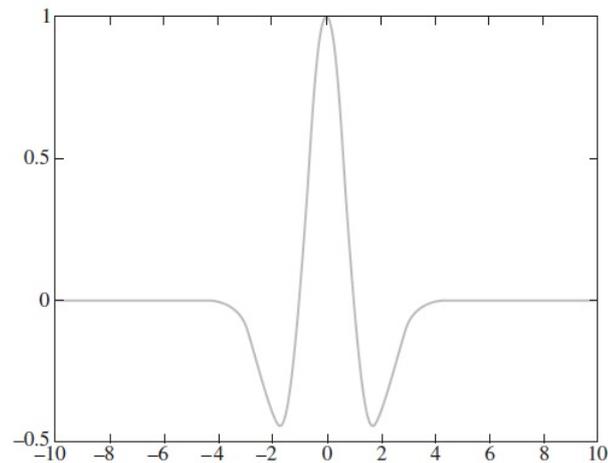
Figura 11 – Escalonamento de uma função chapéu mexicano



Fonte: (WEEKS, 2012)

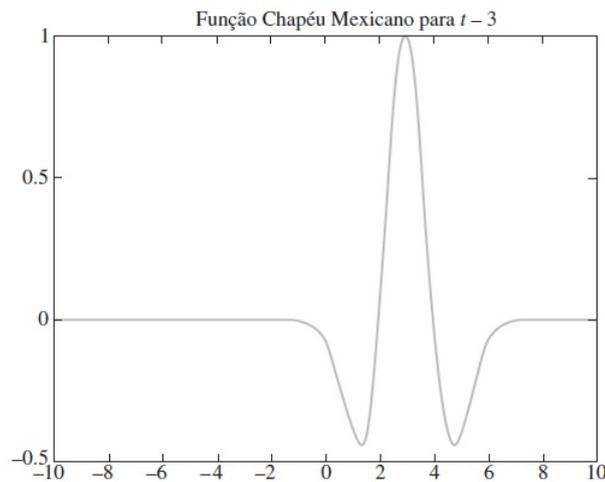
Transladar uma *wavelet*, significa deslocá-la no eixo do tempo conforme ilustram as Figuras 12 e 13. Tomando como referência a Figura 12, observa-se na Figura 13 que houve um deslocamento de $(t-3)$.

Figura 12 – Wavelet Chapéu Mexicano - mexh



Fonte: (WEEKS, 2012)

Figura 13 – Traslção da função chapéu mexicano da Figura 12



Fonte: (WEEKS, 2012)

2.7.4 Análise multirresolução

O conceito de multirresolução está relacionado com o estudo de sinais ou imagens em diferentes níveis de resolução. A resolução de um sinal é uma descrição qualitativa associada com seu conteúdo de frequência. A largura da janela mede a resolução de análise do sinal. Mallat formulou a ideia de análise multirresolução (AMR) no contexto de análise *wavelet*. A ideia fundamental da AMR é representar uma função $f(t)$ como um limite de sucessivas aproximações, cada qual sendo uma versão mais detalhada da função $f(t)$. Estas

sucessivas aproximações correspondem a diferentes níveis de resolução (escalas) (CESAR, 2018).

A AMR é projetada para fornecer boa resolução de tempo e baixa resolução de frequência em altas frequências e boa resolução de frequência e má resolução de tempo em baixas frequências. Essa abordagem faz sentido, especialmente quando o sinal em mãos tem componentes de alta frequência para curtos períodos de tempo e componentes de baixa frequência para longos períodos de tempo. Felizmente, os sinais encontrados em aplicações práticas costumam ser desse tipo (POLIKAR, 2002).

2.7.5 Aproximações e Detalhes

Segundo Polikar (2002), a transformada *wavelet* contínua é calculada mudando a escala da janela de análise, mudando a janela no tempo, multiplicando pelo sinal e integrando-se ao longo de todos os tempos. No caso discreto, filtros de diferentes frequências de corte são usados para analisar o sinal em diferentes escalas. O sinal é passado por uma série de filtros passa-altas para analisar as altas frequências sendo passado por uma série de filtros passa-baixas para analisar as baixas frequências.

O cálculo da transformada *wavelet* discreta através do uso de filtros, é a forma mais eficiente de aplicação da transformada *wavelet*. A decomposição *wavelet* pode ser feita através de bancos de filtros organizados em oitavas sucessivas⁵, em que meias faixas inferiores são recursivamente decompostas em um canal passa-baixas e um canal passa-altas. Os filtros passa-baixas estão relacionados aos filtros escala e aos coeficientes de aproximações da TWD e os filtros passa-altas estão relacionados aos filtros *wavelets* e aos coeficientes de detalhes da TWD. Os coeficientes dos filtros dependem da função *wavelet* mãe utilizada (MALLAT et al., 2009).

As componentes de baixa frequência do sinal estão relacionadas e são melhor representadas pelos coeficientes de aproximações que indicam a sua identidade (componentes fundamentais).

As componentes de alta frequência do sinal estão relacionados e são melhor representadas pelos coeficientes de detalhes como que se proporcionassem um “*zoom*”, para melhor observação dos ruídos e distorções de alta frequência.

Segundo Polikar (2002), a resolução do sinal, que é uma medida da quantidade de informações detalhadas no sinal, é alterada pelas operações de filtragem, sendo a escala alterada pelas operações de aumento e redução da resolução (subamostragem). Subamostrar um sinal corresponde à redução da taxa de amostragem ou à remoção de algumas das amostras do sinal.

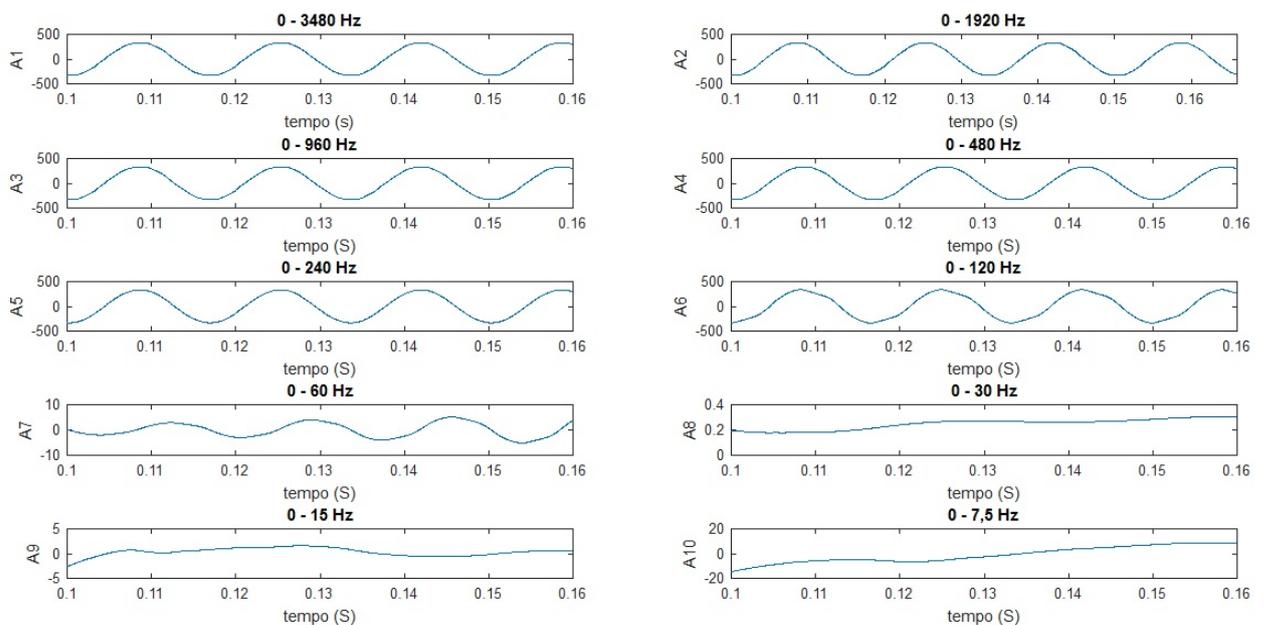
⁵ A multirresolução corresponde vagamente à duplicação de frequência presente na música, dando origem ao termo oitavas de resolução. Em música, uma oitava é o intervalo entre uma nota musical e outra com a metade ou o dobro de sua frequência.

O processo de decomposição pode ser interativo com decomposições sucessivas, permitindo que o sinal seja dividido em várias componentes com resoluções cada vez menores. Teoricamente, pode-se decompor o sinal indefinidamente. Na prática é selecionado um número satisfatório de níveis, tomando como base as faixas de frequências que se deseja analisar. Nesse trabalho são utilizadas decomposições de sinais em 10 níveis para analisar os distúrbios provocados por transitórios de frequências relacionados a sistemas de detecção de ilhamento.

Nas Figuras 14 e 15 são representados os coeficientes de aproximações e detalhes de um sinal de tensão adquirido em uma tomada elétrica de uma bancada com valor eficaz de 220 V, frequência fundamental de 60 Hz e uma frequência de amostragem de 15,36 kHz.

Durante a aquisição de dados não foram provocados distúrbios na rede elétrica. Utilizou-se a família *wavelet* Daubechies nível 5 (db5) com decomposição em dez níveis.

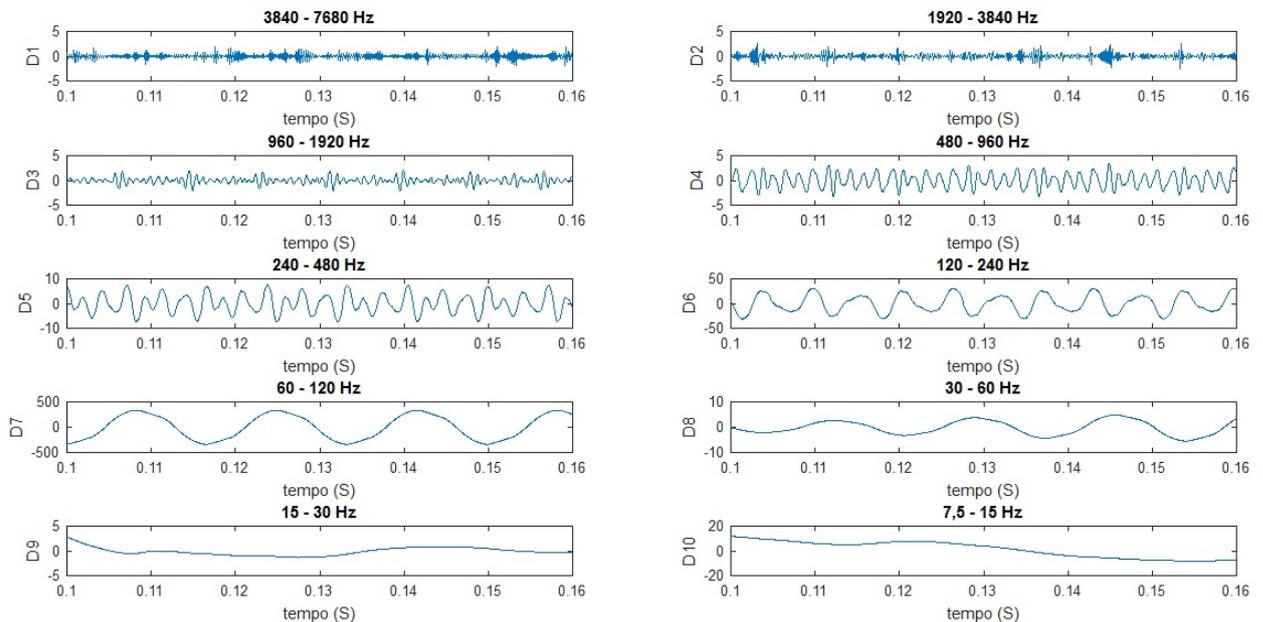
Figura 14 – Transformada *wavelet* - Decomposição dos coeficientes de Aproximação de um sinal de tensão



Fonte: Autoria Própria

A Figura 14 está relacionada com a decomposição dos coeficientes de aproximações, sendo ilustrados apenas para apresentar as possibilidades quando se deseja realizar análises em sinais de baixa frequência (componentes fundamentais), o que não é o objetivo desse trabalho. Pode-se observar na referida figura que os níveis de aproximações A1 a A6 englobam a forma de onda na frequência de 60 Hz. O nível A7 está no limite de transição, não ficando bem definido. Os demais níveis A8 a A10 estão com as faixas de frequência fora da frequência fundamental de 60 Hz.

Figura 15 – Transformada *wavelet* - Decomposição dos coeficientes de Detalhes de um sinal de tensão



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 15 é apresentada a decomposição dos coeficientes de detalhes que estão relacionados aos sinais de alta frequência. Como não foram provocadas perturbações durante a aquisição do sinal de tensão, pode-se observar em todos os detalhes, uma forma de onda sem destacar a ocorrência de distúrbio. Como o nível de detalhe D7 está na faixa de frequência de 60 a 120 Hz, que envolve a frequência fundamental de 60 Hz, pode-se observar uma forma de onda bem definida tanto na amplitude como na frequência fundamental do sinal de tensão. No decorrer desse trabalho são mostrados os sinais de tensão com perturbações, sendo assim possível observar as transições dos mesmos nas faixas de alta frequência.

2.7.6 Processo de filtragem

Segundo (CESAR, 2018), Os filtros passa-baixas (g) estão relacionados aos filtros escala e aos coeficientes de aproximações da TWD e os filtros passa-altas (h) estão relacionados aos filtros *wavelet* e aos coeficientes de detalhes da TWD. Os coeficientes dos filtros dependem da função *wavelet* mãe utilizada. As envoltórias dos canais passa-baixas são expansões/compressões de uma única função $\phi(t)$ e as envoltórias dos canais passa-altas também são expansões/compressões de uma única função $\psi(t)$. Os coeficientes de aproximações (A_j) e detalhes (D_j), da escala j , são obtidos pela convolução dos coeficientes de aproximação A_{j-1} , da escala $j-1$, com filtros g e h , respectivamente, seguidos por uma subamostragem por dois, Equações 2.4 e 2.5.

$$A_j(k) = \sum_n g(n-2k)A_{j-1}(n) \quad (2.4)$$

e

$$D_j(k) = \sum_n h(n-2k)D_{j-1}(n). \quad (2.5)$$

Os coeficientes de aproximações e detalhes do primeiro nível de decomposição (primeira escala) são dados pelas Equações 2.6 e 2.7,

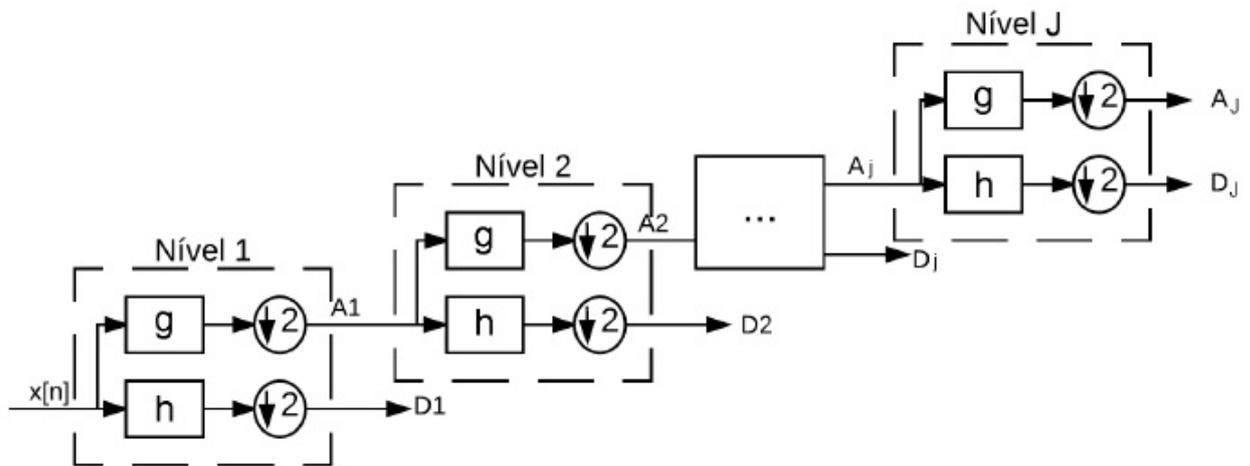
$$A_{1j}(k) = \sum_n g(n-2k)x(n) \quad (2.6)$$

e

$$D_{1j}(k) = \sum_n h(n-2k)x(n) \quad (2.7)$$

onde x representa o sinal analisado, e o processo de decomposição é ilustrado na Figura 16.

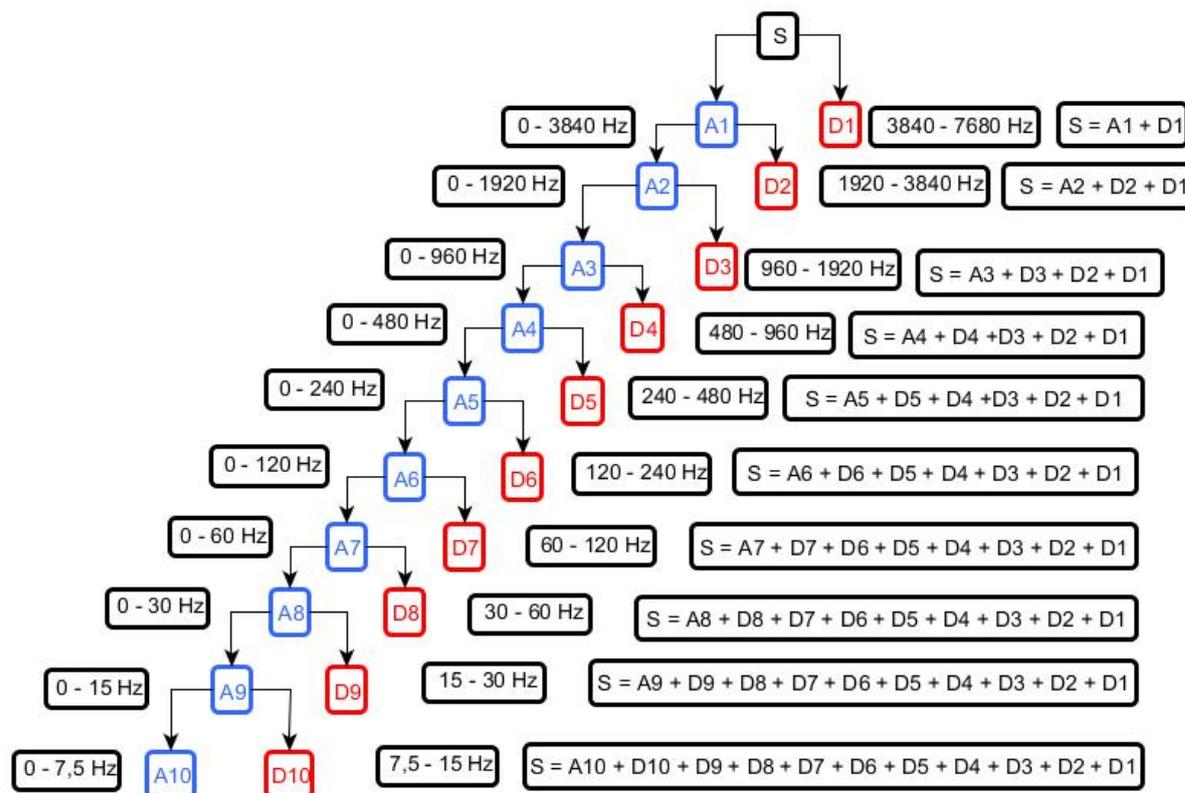
Figura 16 – Decomposição hierárquica (árvore) em faixas de uma oitava sucessivas



Fonte: (CESAR, 2018)

Para ilustrar de forma mais clara é apresentado na figura 17 o processo de filtragem para a decomposição dos sinais em 10 níveis que foram representados no item anterior (Figuras 14 e 15).

Figura 17 – Transformada *wavelet* - Processo de decomposição do sinal original (S)



Fonte: Autoria Própria

A árvore de decomposição em coeficientes *wavelet*, ilustra os níveis com decomposições sucessivas de modo que o sinal seja dividido em componentes com resoluções cada vez menores.

Teoricamente, em se tratando de um processo iterativo, pode ser decomposto indefinidamente. Na verdade, a decomposição pode proceder somente até que o detalhe individual consista em somente uma amostra ou pixel. Na prática, é selecionados um número satisfatório de níveis baseado na natureza do sinal. Para os casos de sinais elétricos estudados, o número de decomposições é limitado pelo nível de frequência do sinal a ser analisado.

É necessária a aplicação de uma função de escalonamento $F(t)$ no sinal para que a decomposição em coeficientes *wavelet* seja possível. Tal função de escalonamento deve ser contínua, geralmente real e ainda satisfazer a condição de admissibilidade.⁶

Resumindo, a ideia básica da decomposição em múltiplos níveis é dividir o espectro de um sinal em sub-bandas e então tratar individualmente cada uma das sub-bandas,

⁶ Para ser utilizada na análise de sinais, uma função *wavelet* precisa de uma característica chamada de condição de admissibilidade, a qual permite a existência da "transformada inversa de *wavelet*" para reconstrução do sinal original ou seja, a partir dessa condição pode-se afirmar que um sinal decomposto possa ser recuperado sem perdas de informações.

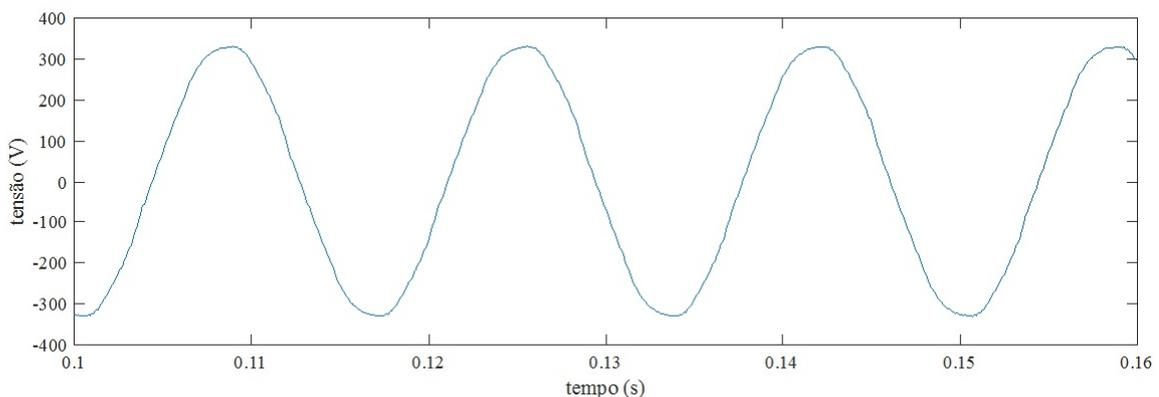
considerando o propósito desejado.

A etapa seguinte é saber como os detalhes e aproximações obtidos através da DWT podem ser reagrupadas para montar o sinal original, sem perder informações. Esta manipulação que efetua a reconstrução do sinal é chamada de *Inverse Discrete Wavelet Transform* (IDWT)

A reconstrução do sinal de aproximação A1 por meio deste processo produz um sinal de mesmo tamanho do sinal original (S), sendo este uma aproximação real. Similarmente, pode-se reconstruir o primeiro nível de detalhe D1, usando o processo análogo, como apresentado na Figura 17. Os detalhes e aproximações reconstruídos são verdadeiramente constituintes dos sinais originais. Inicialmente isso é encontrado quando são combinados $A1 + D1 = S$. É necessário reconstruir as aproximações e detalhes antes de combiná-los, uma vez que existe mais de uma forma de reconstrução do sinal a partir dos seus coeficientes.

Observa-se nesse primeiro nível que as frequências de A1 (0-3840Hz) e D1 (3840-7680 Hz) se complementam formando no total um sinal com a metade das componentes de frequência do sinal original (15360 Hz). As decomposições prosseguem nos demais níveis até chegar ao nível 10, quando o sinal original é a soma da aproximação A10 com os dez detalhes (D1 À D10), ou seja o sinal original apresentado na Figura 18, é a soma do coeficiente de aproximação A10 da Figura 14 juntamente com os dez coeficientes de detalhes da Figura 15.

Figura 18 – Sinal original = $S = A10 + D10 + D9 + D8 + D7 + D6 + D5 + D4 + D3 + D2 + D1$



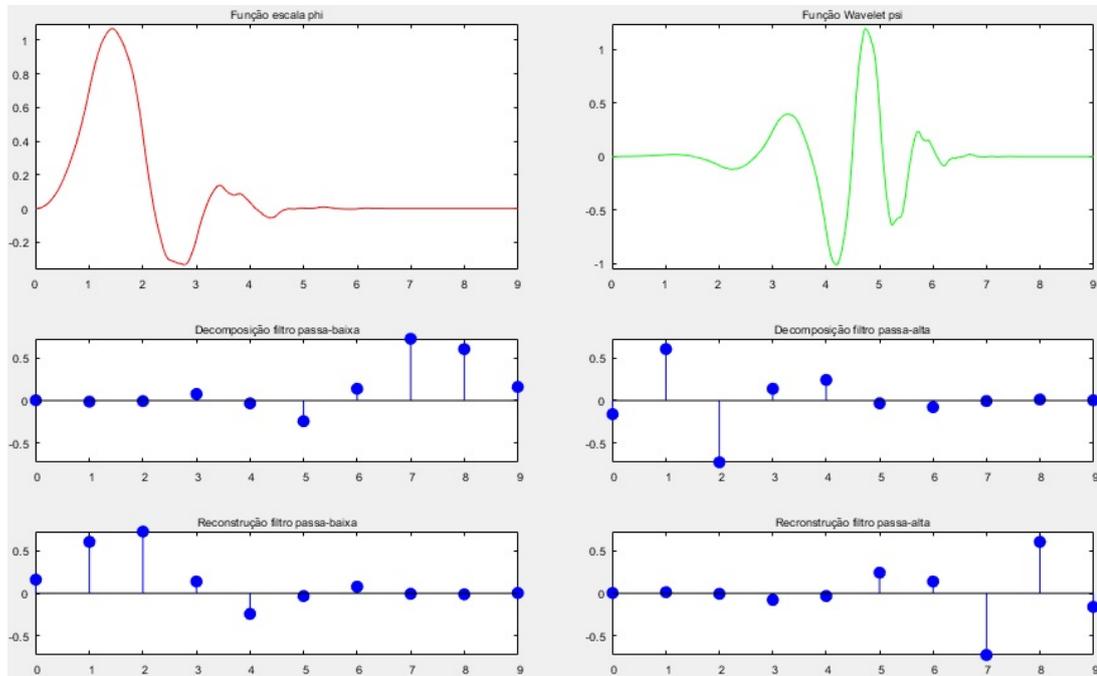
Fonte: Autoria Própria

Prosseguindo, é representada na Figura 19 a função escala, função *wavelet* e coeficientes dos filtros referentes a *wavelet* mãe da família Daubechies nível 5 (db5).

Segundo (POLIKAR, 2002), embora não seja possível realizar filtros ideais, sob certas condições é possível encontrar filtros que proporcionam uma reconstrução perfeita. Os mais famosos são os desenvolvidos por Ingrid Daubechies e são conhecidos como *wavelets* de Daubechies. Interpretar os coeficientes TWD às vezes pode ser bastante difícil

porque a maneira como os coeficientes TWD são apresentados é bastante peculiar.

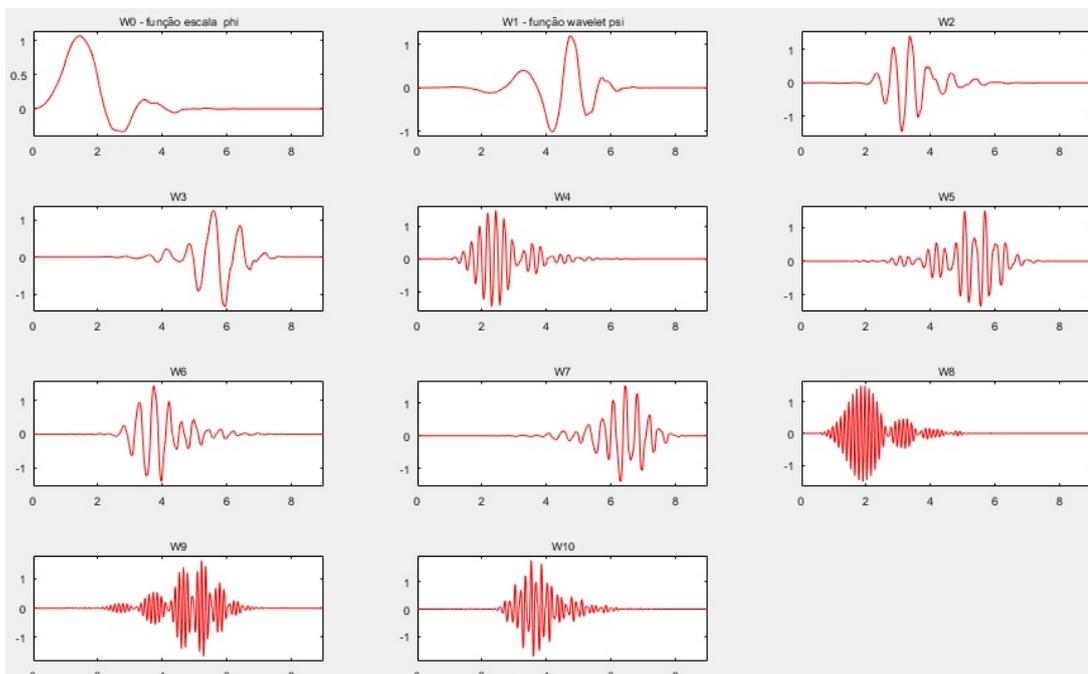
Figura 19 – *Wavelet* Daubechies db5



Fonte: Adaptado MATLAB

Na Figura 20 são representadas as funções escala W_0 , que é mesma função escala phi representada na Figura 19, seguida pelas dez funções *wavelet* (W_1 à W_{10}), em que a função W_1 é a mesma função *wavelet* psi representada na Figura 19.

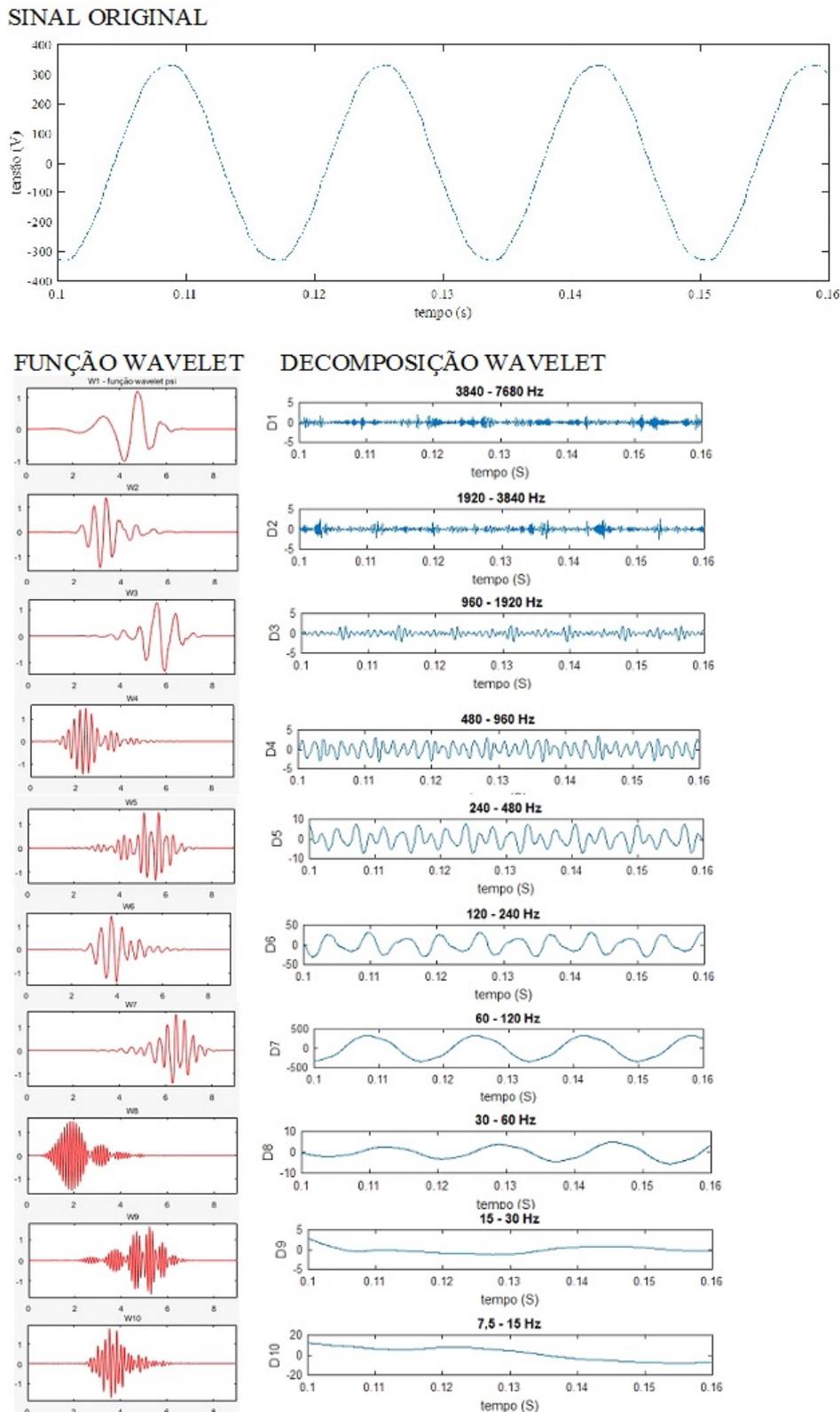
Figura 20 – Decomposição *wavelet* Daubechies db5



Fonte: Adaptado MATLAB

Finalizando, é apresentado na Figura 21 o conjunto completo de associação aos níveis correspondentes, iniciando com o sinal original, seguindo pelas funções correspondentes e concluindo com o processo através das decomposições das *wavelets* dos respectivos níveis.

Figura 21 – Processo de associação aos níveis correspondentes



Fonte: Adaptado MATLAB

2.8 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento das análises de sistemas de anti-ilhamento de inversores utilizados na microgeração FV. Inicialmente foi feita uma introdução ao sistema de geração distribuída (SGD), depois foi apresentado o conceito de zona de não detecção (ZND), seguido pelas principais normas e padrões técnicos relacionados ao assunto. Depois foram apresentados os conceitos complementares de fator de qualidade e *Phase-Locked Loop* (PLL), para em seguida apresentar as técnicas de proteção anti-ilhamento. O capítulo é finalizado com a apresentação das técnicas de análises de sistemas de proteção anti-ilhamento passivos e ativos, seguido pela teoria da técnica de processamento de sinais da Transformada *wavelet* que foi utilizada no desenvolvimento e análises desse trabalho.

No próximo capítulo são abordados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

3 Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desse trabalho. Inicialmente são apresentadas as simulações preliminares para validação da metodologia proposta, seguindo com os cenários para análises dos fluxos de potências no SGD e para análises das transformadas de Fourier e *wavelet*. A conclusão deste capítulo é realizada com a finalização da metodologia proposta.

3.1 Simulações preliminares para validação da metodologia proposta

Para as simulações preliminares são apresentados os circuitos de simulações com o sistema convencional e simplificado. O objetivo nesse caso, é fazer as comparações entre os dois sistemas em regime permanente com o desligamento da rede elétrica e sem o desligamento do inversor. Devido a isso não é necessária a inclusão do detector de ilhamento e PLL no circuito de simulação pois a potência fornecida pelo inversor é igual a potência absorvida pela carga durante o tempo de simulação sem a injeção de potência na rede de distribuição.

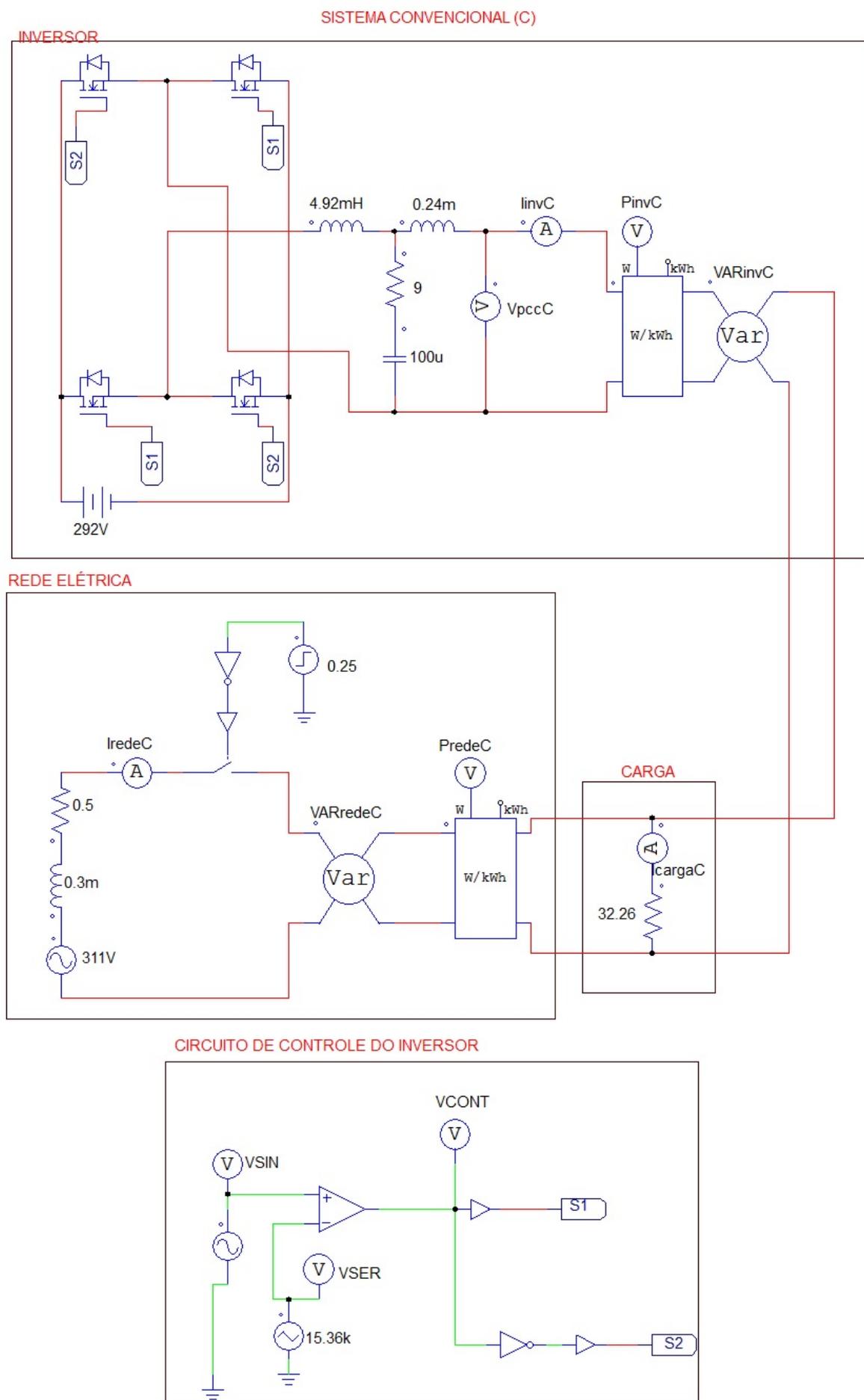
O diagrama do circuito da Figura 22 apresenta um sistema de simulação convencional utilizando um inversor monofásico em ponte completa constituído por dois braços, cada qual com duas chaves eletrônicas acionadas por um circuito de comando baseado na modulação por largura de pulsos (PWM - *Pulse Width Modulation*). A forma de onda produzida possui um valor eficaz que se assemelha ao de uma senoide nos terminais do inversor. Na saída do inversor foi introduzido um filtro LCL para minimizar as componentes de alta frequência geradas pelo chaveamento e ainda permitir a injeção de corrente no Ponto de Conexão Comum (PCC).

Para a rede de distribuição foram modeladas a impedância equivalente da linha de alimentação e do secundário de um transformador de distribuição.

A carga foi modelada utilizando um resistor representando um circuito ressonante, cuja resistência é de 32,26 ohm devido a necessidade de estabelecer a mesma potência (1500 W) e tensão de referência (220 V - 60 Hz) do sistema físico disponível.

O instante do desligamento da rede de distribuição é 0,25 s e o tempo de simulação total de 0,5 s.

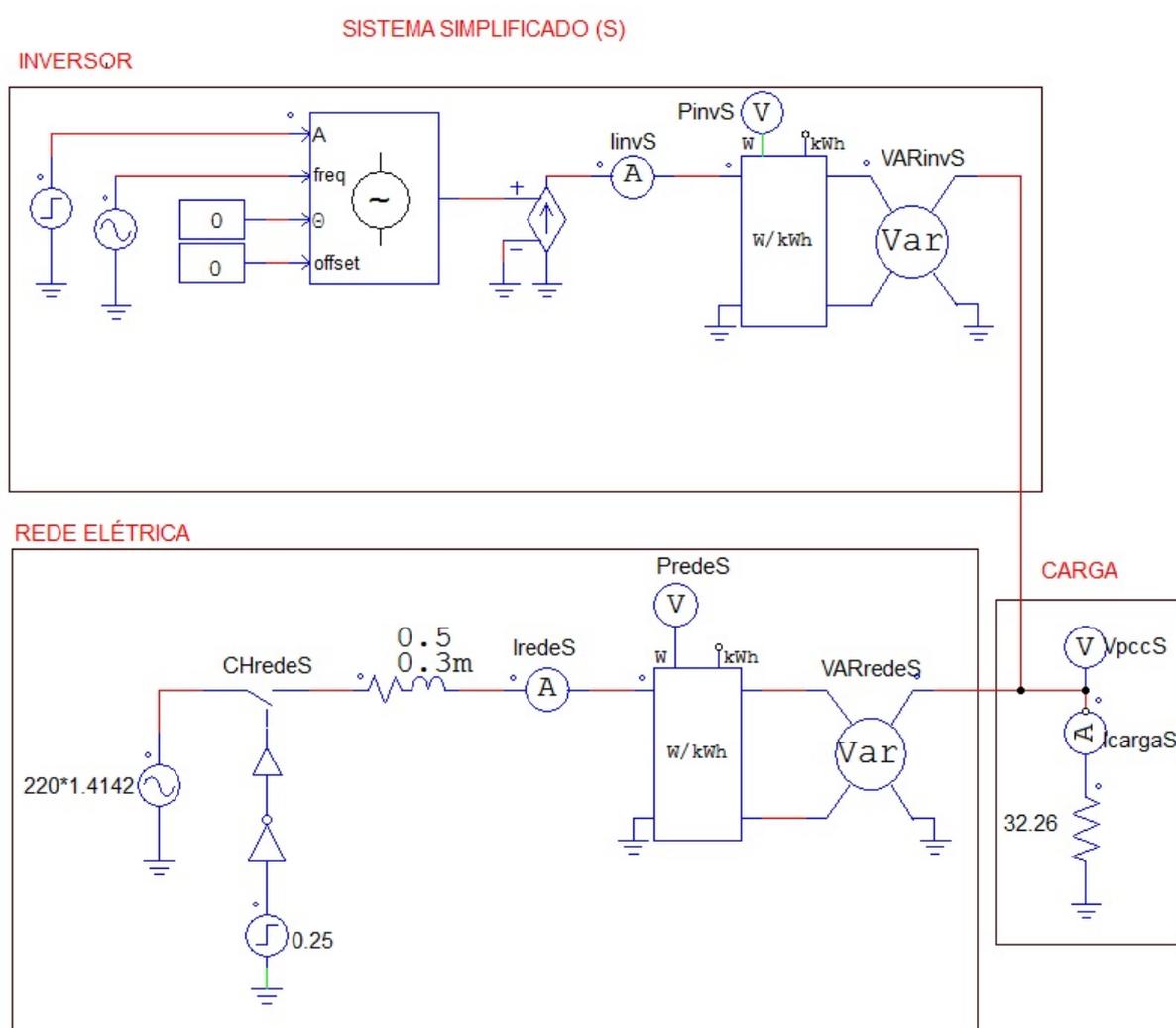
Figura 22 – Circuito de Simulação no PSIM com Sistema Convencional (C)



Fonte: Autoria Própria com filtro LCL adaptado de Cesar (2018)

Devido as reduções do número de componentes apresentados no diagrama dos circuitos na implementação de cenários para simulações conforme a NBR-62116, simplicidade nas alterações dos parâmetros dos circuitos, compatibilidade com o detector de ilhamento e PLL propostos, redução na taxa de distorção harmônica da tensão e corrente devido ao chaveamento do inversor do sistema convencional e consequente melhoria na qualidade nas análises dos transitórios, foi montado um circuito de simulação simplificado conforme mostrado na Figura 23. O referido detector de ilhamento e PLL foram acrescentados na finalização do sistema proposto (item 3.4).

Figura 23 – Circuito de Simulação no PSIM com Sistema Simplificado (S)



Fonte: Autoria Própria

O circuito de simulação simplificado possui, na parte do inversor, possibilidades de ajustes de amplitude, frequência e ângulo de fase. As partes referentes a rede elétrica e carga ficaram iguais ao circuito de simulação convencional descrito anteriormente. Esse modelo utiliza para carga, um resistor de 32,26 ohms devido a necessidade de estabelecer a mesma potência (1500 W) e tensão de referência (220 V - 60 Hz) do sistema disponível.

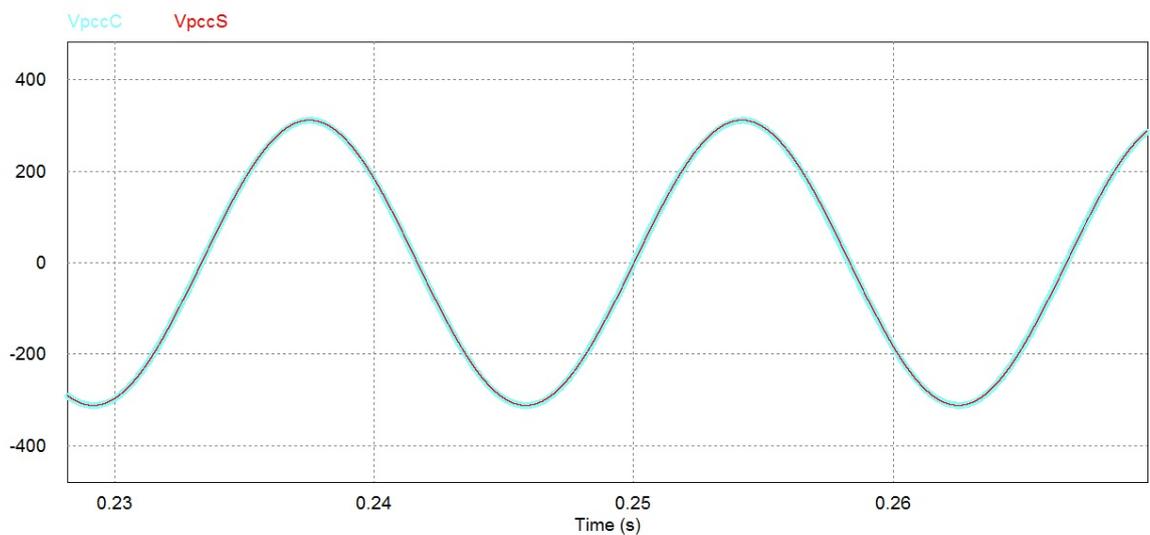
Sendo assim, a corrente injetada no sistema pelo inversor é de 6,82 A, fornecendo 100 % da potência da carga, sem injeção de potência na rede de distribuição. Essa corrente é obtida na saída do bloco de fonte de corrente com tensão controlada mostrado no circuito do inversor.

Para validar o circuito de simulação simplificado são feitas análises das grandezas elétricas de tensão, corrente, potência ativa e reativa provenientes da rede de distribuição e inversor, e também sobre a qualidade do sinal de tensão e corrente nos dois sistemas.

As grandezas terminadas pela letra “C” referem-se ao sistema convencional e as terminadas pela letra “S” referem-se ao sistema simplificado.

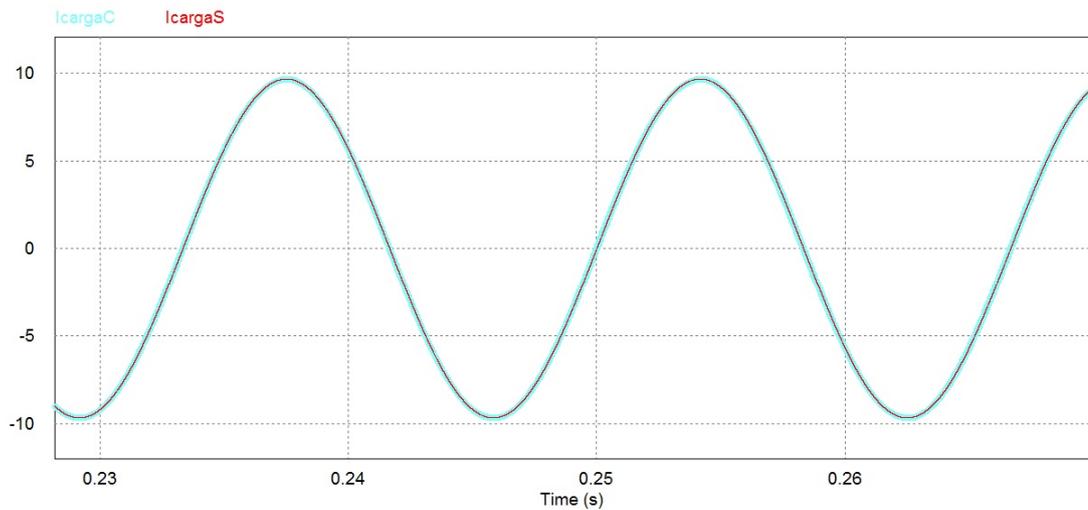
Nas Figuras 24 e 25, observa-se que ocorreram sobreposições dos resultados apresentado pelos sistemas simplificado e convencional tanto nas tensões como nas correntes nos PCCs. As taxas das distorções harmônicas da tensão calculadas no programa PSIM do sistema simplificado é de 0,019 % e no sistema convencional 0,94 %,

Figura 24 – V_{pccC} e V_{pccS} - Tensões (V) nos pontos de conexões comuns dos sistemas convencional e simplificado



Fonte: Aatoria Própria

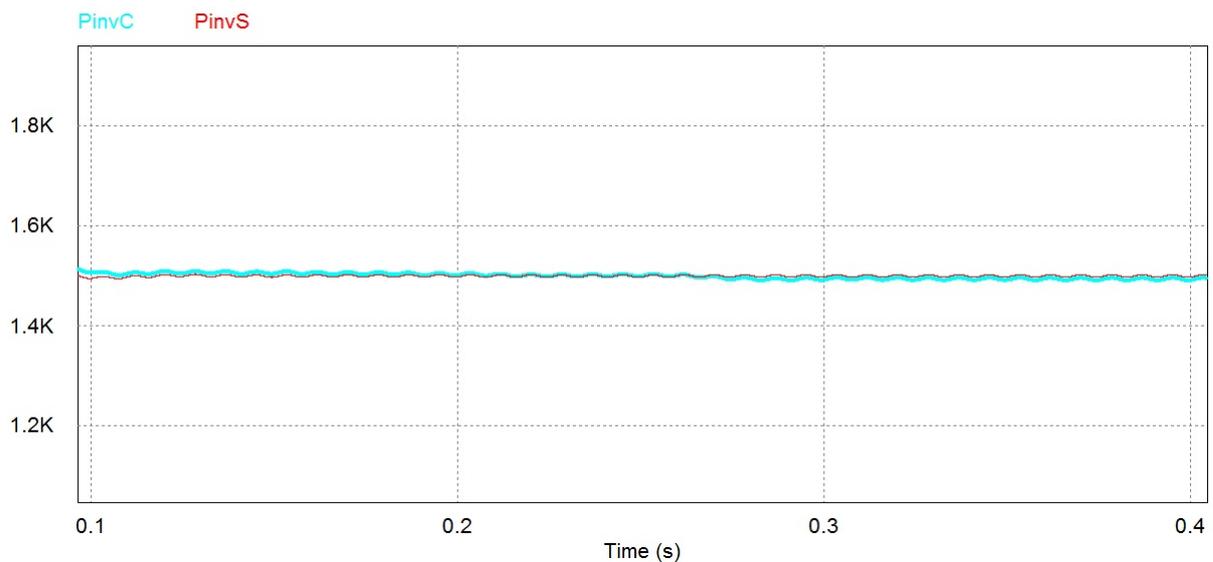
Figura 25 – I_{cargaC} e I_{cargaS} - Correntes (A) nas cargas dos sistemas convencional e simplificado



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 26, observa-se as potências ativas fornecidas pelos dois inversores em 1500 W, pois os inversores estão fornecendo 100 % da potência da carga, mantendo a mesma durante o tempo de simulação, mesmo durante o desligamento da rede elétrica em 0,25 s.

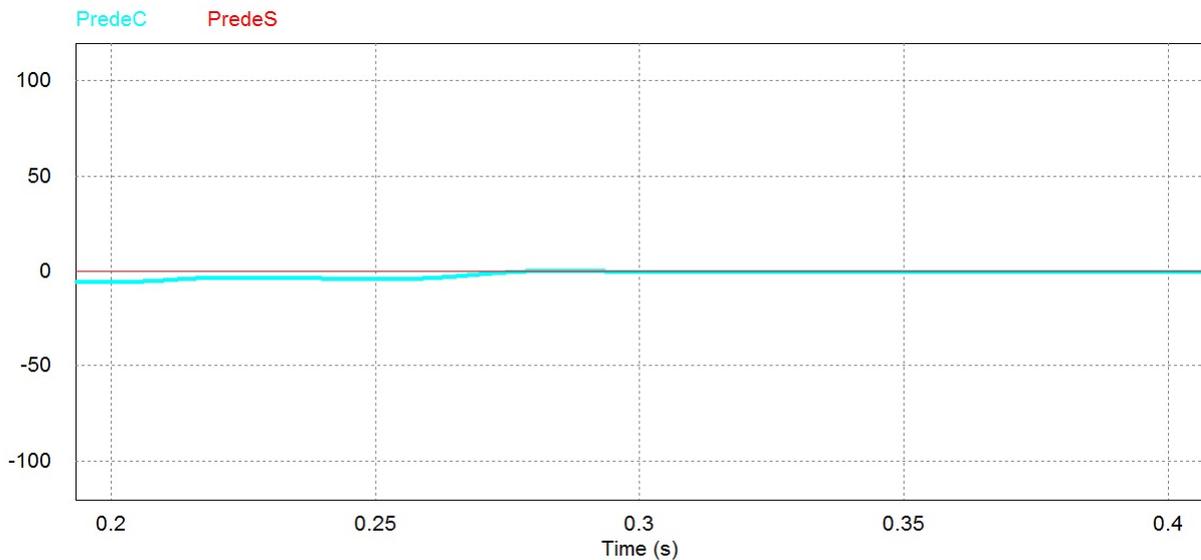
Figura 26 – P_{invC} e P_{invS} - Potências ativas (W) fornecidas pelos inversores dos sistemas convencional e simplificado respectivamente



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 27, observa-se as potências ativas fornecidas pelas redes dos dois sistemas próximo de zero, pois toda potência da carga está sendo fornecida pelos inversores. Observa-se também uma melhor estabilidade na potência da rede do sistema simplificado.

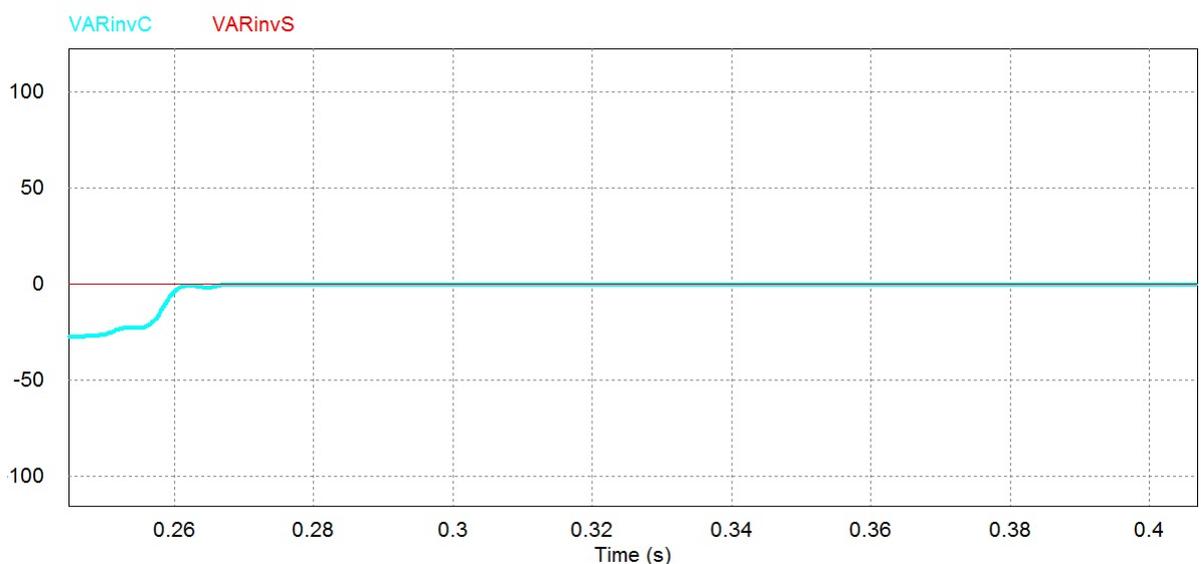
Figura 27 – PredeC e PredeS - Potências ativas fornecidas pelas redes (W) dos sistema convencional e simplificado respectivamente



Fonte: Autoria Própria

Na Figuras 28, observa-se antes do desligamento da rede (0,25 s) do sistema convencional referente a potência reativa do inversor, que a ordenada do gráfico está negativa porém a mesma é compensada pela ordenada do gráfico da Figura 29 na parte referente a potência reativa da rede do sistema convencional, tornando o fator de potência do sistema, unitário durante todo tempo de simulação.

Figura 28 – VARinvC e VARinvS - Potências reativas (var) fornecidas pelos inversores dos sistemas convencional e simplificado respectivamente)

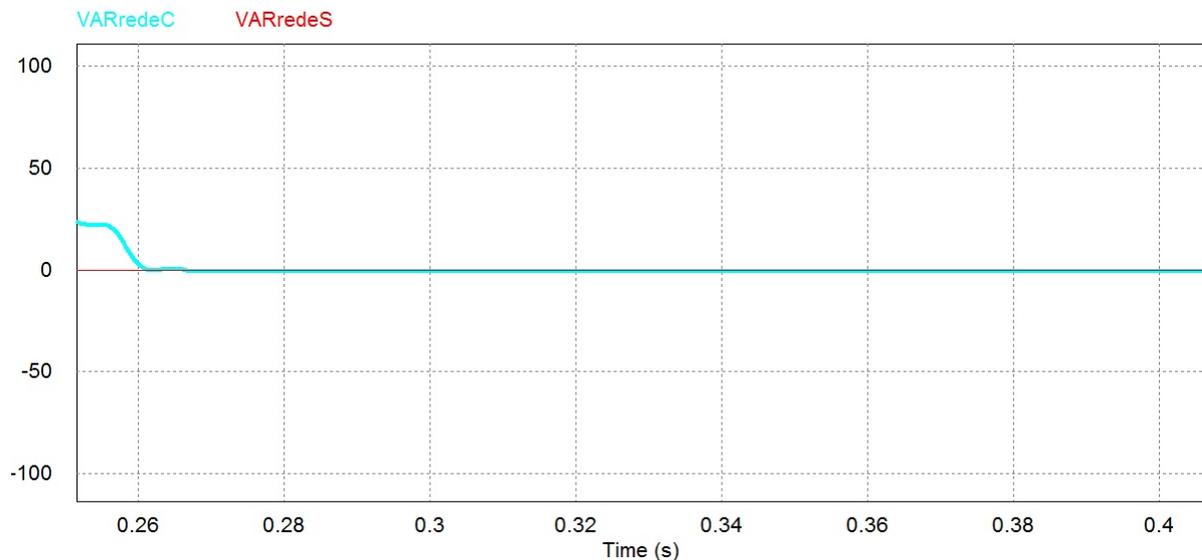


Fonte: Autoria Própria

Na Figuras 29, observa-se antes do desligamento da rede (0,25 s) do sistema convencional referente a potência reativa da rede, que a ordenada do gráfico está positiva

porém a mesma é compensada pela ordenada do gráfico da Figura 28 na parte referente a potência reativa do inversor do sistema convencional, tornando o fator de potência do sistema, unitário durante todo tempo de simulação.

Figura 29 – VARredeC e VARredeS - Potências reativas (var) fornecidas pelas redes dos sistemas convencional e simplificado respectivamente



Fonte: Autoria Própria

A partir das análises das grandezas elétricas de tensão, corrente, potências ativas e reativas provenientes da rede de distribuição e inversores, observa-se que ocorreram as sobreposições nos gráficos nas Figura 24 à 29, porém mesmo com baixas taxas das distorções harmônicas da tensão do sistema simplificado (0,019 %) e convencional (0,94 %), existe uma diferença percentual considerável entre ambas. Portanto existe uma melhoria na qualidade do sinal de tensão do sistema simplificado devido não trabalhar com chaveamento eletrônico e com filtros. Assim as análises dos transitórios durante a detecção de ilhamento terão uma visualização com mais qualidade no sistema simplificado.

Para complementar o sistema simplificado, foram acrescentados o sistema de detecção de ilhamento e também o PLL, todos não residentes no inversor.

3.2 Cenário para análises dos fluxos de potências no SGD

Antes dos acréscimos do sistema de detecção de ilhamento e do PLL no sistema proposto, foram realizadas as simulações para verificações e análises dos fluxos de potências no SGD. Todas as análises agora têm como referência o sistema simplificado validado no item 3.1.

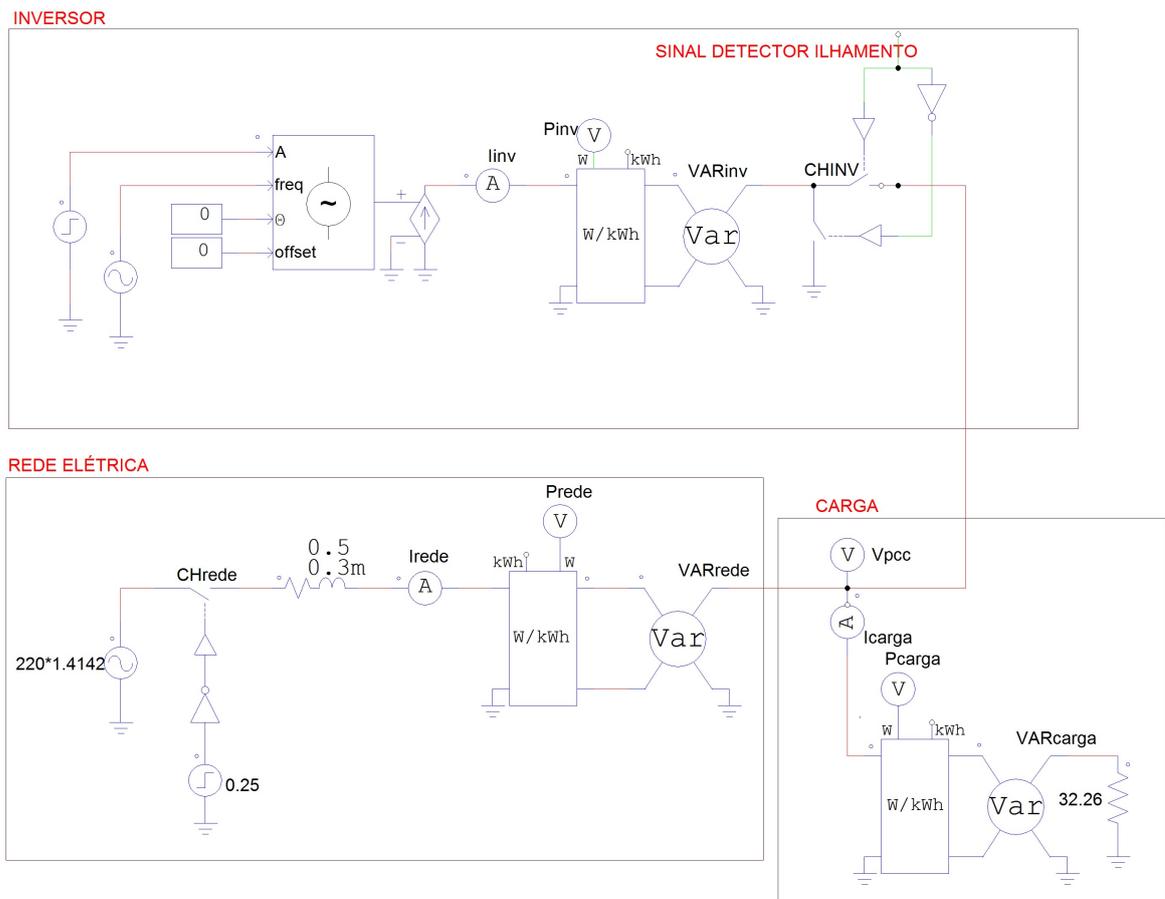
Para esse cenário é considerada uma carga resistiva com a mesma resistência do circuito da Figura 23, excetuando a corrente injetada no sistema pelo inversor que é de

7,2633 A. São acrescentados blocos de medições de potência ativa e reativa na carga. Nesse caso, uma condição de ilhamento também é forçada no instante $t=0,25$ s, com a abertura da chave da rede de distribuição, mantendo o tempo de simulação de 0,5 s. O objetivo desse cenário é provocar um desequilíbrio de potência no sistema de forma que a potência injetada pelo inversor na rede, seja pequena $\Delta P = 6,5 \%$. Com isso pretende-se verificar e analisar também as alterações da tensão no PCC.

É ilustrado na Figura 30 o circuito de simulação, seguido das Figuras 31 a 33 que apresentam a tensão no PCC, as correntes de saída no inversor e as que fluem para a carga e para rede e também as potências ativas e reativas da rede, carga e inversor. Tudo isso antes e após o ilhamento sem a desconexão do inversor.

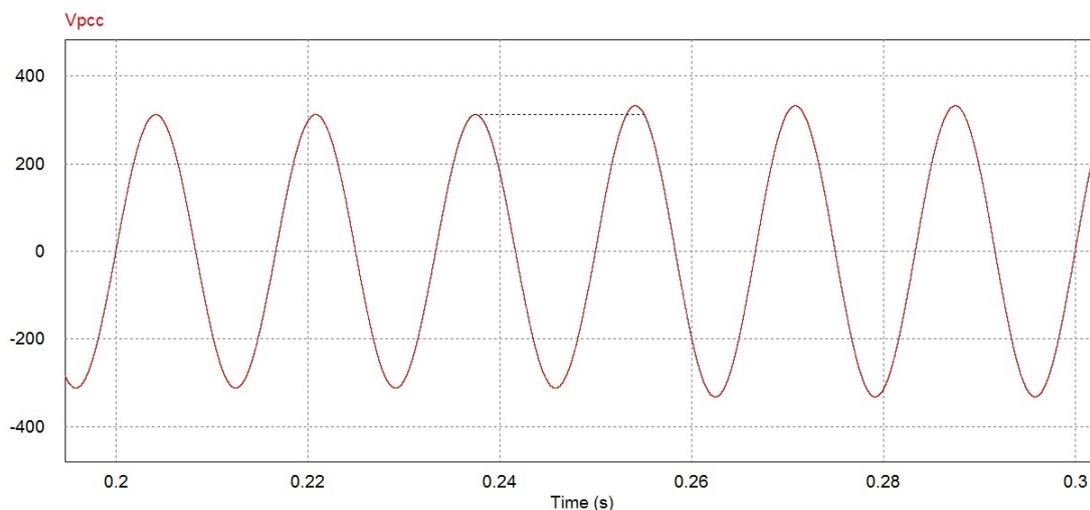
Observa-se na Figura 31 que há um aumento no nível de tensão após a abertura da chave da rede de distribuição devido ao acréscimo da corrente injetada na carga pelo inversor que é a parcela da corrente que estava sendo injetada pelo inversor na rede de distribuição.

Figura 30 – Circuito de Simulação, carga resistiva e $\Delta P = 6,5 \%$



Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Tensão no PCC - Cenário fluxos de potências

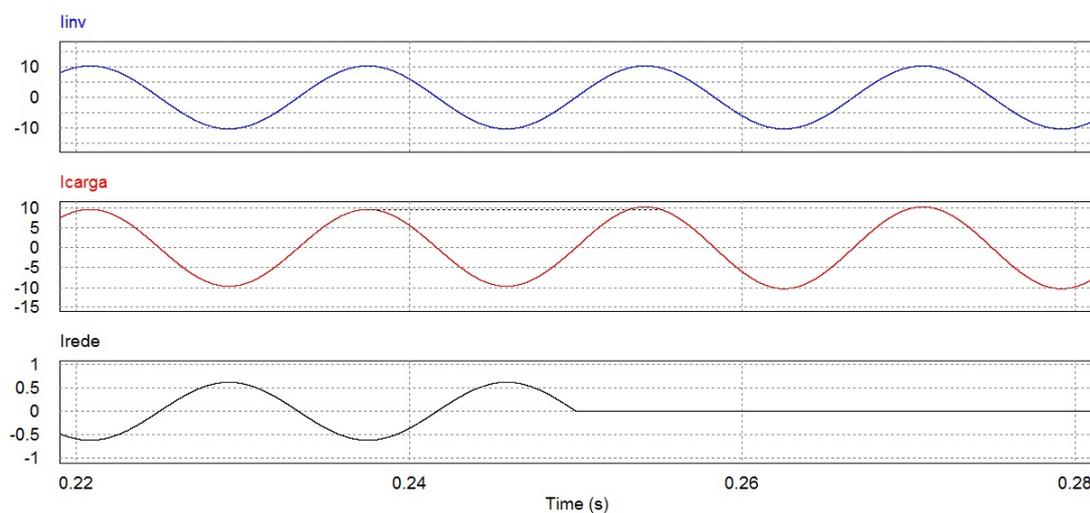


Fonte:

Autoria Própria

Na Figura 32 verifica-se que a corrente injetada pelo inversor no SGD é sempre a mesma, sendo uma maior parcela enviada para carga e uma pequena parcela para rede. Após a abertura da chave da rede de distribuição, toda corrente do inversor é injetada na carga, ocorrendo um aumento não só da corrente na carga como também uma elevação da tensão no PCC.

Figura 32 – Correntes inversor, carga e injetada na rede - Cenário fluxos de potências



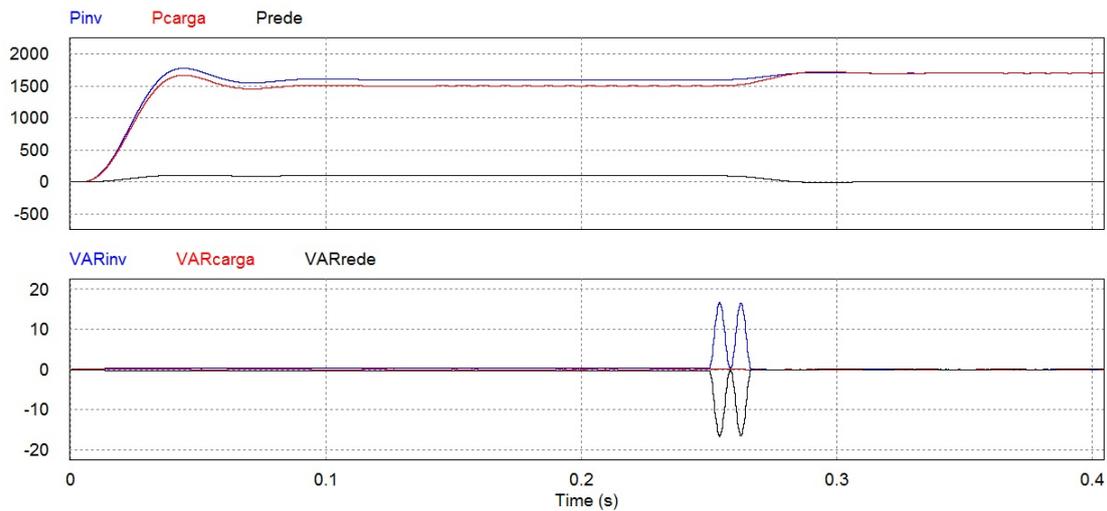
Fonte:

Autoria Própria

Na Figura 33 são apresentados os fluxos de potência ativas e reativas durante a simulação. No gráfico superior da Figura 33 verifica-se que antes da abertura da chave, o inversor fornece 1500 W para a carga e uma pequena parcela complementar ($\Delta P=6,5\%$) para a rede de distribuição. Após a abertura da chave da rede, todo fluxo de potência é enviado para a carga, provocando uma elevação de tensão no PCC. O gráfico inferior da referida Figura 33 apresenta os respectivos fluxos das potências reativas. Como a carga é

puramente resistiva observa-se que a potência reativa na carga é sempre nula. Antes da abertura da chave da rede de distribuição ocorre um fluxo de potência reativa do inversor para compensar a potência reativa indutiva da rede de distribuição devido a indutância da mesma. Após o desligamento da rede a potência reativa fornecida pelo inversor é nula.

Figura 33 – Potencias ativas e reativas, rede, carga e inversor - Cenário dos fluxos de potências



Fonte:

Autoria Própria

Dessa maneira conclui-se que as simulações efetuadas para verificações e análises dos fluxos de potências no SGD tiveram um comportamento dentro da normalidade quando foram provocados os desequilíbrios de potências no sistema.

3.3 Cenários para análises das transformadas de Fourier e Wavelet

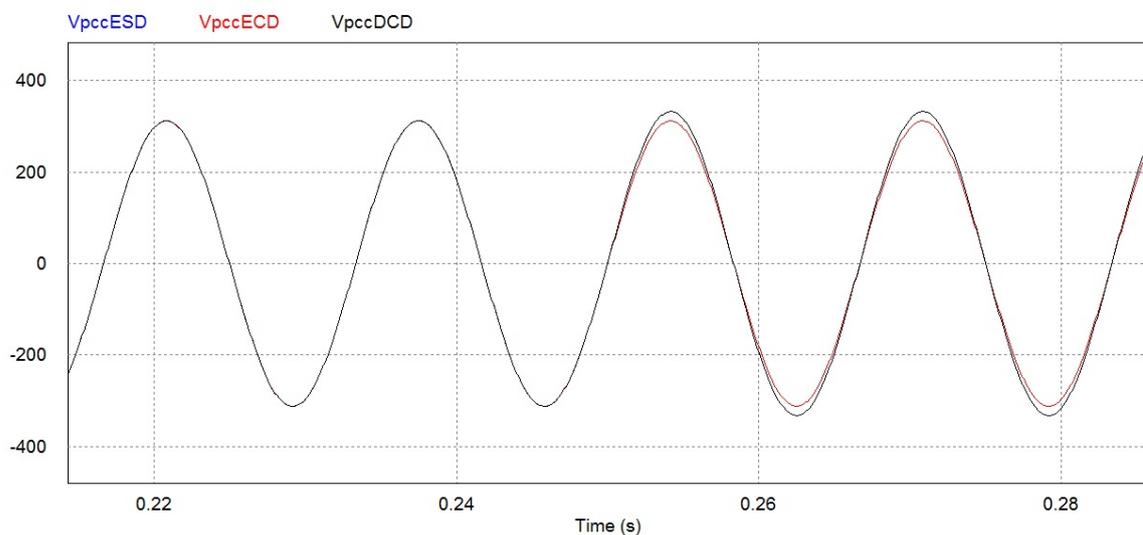
Após análises do circuito de simulação do cenário dos fluxos de potências, foi efetuada a extração do conjunto de dados da tensão no PCC no programa PSIM e análises utilizando as transformadas de Fourier (PSIM) e Wavelet (MATLAB) para uma verificação mais detalhada das alterações no espectro da frequência da tensão. Para análises comparativas foi feita a extração de três conjuntos de dados correspondentes a três sistemas definidos a seguir:

- Sistema Equilibrado Sem Desligamento (ESD) - Inversor fornecendo 100 % da potência ativa para a carga sem o desligamento da rede de distribuição;
- Sistema Equilibrado Com Desligamento (ECD) - Inversor fornecendo 100 % da potência para a carga com o desligamento da rede de distribuição;
- Sistema Desequilibrado Com Desligamento (DCD) - Inversor fornecendo 100 % da potência para a carga e 6,5 % de potência para a rede de distribuição com o desligamento da rede.

A frequência de amostragem é 15360 Hz, compatível com a frequência de Registradores Digitais de Perturbação (RDP) e o tempo de simulação é de 0,5 s, o que proporciona um conjunto de dados com 7.680 amostras. O tempo de abertura da chave da rede de distribuição é 0,25 s.

Inicialmente são realizadas as comparações das tensões nos respectivos PCCs na Figura 34, em que pode-se observar que os níveis de tensão do ESD e ECD são equivalentes em todo tempo de simulação, enquanto o nível DCD é superior aos demais níveis após a abertura da chave das respectivas redes de distribuições. Isso ocorre devido ao fornecimento da potência adicional de 6,5 % que o inversor estava fornecendo para a rede.

Figura 34 – Tensões PCC - Cenário fluxos de potências

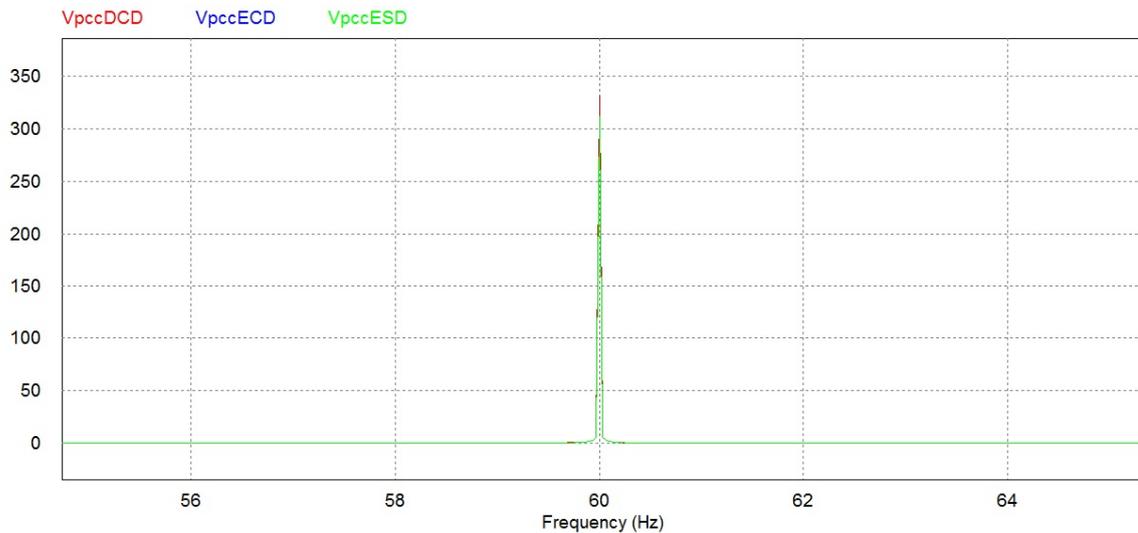


Fonte: Autoria Própria

Após analisada a Figura 34, são realizadas as análises de Fourier na Figura 35, em que pode-se observar que os níveis de tensão do ESD e ECD são equivalentes durante todo tempo de simulação enquanto o nível DCD apresenta um aumento do nível de tensão na frequência fundamental de 60 Hz quando comparada com a ESD e ECD. Isso ocorre devido ao fornecimento da potência adicional de 6,5 % que o inversor estava fornecendo para a rede.

Os espectros encontrados consistem basicamente da frequência fundamental de 60 Hz para os três casos, não sendo possível realizar uma análise sobre o comportamento do sinal de tensão durante a simulação e também em que instante ocorrem as variações.

Figura 35 – Transformada de Fourier - Cenário fluxos de potências



Fonte: Autorial Própria

Devido a análise de Fourier não fornecer informações sobre quando ocorre uma oscilação no sinal e somente informações de frequência que compõem o sinal, torna-se necessário utilizar uma outra técnica de processamento de sinais.

Para análises utilizando a transformada *wavelet* dos três cenários desse item, torna-se necessário realizar as decomposições em faixas de frequência no tempo. O Teorema de Nyquist estabelece que a frequência máxima que pode ser representada pelos coeficientes da TW equivale à metade da frequência de amostragem do sinal analisado $f_{max} = f_s/2$. Para esse cenário, utilizou-se uma frequência de amostragem de 15,36 kHz, que equivale a 256 amostras por ciclo para uma frequência fundamental de 60 Hz, e a decomposição é realizada em 10 níveis. Com isso pode-se analisar de 7,5 Hz até 7680 Hz do sinal de entrada através dos componentes de detalhes. São apresentadas na Tabela 6 as faixas de frequências que podem ser observadas em cada nível de aproximação e detalhe.

Tabela 6 – Frequência em cada nível de decomposição

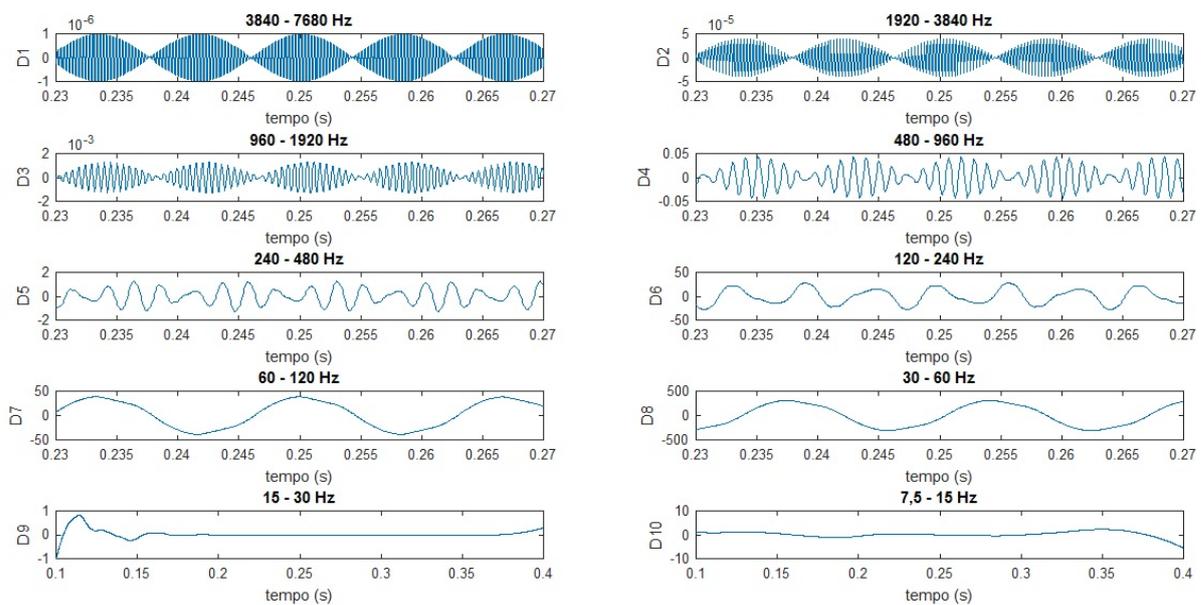
| Nível | Aproximação (A) (Hz) | Detalhe (D) (Hz) |
|-------|----------------------|------------------|
| 1 | 0 - 3840 | 3840 - 7680 |
| 2 | 0 - 1920 | 1920 - 3840 |
| 3 | 0 - 960 | 960 - 1920 |
| 4 | 0 - 480 | 480 - 960 |
| 5 | 0 - 240 | 240 - 480 |
| 6 | 0 - 120 | 120 - 240 |
| 7 | 0 - 60 | 60 - 120 |
| 8 | 0 - 30 | 30 - 60 |
| 9 | 0 - 15 | 15 - 30 |
| 10 | 0 - 7,5 | 7,5 - 15 |

Neste trabalho utiliza-se a família *wavelet* Daubechies, por ser uma das famílias mais adequadas para analisar transitórios em sistemas de energia e detectar ilhamentos (CESAR, 2018). Considerando a ampla utilização e os resultados encontrados nas referências bibliográficas, que comprovaram sua eficácia para a análise de distúrbios, ela foi escolhida para a metodologia deste trabalho.

Após simulações foi verificado que a *wavelet* mãe que melhor identificou a variação do sinal de tensão no instante do desligamento, foi a família Daubechies nível 5 (db5).

Na Figura 36 é apresentada a decomposição do sistema ESD em AMR da transformada *wavelet*, mostrando os dez níveis de detalhes do sinal de tensão, em que observa-se que os níveis de detalhes (D1 a D8) apresentam um sinal de tensão estacionário devido não ter ocorrido abertura da chave da rede de distribuição (0,25 s). Vale salientar que Os níveis D7 e D8 apresentam um sinal estacionário onde está incluída parte da frequência fundamental (60 Hz). Os níveis de detalhes D9 e D10 são referentes às faixas de frequências abaixo da fundamental.

Figura 36 – Transformada *wavelet*-Decomposição em AMR da tensão - Sistema Equilibrado Sem Desligamento (ESD)

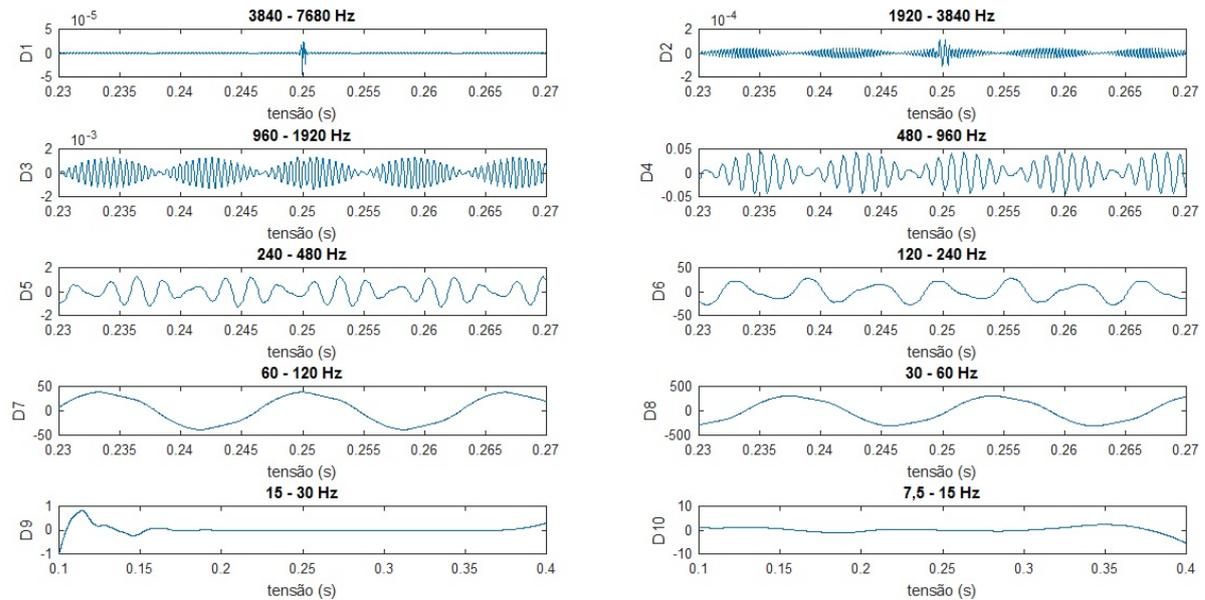


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 37 é apresentada a decomposição do sistema ECD em AMR da transformada *wavelet*, mostrando os dez níveis de detalhes do sinal de tensão, em que observa-se que os níveis de detalhes D1 e D2, apresentam um sinal não estacionário com uma visualização evidente no instante de abertura da chave da rede de distribuição (0,25 s), porém com uma magnitude muito próximo de zero devido o sistema ser equilibrado durante todo o tempo de simulação. Os níveis de detalhes D2 a D4 apresentam um sinal estacionário sem visualizações de transitórios no tempo de abertura da chave (0,25 s). Os níveis D7 e

D8 apresentam um sinal estacionário onde está incluída parte da frequência fundamental (60 Hz). Os níveis de detalhes D9 e D10 são referentes às faixas de frequências abaixo da fundamental e não apresentam transitórios no instante da abertura da chave (0,25 s).

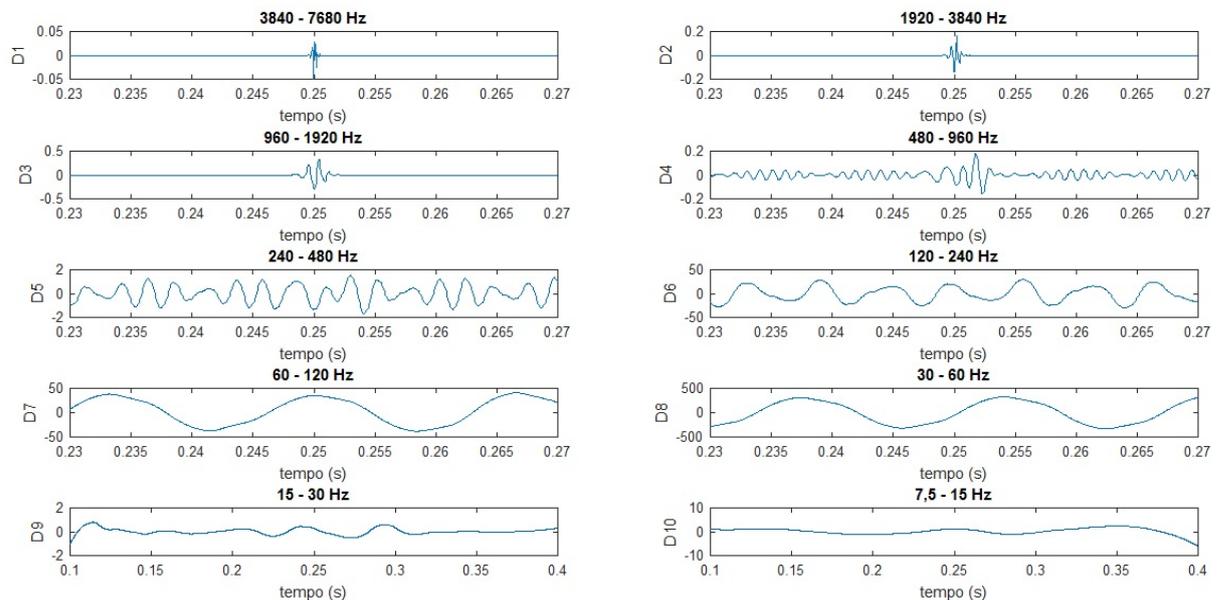
Figura 37 – Transformada *wavelet*-Decomposição em AMR da tensão - Sistema Equilibrado Com Desligamento (ECD)



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 38 é apresentada a decomposição do sistema DCD em AMR da transformada *wavelet*, mostrando os dez níveis de detalhes, em que observa-se que os níveis de detalhes D1, D2, D3 e D4, apresentam um sinal não estacionário com uma visualização evidente no instante de abertura da chave da rede de distribuição (0,25 s) devido a elevação da tensão no PCC após a abertura da referida chave, aumentando portanto o fluxo de potência ativa para a carga. Os níveis de detalhes D5 e D6 apresentam um sinal estacionário sem visualizações de transitórios no tempo de abertura da chave (0,25 s). Os níveis D7 e D8 apresentam um sinal estacionário onde está incluída parte da frequência fundamental (60 Hz). Os níveis de detalhes D9 e D10 são referentes às faixas de frequências abaixo da fundamental e não apresentam transitórios no instante da abertura da chave (0,25 s)

Figura 38 – Transformada *wavelet*-Decomposição em AMR da tensão - Sistema Desequilibrado Com Desligamento (DCD)



Fonte: Autoria Própria

Nas análises dos resultados do conjunto de dados DCD pode-se verificar de forma destacada o instante da abertura da chave (0,25 s), tornando possível fazer as verificações dos estudos de aplicação de um sistema para detecção de ilhamento do modelo proposto.

3.4 Finalização do sistema proposto

Antes das análises comparativas entre o sistema real e o sistema equivalente simulado, são realizadas as complementações do sistema de detecção de ilhamento proposto, acrescentando: Um PLL, um indutor e um capacitor na carga e o próprio detector de ilhamento. Vale salientar que o sistema proposto trata-se de um sistema em que o PLL e o detector de ilhamento não são residentes no inversor devido as possibilidades de análises com mais qualidade do sistema de detecção de ilhamento. Finalizando o capítulo é apresentado a composição do SGD FV real utilizado.

3.4.1 *Phase-Locked Loop* (PLL)

O PLL (apresentado na seção 2.4) é um sistema muito utilizado em inversores de sistemas de geração distribuída, para efetuar a detecção precisa e rápida da frequência e do ângulo de fase, efetuando portanto a sincronização do inversor com a rede elétrica, corrigindo e realimentando o inversor.

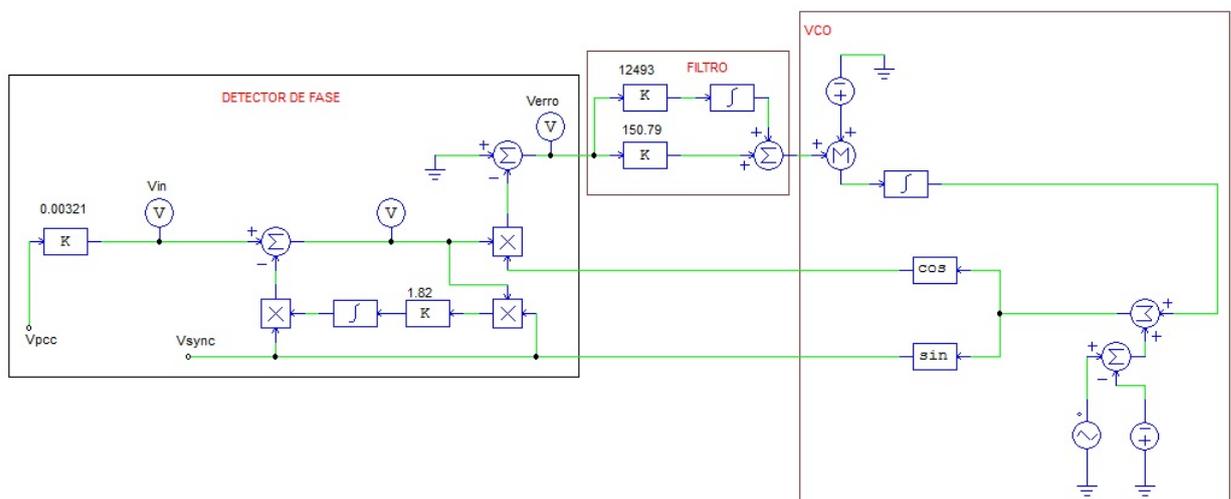
Existem diversas estruturas de PLL como: EPLL, p-PLL, MSOGI-FLL e PARK-PLL. O EPLL (*Enhanced phase-locked loop*) é uma estrutura muito efetiva para sincroni-

zação de conversores integrados à rede de energia elétrica, quando em condições de sinais muito ruidosos ou com variações de frequência (KARIMI-GHARTEMANI et al., 2011). Nesse trabalho é aplicada a estrutura EPLL, apresentada na Figura 39.

Trata-se de uma estrutura baseada em um filtro adaptativo simples, no qual consegue-se ajustar a função de transferência de acordo com o algoritmo realimentado pelo sinal de erro (YANG; BLAABJERG, 2012).

Um EPLL tem insensibilidade a ruídos e harmônicos no sinal de entrada por sua capacidade de construir a componente fundamental do sinal de entrada a partir da estimação de sua amplitude, fase e frequência, através da teoria de filtro adaptativo no detector de fase (KARIMI-GHARTEMANI et al., 2011).

Figura 39 – EPLL



Fonte: Adaptado (FANTI, Escola de Engenharia de São Carlos - 2016)

3.4.2 Carga indutiva e capacitiva

O acréscimo das cargas indutiva e capacitiva é efetuado para fazer as variações no fator de qualidade do sistema a fim de observar os potenciais de ressonâncias.

Na Tabela 7, são apresentados os valores calculados das indutâncias e capacitâncias de acordo com os respectivos valores dos fatores de qualidade (Qf).

Tabela 7 – Variações do fator de qualidade em função de R, L e C

| Fator Qualid.(Qf) | Resist.(ohms) | Indut.(mH) | Capacit.(uF) |
|-------------------|---------------|------------|--------------|
| 1 | 32,27 | 85,59 | 82,21 |
| 2 | 32,27 | 42,80 | 164,42 |
| 3 | 32,27 | 28,53 | 246,62 |
| 4 | 32,27 | 21,40 | 328,84 |

3.4.3 Detector de ilhamento

O acréscimo do detector de ilhamento desenvolvido é baseado no método passivo de sub e sobretensão e sub e sobrefrequência; e nas recomendações da ABN NBR IEC 62116 e também nas análises em multirresoluções da transformada *wavelet* com o objetivo de se fazer as análises dos tempos de desligamentos do inversor após o desligamento da rede elétrica conforme mostrado na Figura 40.

Conforme apresentado na referida figura, a entrada do sinal no detector de ilhamento é a da tensão V_{pcc} .

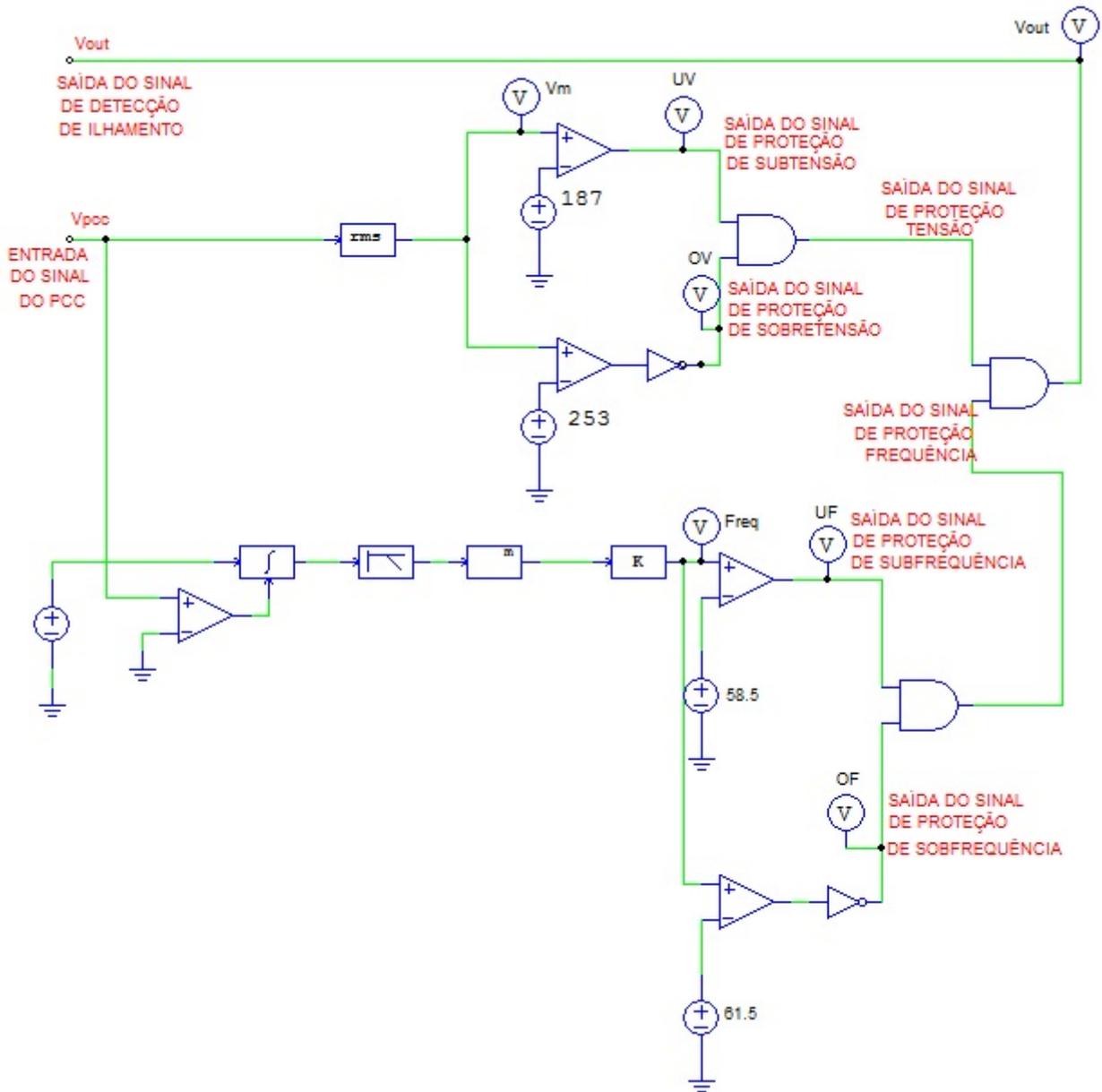
Para proteção de sub e sobretensão, o sinal de tensão do PCC passa por um bloco rms que transforma o V_{pcc} em valor eficaz, sendo enviado em seguida para dois blocos comparadores para fazer as referidas proteções a partir dos valores de sub e sobre-tensões programados conforme a ABNT NBR IEC 62116.

Para proteção de sub e sobrefrequência, o sinal de tensão do PCC passa por um processo de leitura da frequência, através de um bloco comparador seguindo para um bloco integrador em que a saída é levada a condição inicial quando o sinal passa pelo zero no sentido ascendente. Após esse processo o sinal segue para um filtro passa-baixas de segunda ordem, passando logo em seguida em dois blocos sendo um de função matemática e outro proporcional respectivamente, finalizando com dois blocos comparadores para fazer as referidas proteções a partir dos valores de sub e sobre-frequências programados conforme a ABNT NBR IEC 62116.

Todas as quatro saídas dos circuitos comparadores de sub e sobretensão e sub e sobrefrequência passam por um sistemas de entrada em blocos de porta lógicas *and* para que o sistema de detecção de ilhamento entre em operação no desligamento do inversor quando pelo menos uma das quatro saídas estiverem divergentes dos valores programados conforme a ABNT NBR IEC 62116.

Quando todas as portas lógicas *and* estiverem em nível lógico 1, a chave de interligação do inversor com a rede estará fechada. Caso ocorra alguma anormalidade nos sinais de tensão e frequência quando comparados com os valores programados, a chave do inversor abrirá, fechando logo em seguida uma outra chave de transferência da alimentação do inversor para terra, devido o mesmo ser uma fonte de corrente e não podendo ficar aberta.

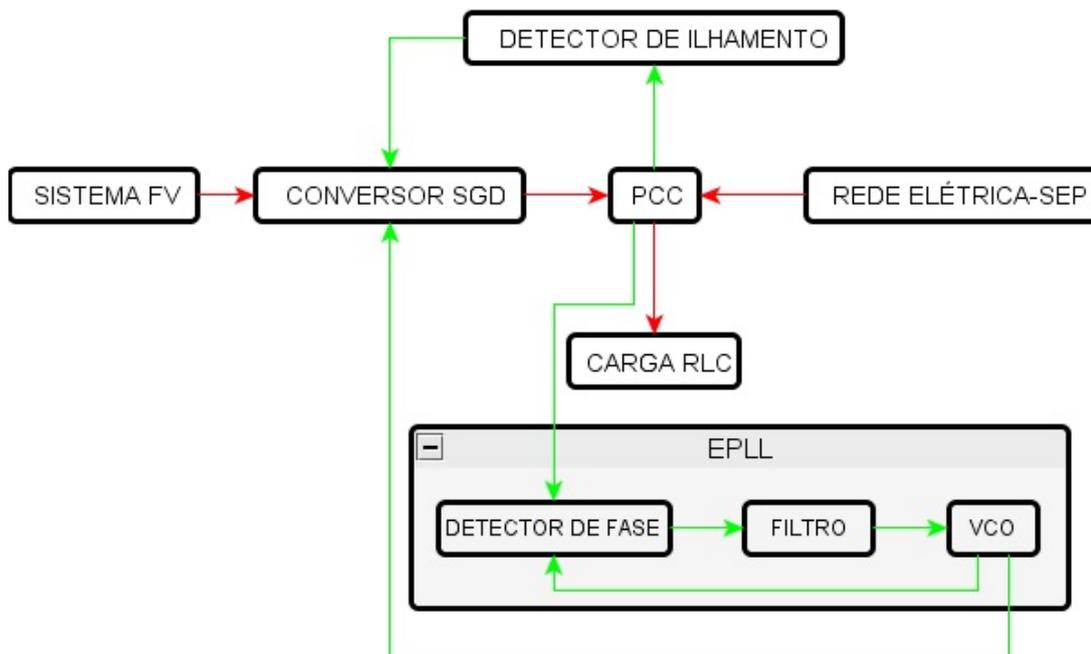
Figura 40 – Detector de ilhamento



Fonte: Autoria Própria

O Diagrama simplificado do Sistema proposto completo segue na Figura 41.

Figura 41 – Diagrama simplificado do sistema proposto



Fonte: Autoria Própria

- O PCC recebe os sinais de tensão da rede elétrica e do conversor SGD e também é interligado com a carga e o detector de ilhamento;

- O detector de ilhamento recebe informações sobre o sinal de tensão no PCC, compara com os valores limites de tensão e frequência e dependendo da condição envia um sinal digital para manter o conversor SGD ligado ou desligado;

- O conversor SGD recebe o sinal digital do detector de ilhamento, alimentação CC do sistema FV e sinal de realimentação do VCO do EPLL para manter o sincronismo com a rede elétrica;

- O Detector de fase do EPLL recebe alimentação de tensão do PCC e também do sinal do VCO que será comparado com o sinal de entrada do mesmo. O VCO do EPLL envia uma realimentação para fazer o sincronismo do conversor SGD com a rede elétrica SEP. O filtro passa-baixa do EPLL realiza a atenuação das componentes de alta frequência contidas no sinal de diferença de ângulo de fase dos sinais comparados.

Com o sistema todo completo, são realizadas as simulações para verificação da atuação do sistema de detecção de ilhamento em função da variação do fator de qualidade. São considerados um tempo total de simulação de 5 s, tempo de desligamento da rede (Vrede) de 2,5 s, frequência de amostragem 15,36 kHz, corrente injetada no sistema pelo inversor de 7,9 A e atribuindo os valores do fator de qualidade em 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

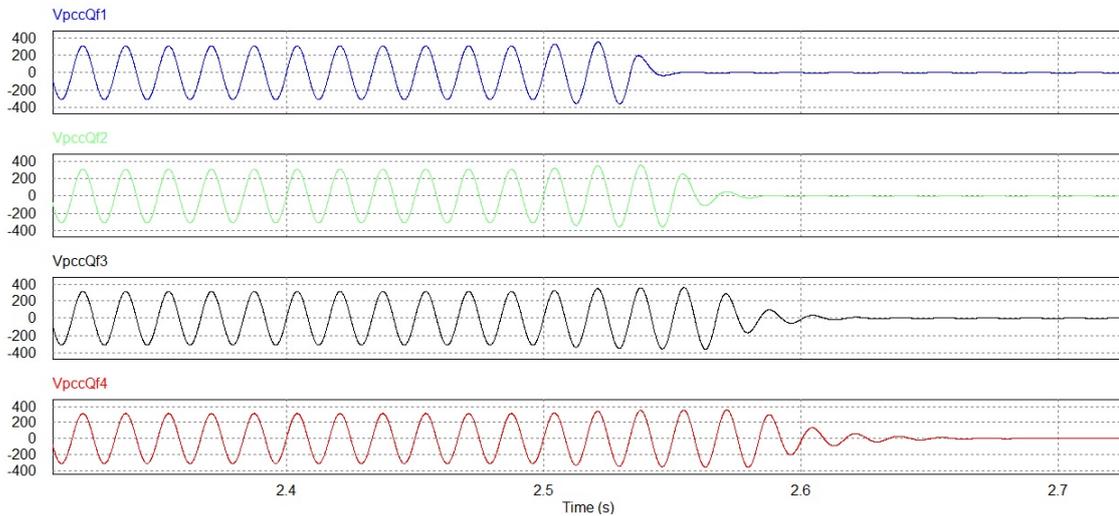
Verificando as Figura 42 e 43, observa-se que o sistema de detecção de ilhamento

atua para os quatro casos em um tempo menor que 2 s e que também na medida que se aumenta o valor do fator de qualidade, o tempo de desligamento do inversor também aumenta conforme Tabela 8, devido a um maior potencial de ressonância da carga.

Tabela 8 – Variações do fator de qualidade em função do tempo de detecção

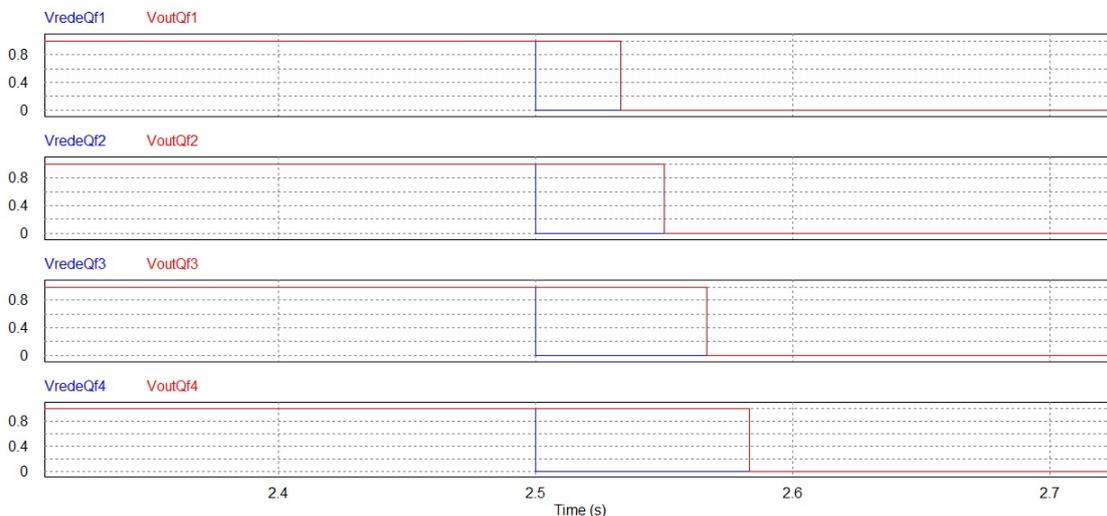
| Fator Qualid.(Qf) | Tempo det.(S) |
|-------------------|---------------|
| 1 | 0,0333 |
| 2 | 0,0500 |
| 3 | 0,0666 |
| 4 | 0,0834 |

Figura 42 – Desconexão do inversor em função do Qf



Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Saída de controle do detector de ilhamento em função do Qf

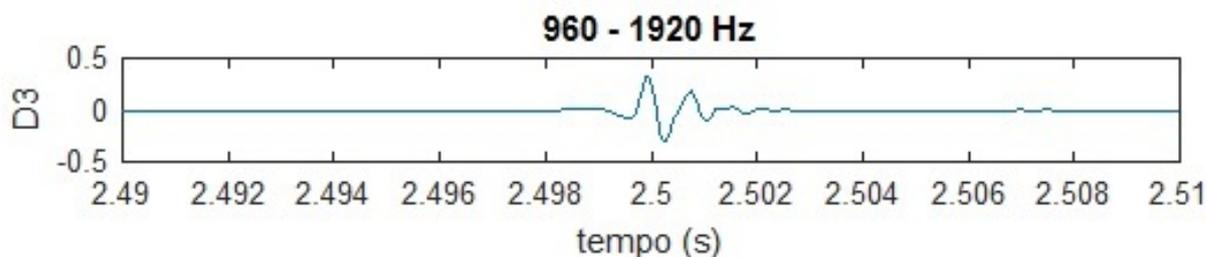


Autoria Própria

Fonte:

Na Figura 44 é apresentado o terceiro nível de detalhe D3 (faixa de frequência 960 a 1920 Hz) da transformada *wavelet* com o desligamento da rede sem desligar o inversor, $Q_f=1$, em que pode-se observar a evidência do sobressinal no instante do desligamento da rede.

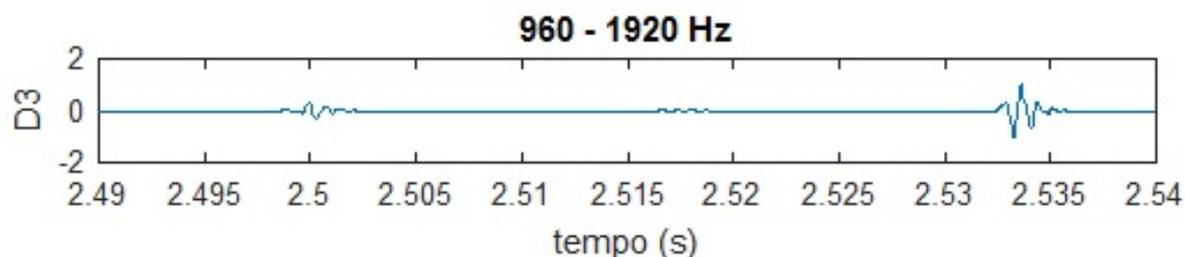
Figura 44 – Transformada *wavelet* - Terceiro nível de detalhe da tensão sem o desligamento do inversor



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 45 é apresentado o terceiro nível de detalhe D3 (faixa de frequência 960 a 1920 Hz) da transformada *wavelet* com o desligamento da rede e inversor, $Q_f=1$, em que pode-se observar que fazendo a subtração do tempo em que houve um maior sobressinal (2,535 s) pelo tempo de desligamento da rede (2,5 s), que o tempo total de detecção foi de aproximadamente de 0,035 s, confirmando ser o tempo próximo ao apresentado na Tabela-8 ($Q_f=1$).

Figura 45 – Transformada *wavelet* - Terceiro nível de detalhes da tensão com o desligamento do inversor



Fonte: Autoria Própria

3.4.4 Composição do SGD FV real utilizado

O SGD FV real utilizado é composto por um conjunto de 8 módulos fotovoltaicos (fabricação Canadian Solar - modelo CS6K-270P – 270 Wp) ligados em série e conectados à entrada de um inversor *grid-tie* monofásico (Fronius Primo 3.0), totalizando uma potência de pico de 2160 Wp. A eletricidade gerada é injetada na rede do Laboratório de Processamento de Energia (LPE). Nas Figuras 46 e 47 são ilustradas, respectivamente, as instalações dos módulos fotovoltaicos sobre a laje de uma caixa d'água e do inversor, junto aos quadros de proteção e seccionamento CC e CA, seguido pela Figura 48 que ilustra

o diagrama esquemático do sistema montado para a emulação do ilhamento com cargas resistivas.

Figura 46 – *String* composta de 8 módulos fotovoltaicos instalados na laje de uma caixa d'água



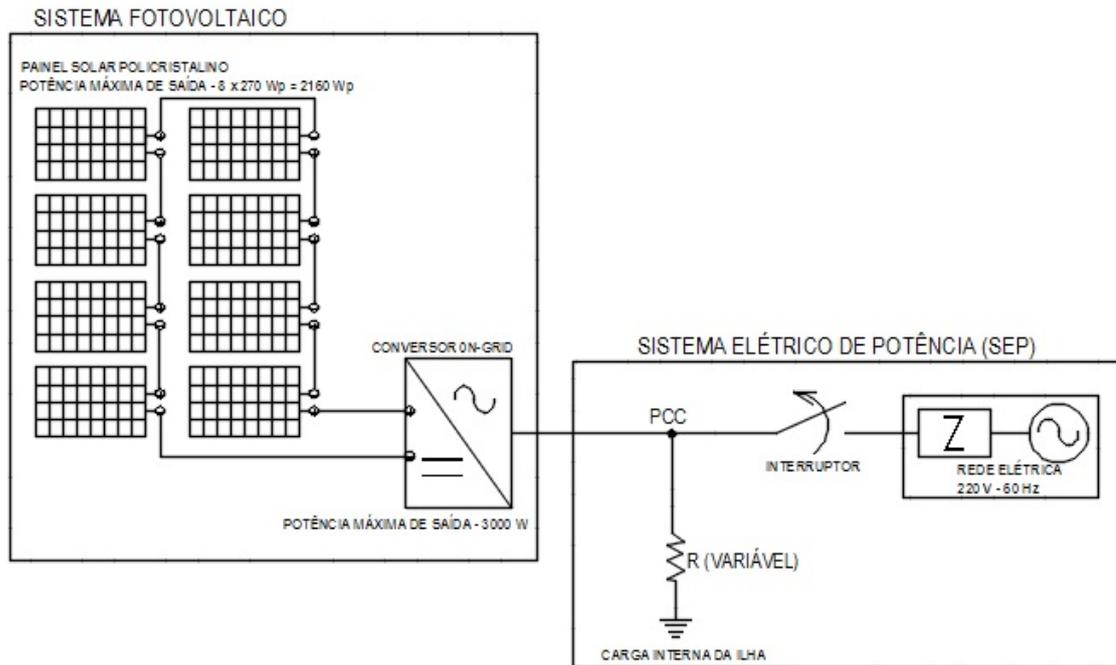
Fonte: Autoria Própria

Figura 47 – Disposição do inversor e de seus quadros de seccionamento e proteção CC e CA



Fonte: Autoria Própria

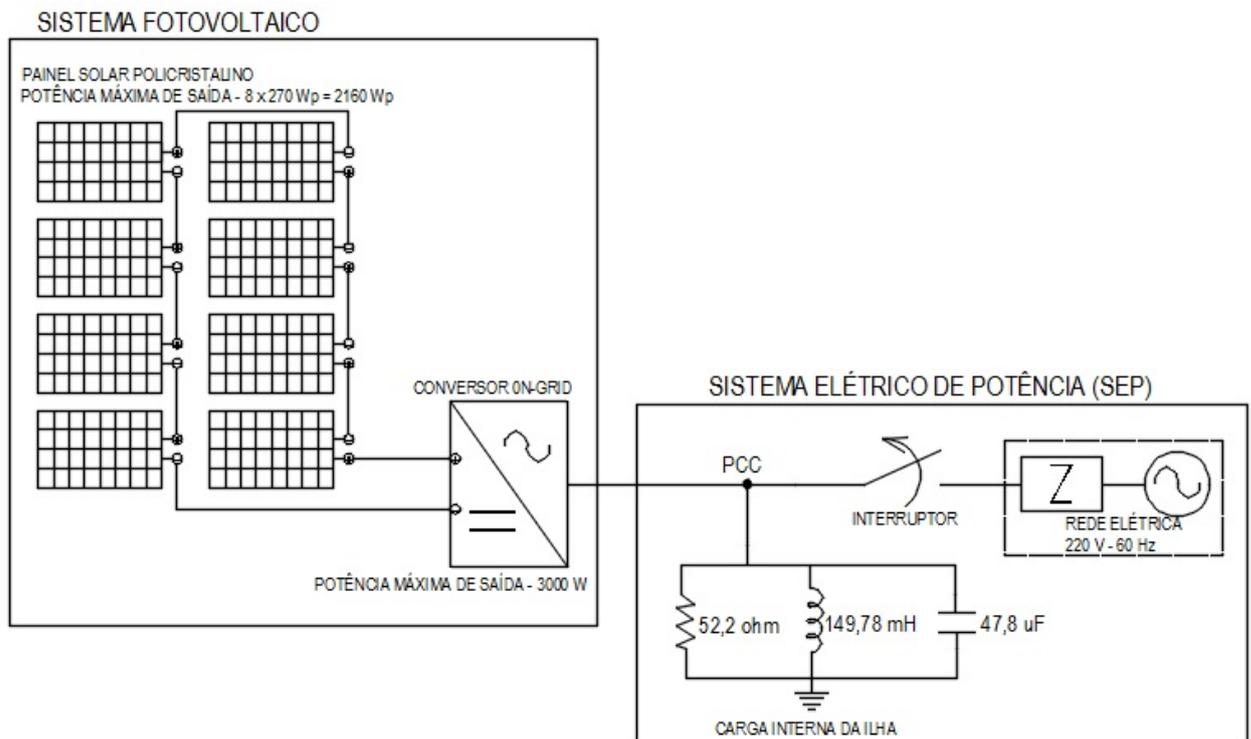
Figura 48 – Diagrama unifilar - SGD - carga resistiva



Fonte: Autoria Própria

O SGD FV real para carga RLC é similar ao sistema da Figura 48, alterando somente a carga para RLC, conforme diagrama unifilar mostrado na Figura 49.

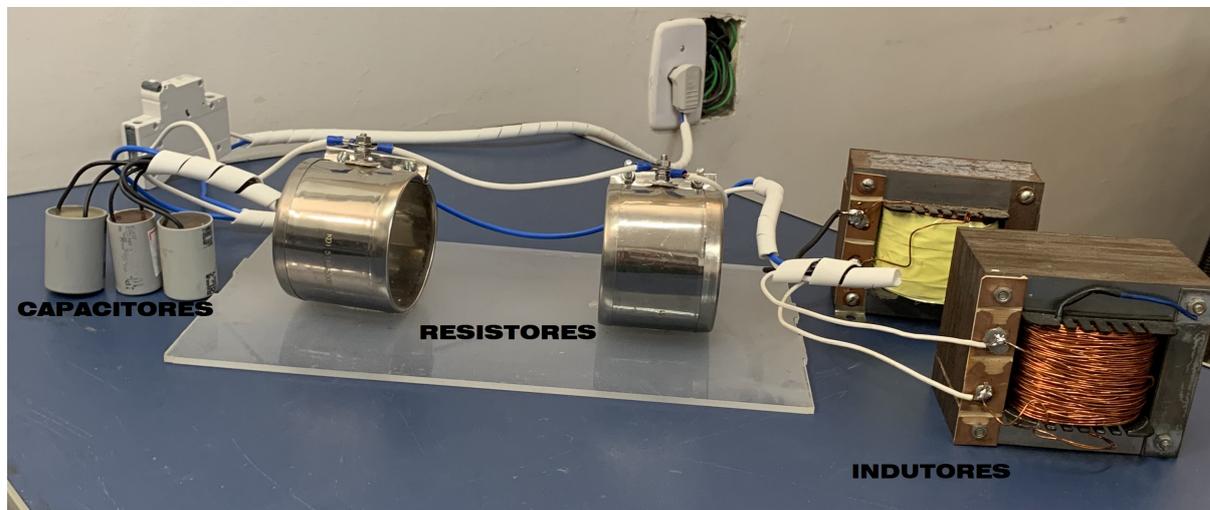
Figura 49 – Diagrama unifilar - SGD - carga RLC



Fonte: Autoria Própria

A carga resistiva alimentada pelo inversor é composta por dois resistores de 500 W (230 V) conectados em paralelo. São do tipo coleira de mica (referência KDI 5144), comumente utilizados em injetoras, extrusoras e sopradoras de plástico. A carga capacitiva é composta por três capacitores associados em paralelo, dois dos quais de 20 μF (250 V) e um de 10 μF (250 V). São capacitores utilizados em ventiladores e portões eletrônicos, e apresentam uma capacitância equivalente de 47,8 μF . Os indutores foram confeccionados a partir de núcleos de transformadores monofásicos. Cuidados especiais foram tomados para reduzir ao mínimo as perdas ôhmicas. Foram associados dois indutores em paralelo, apresentando uma reatância equivalente de 56,44 ohm (149,78 mH) e resistência ôhmica equivalente de 1,3 ohm . A combinação entre as cargas resistiva, capacitiva e indutiva foi realizada de tal forma a perseguir uma condição de carga ressonante, com fator de qualidade 1, conforme recomenda a ABNT NBR IEC 62116 - 2012 (Procedimentos de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistema fotovoltaico conectados à rede elétrica). Entretanto, com as condições disponíveis, o fator de qualidade obtido é de 0,91, com resistência equivalente de 52,2 ohm , reatância capacitiva equivalente de 55,52 ohm e reatância indutiva equivalente de 56,44 ohm . A configuração física da carga é apresentada na Figura 50.

Figura 50 – Configuração física carga RLC



Fonte: Autoria Própria

3.4.5 Considerações finais

Neste capítulo foram abordados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da modelagem em programas computacionais de um sistema fotovoltaico de geração distribuída. Inicialmente foram realizadas as simulações preliminares para validação do modelo proposto, seguido por um desenvolvimento de cenário para análises dos fluxos de potências no SGD e também de cenários para as análises das transformadas de Fourier e *wavelet*. Antes da finalização do capítulo é apresentado o sistema proposto completo para

comparações com o sistema real. O capítulo é finalizado com a apresentação da composição do SGD FV real utilizado.

No capítulo 4, a seguir, são apresentados os resultados práticos com as análises envolvendo um sistema real de SGD FV comparado com o sistema proposto.

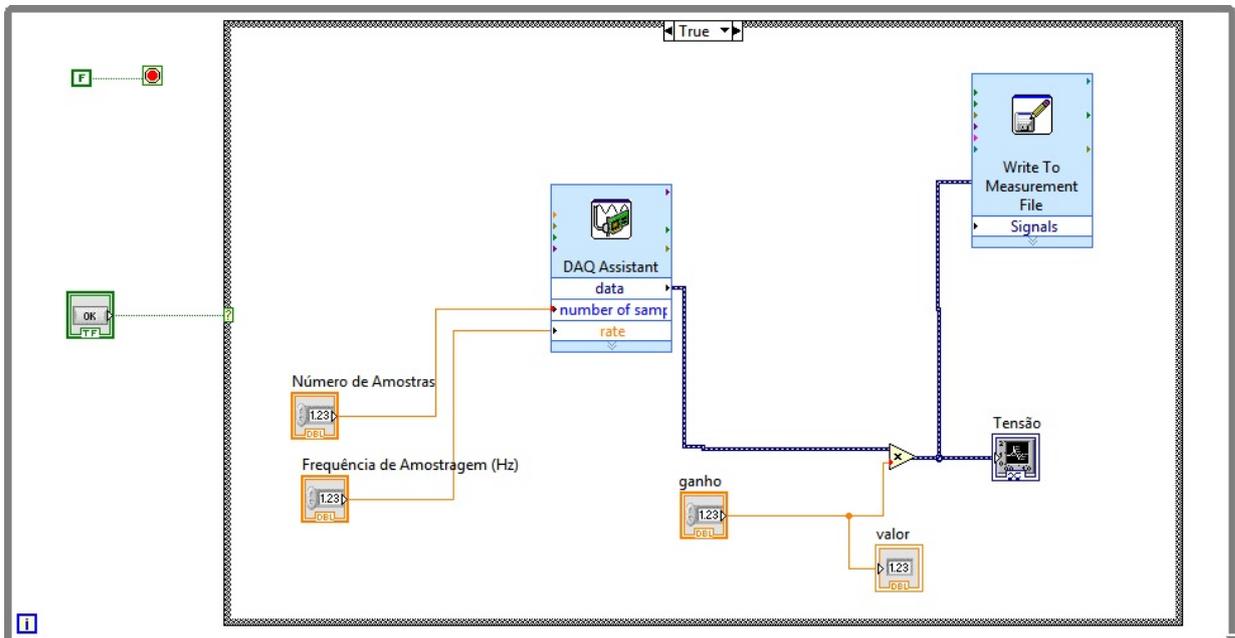
4 Resultados experimentais

Após as complementações e simulações finais do sistema proposto, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados da tensão elétrica no PCC, para coleta de informações do SGD do sistema real, seguido pelos estudos de casos reais para análises comparativas entre o modelo desenvolvido e o sistema real.

4.1 Sistema de aquisição de dados

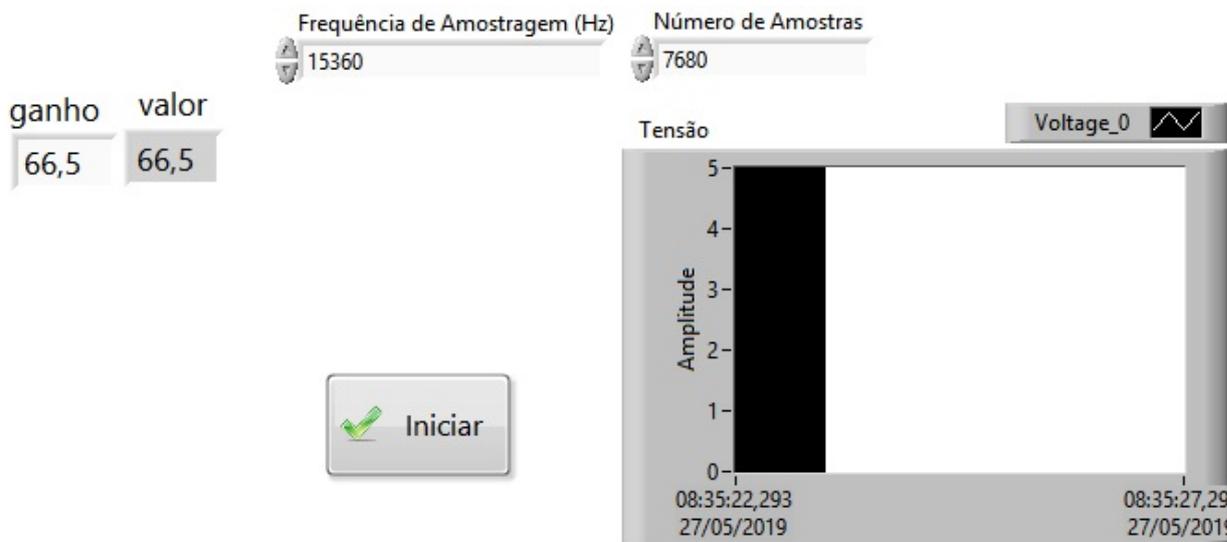
O sistema de aquisição de dados NI USB-6009 utilizado é da *National Instruments*, com o auxílio de um aplicativo desenvolvido no ambiente computacional Labview. Nas Figuras 51 e 52, são apresentadas as interfaces do referido sistema, o qual tem as possibilidades de ajustes de frequência de amostragem, número de amostras e ajustes do ganho entre a rede elétrica e a saída do divisor de tensão para acesso ao sistema de coleta de dados.

Figura 51 – Interface do Sistema de aquisição de dados - Parte-2



Fonte: Autoria Própria

Figura 52 – Interface do Sistema de aquisição de dados - Parte-1



Fonte: Autoria Própria

Os sinais de tensão adquiridos são analisados a partir da *toolbox wavelet* do programa Matlab, com uma decomposição em dez níveis. Utiliza-se a família *wavelet* Daubechies 5.

4.2 Resultados práticos envolvendo um sistema real, alimentando cargas resistivas

Para os estudos comparativos entre o modelo desenvolvido e o sistema real são realizados três estudos de casos, através do SGD alimentando cargas resistivas, sendo:

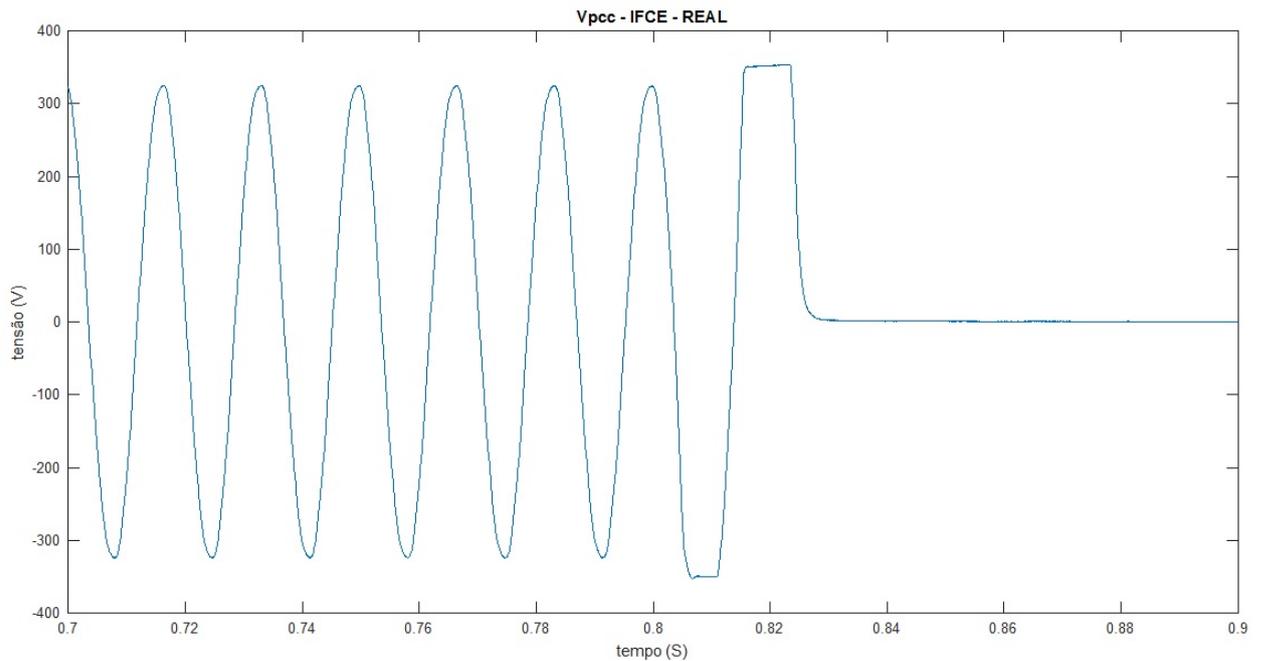
- Caso-1 - Sistema fotovoltaico gerando uma potência superior à potência da carga;
- Caso-2 - Sistema fotovoltaico gerando uma potência inferior à potência da carga;
- Caso-3 - Sistema fotovoltaico gerando uma potência próxima à potência da carga (condição de equilíbrio).

4.2.1 Caso - 1

Após a coleta de dados do SGD real e simulações no MATLAB, são verificadas a tensão no PCC e AMR da transformada *wavelet*. A realização da aquisição de dados é efetuada na frequência de amostragem de 15,36 kHz. No instante do desligamento da rede elétrica o inversor estava disponibilizando uma potência máxima de 500 W, alimentando uma carga de iluminação *led* de 180 W. Antes do desligamento, parte da potência do inversor é fornecida para a carga e a complementação para rede de distribuição elétrica. Após o desligamento da rede ocorre uma elevação da tensão no PCC e conseqüentemente

desligamento do inversor. Nas Figuras 53 e 54 observam-se o perfil da tensão e AMR na simulação realizada. Na Figura 53 observa-se uma elevação da tensão do PCC após o desligamento da rede. Na decomposição do terceiro nível de detalhe na Figura 54 observam-se os dois sobressinais referentes aos instantes de desligamento da rede e do inversor, respectivamente.

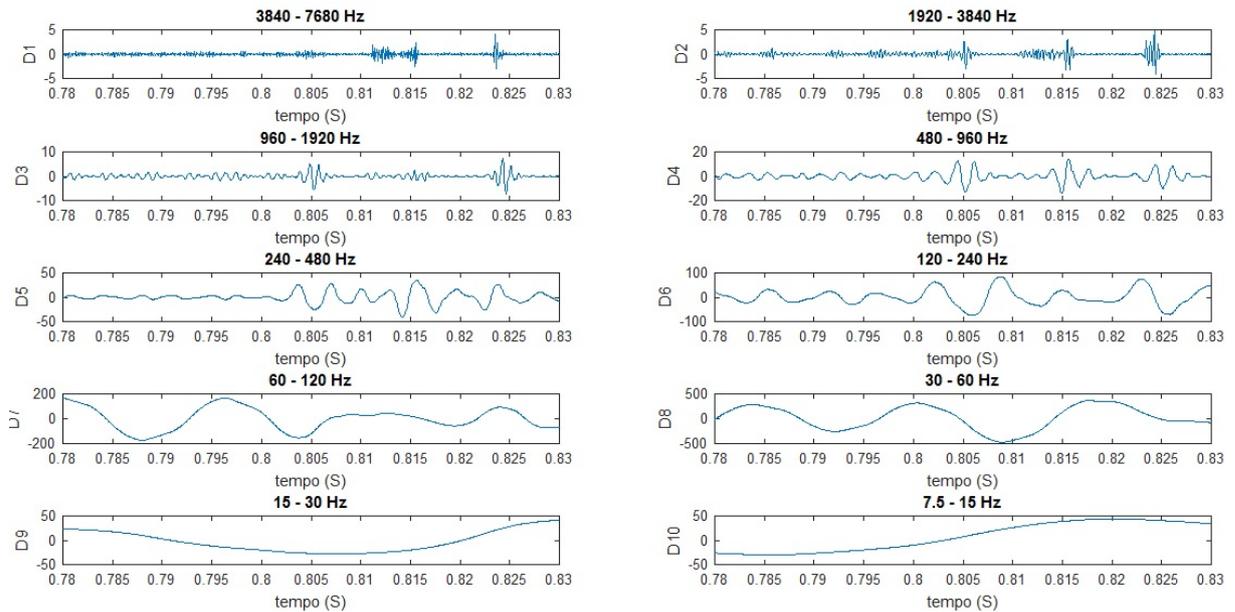
Figura 53 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-1



Fonte: Autoria Própria

O corte no pico da onda ocorreu devido a saturação no sistema de aquisição de dados, visto que conforme apresentado na Figura 55, o valor de pico da tensão após elevação da onda é aproximadamente de 520 V. O sistema de aquisição de dados possui um limite de 10 Vpp, que quando multiplicado pelo ganho do sistema, fica muito próximo do limite do sistema de aquisição de dados fazendo com que ocorra o corte dos picos máximos da onda.

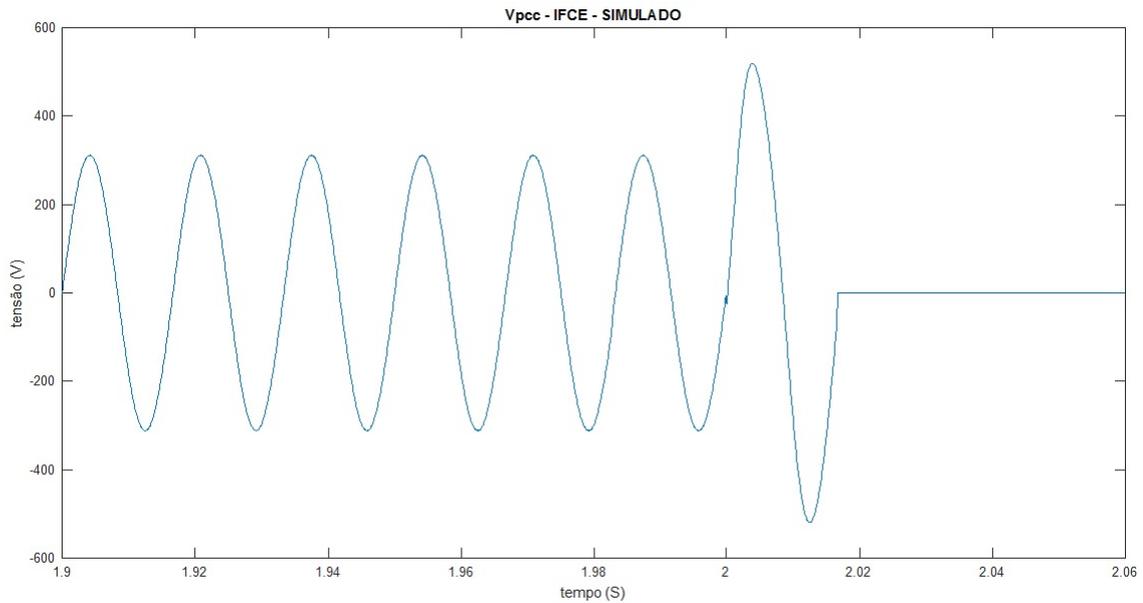
Figura 54 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-1



Fonte: Autoria Própria

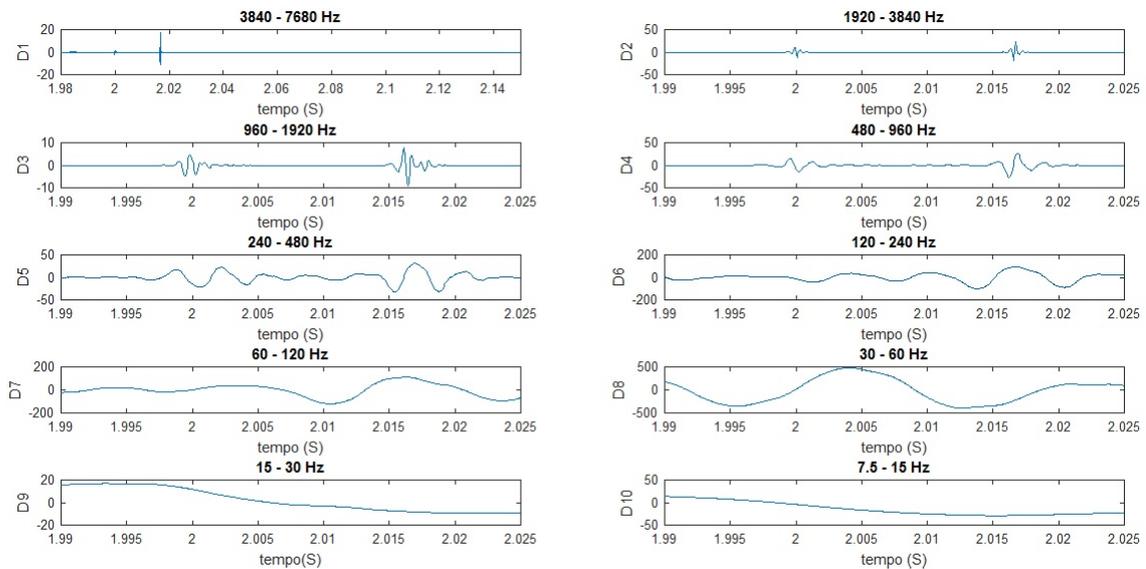
Para comparações do sistema real com o sistema SGD proposto, foi desenvolvido nos programas PSIM e MATLAB uma condição equivalente às simulações realizadas no SGD do sistema real e extraídas as informações da tensão no PCC e AMR conforme Figuras 55 e 56. Comparando as Figuras 53 e 55 observa-se uma similaridade entre os dois perfis da tensão nos respectivos V_{pcc} 's. Comparando também as Figuras 54 e 56, observa-se na maioria das decomposições uma similaridade nos sinais de tensão, principalmente nos sobressinais e diferenças entre os tempos de desligamento da rede com os tempos de desligamento dos inversores, ocorridos nas respectivas decomposições dos terceiros níveis de detalhes. Tempo de desligamento total aproximado de 0,02 s, menor que 2 s.

Figura 55 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-1



Fonte: Autoria Própria

Figura 56 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-1



Fonte: Autoria Própria

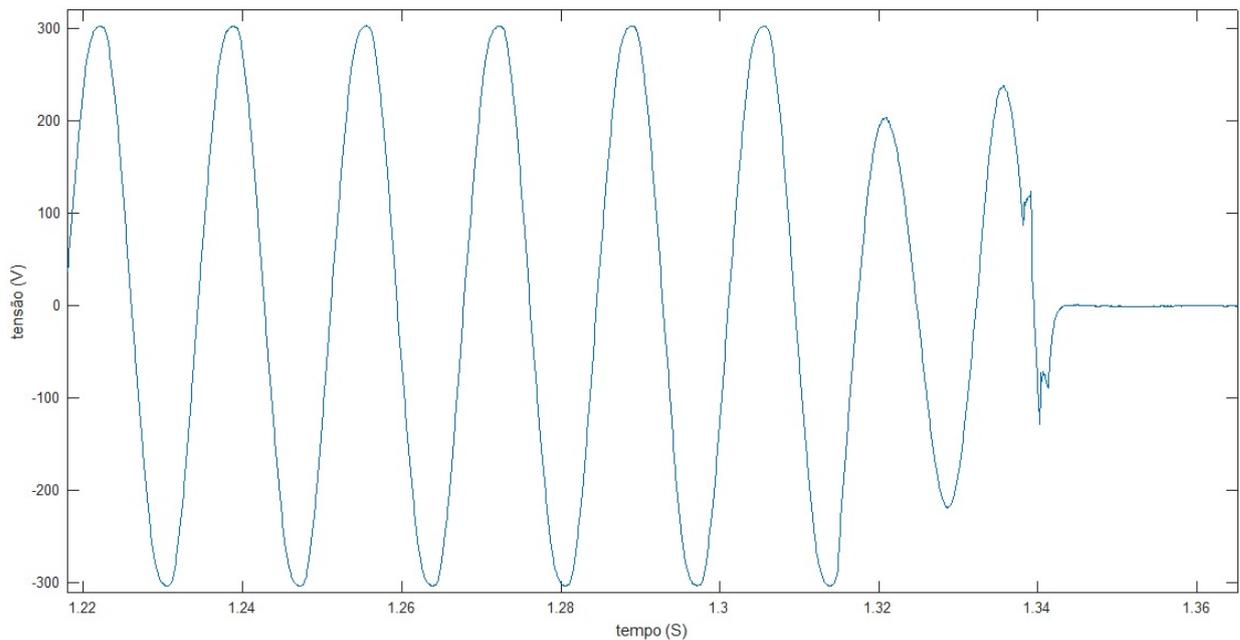
É importante salientar que antes do desligamento da rede a potência disponibilizada pelo inversor é maior do que a potência da carga e por isso após o desligamento da rede, ocorre uma elevação da tensão no PCC e conseqüentemente desligamento do inversor.

4.2.2 Caso - 2

Neste novo cenário o inversor disponibiliza uma potência máxima de 978 W, alimentando uma carga de um secador de cabelos de 1760 W. Toda potência do inversor é

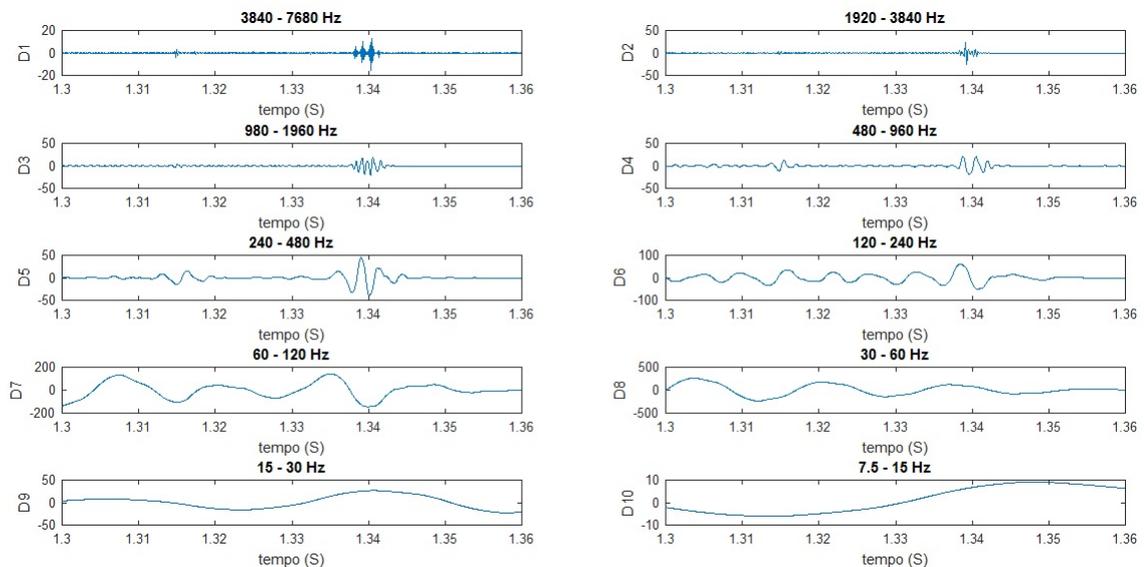
fornecida para carga e ainda necessitando de uma complementação da rede de distribuição elétrica. Após o desligamento da rede ocorre uma redução da tensão no PCC e consequentemente desligamento do inversor. Nas Figuras 57 e 58 são apresentadas o perfil da tensão e AMR na simulação realizada. Na Figura 57 observa-se uma redução da tensão do PCC após o desligamento da rede. Na decomposição do quinto nível de detalhe da Figura 58 observam-se os dois sobressinais referentes aos instantes de desligamento da rede e do inversor, respectivamente.

Figura 57 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-2



Fonte: Autoria Própria

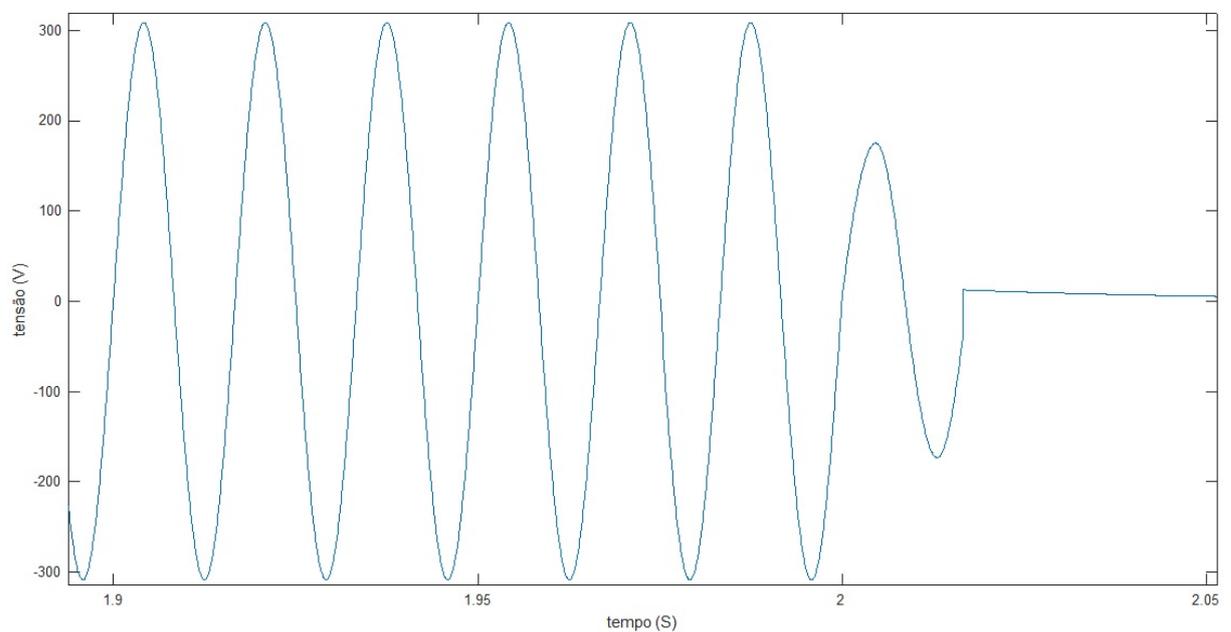
Figura 58 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-2



Fonte: Autoria Própria

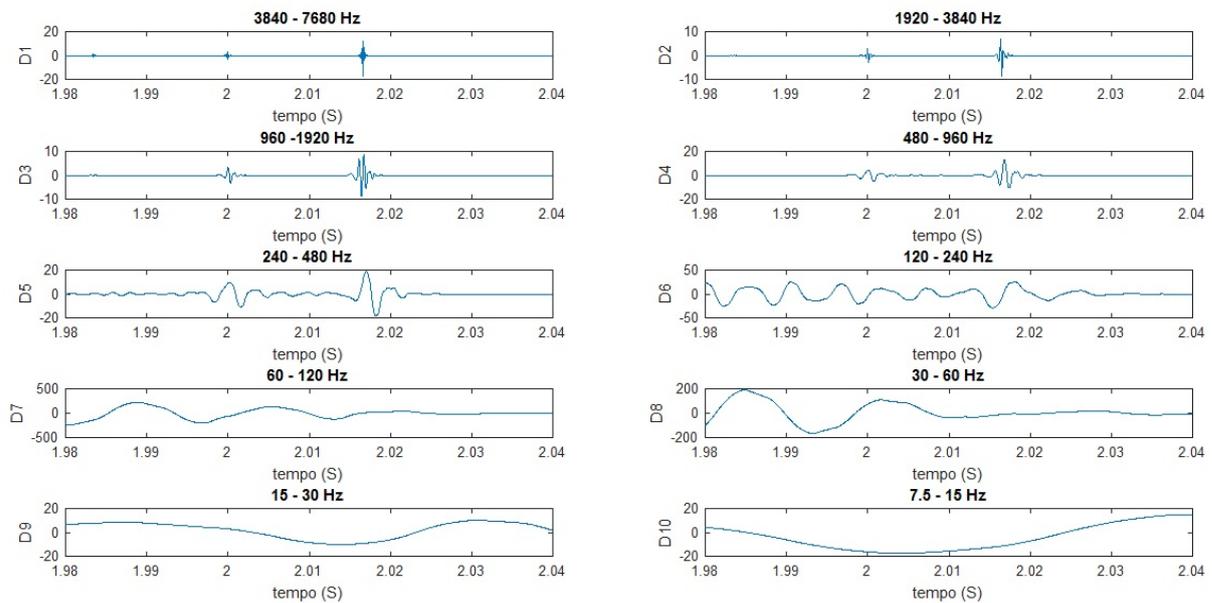
Para comparações do sistema do real com o sistema SGD proposto, foi desenvolvido no programa PSIM e MATLAB uma condição equivalente às simulações realizadas no SGD do sistema real e extraídas as informações da tensão no PCC e AMR conforme Figuras 59 e 60. Comparando as Figuras 57 e 59 observa-se uma similaridade entre os dois perfis da tensão nos respectivos V_{pcc} 's. Comparando também as Figuras 58 e 60, observa-se na maioria das decomposições uma similaridade nos sinais de tensão, principalmente nos sobressinais e diferenças entre os tempos de desligamento da rede com os tempos de desligamento dos inversores, ocorridos nas respectivas decomposições dos quintos níveis de detalhes. Tempo de desligamento total aproximado de 0,018 s, menor que 2 s.

Figura 59 – Transitório da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-2



Fonte: Autoria Própria

Figura 60 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-2



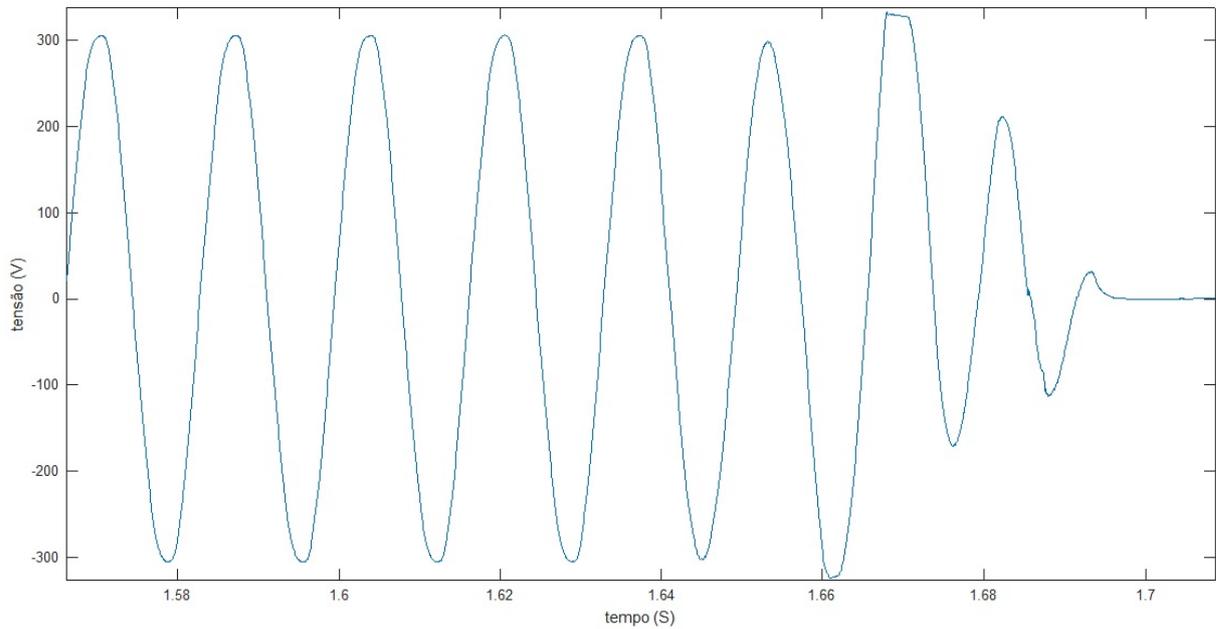
Fonte: Autoria Própria

Salienta-se-se nesse cenário que, antes do desligamento, a potência disponibilizada pelo inversor é menor do que a potência da carga e por isso após o desligamento da rede ocorre uma redução da tensão no PCC e consequentemente desligamento do inversor.

4.2.3 Caso - 3

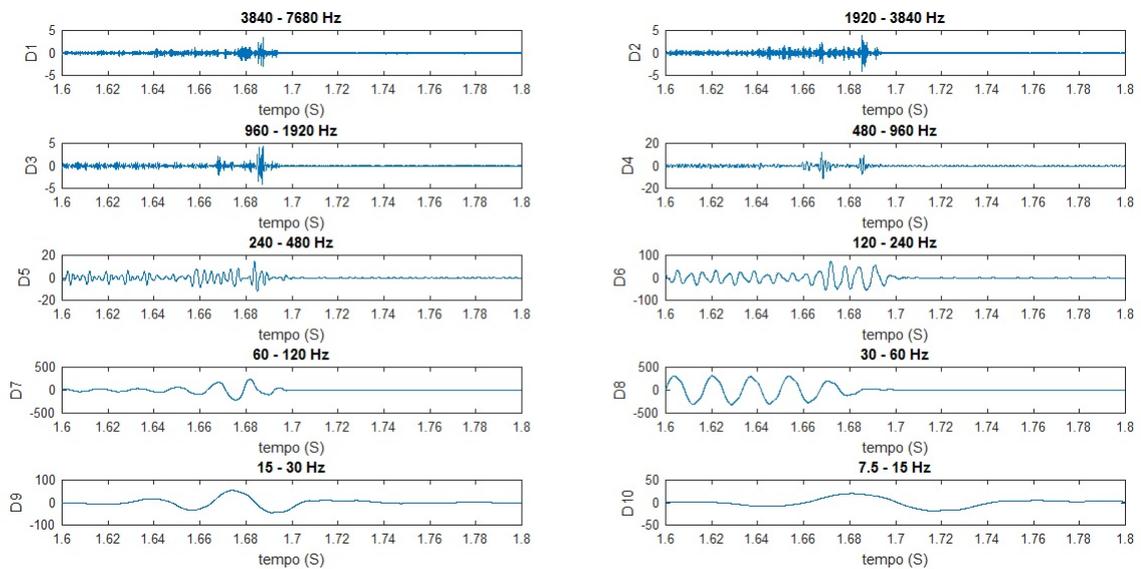
Neste cenário é investigada a efetividade do método para uma condição de quase equilíbrio entre a potência disponibilizada pelo inversor e a requerida pela carga. O inversor está disponibilizando uma potência máxima de 900 W, alimentando uma carga de um secador de cabelos de 942 W. Antes do desligamento toda potência do inversor estava sendo fornecida para a carga e ainda necessitando de uma complementação da rede de distribuição elétrica. Após o desligamento da rede ocorreu uma redução da tensão no PCC e consequentemente desligamento do inversor. Nas Figuras 61 e 62 são apresentadas o perfil da tensão e AMR na simulação realizada. Na Figura 61 observa-se uma redução da tensão do PCC após o desligamento da rede e na decomposição do terceiro nível de detalhes da Figura 62 observa-se os dois sobressinais referentes aos instantes de desligamento da rede e do inversor, respectivamente.

Figura 61 – Transitório da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-3



Fonte: Autoria Própria

Figura 62 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-3



Fonte: Autoria Própria

Para comparações do sistema do real com o sistema SGD proposto, foi desenvolvido no programa PSIM e MATLAB uma condição equivalente às simulações realizadas no SGD do sistema real e extraídas as informações da tensão no PCC e AMR conforme Figuras 63 e 64.

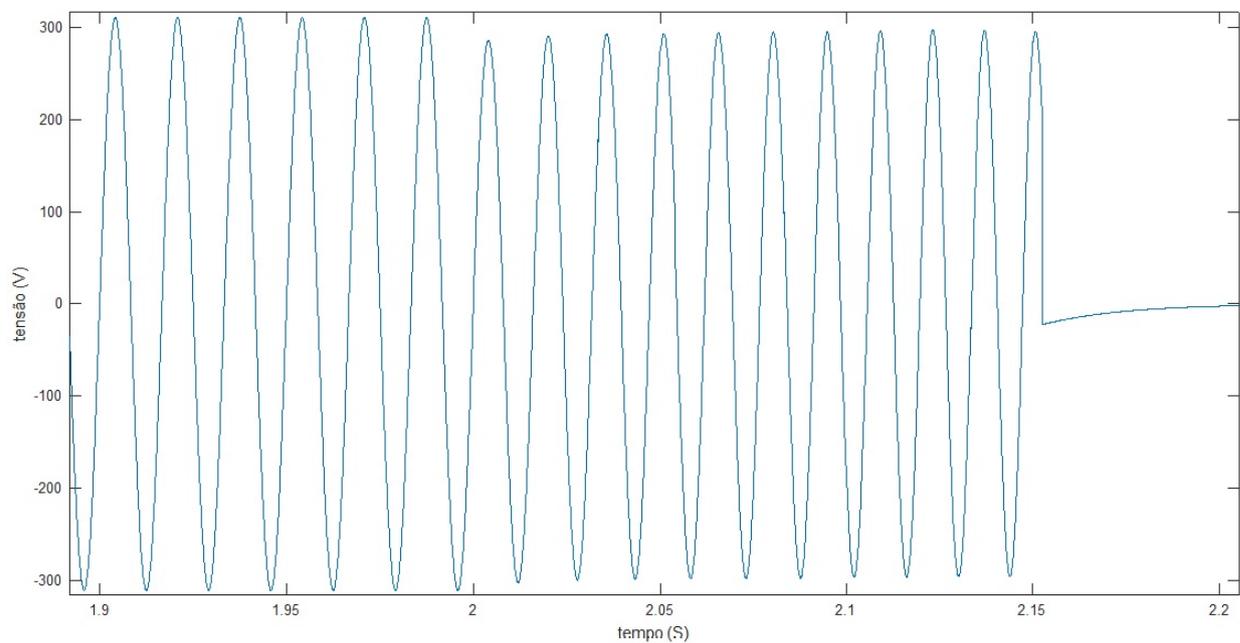
Comparando as Figuras 61 e 63 observa-se que após o desligamento da rede de distribuição, houve um afundamento de tensão nos respectivos V_{pcc} 's. Comparando

também as Figuras 62 e 64, observa-se nas decomposições D7 à D10, houve uma similaridade nos sinais de tensão.

Apesar dos tempos de desligamento total dos dois sistemas (real e simulado) desse caso não serem próximos, nenhum deles ultrapassou o tempo máximo de 2 s estabelecido pela ABNT NBR-62116 2012.

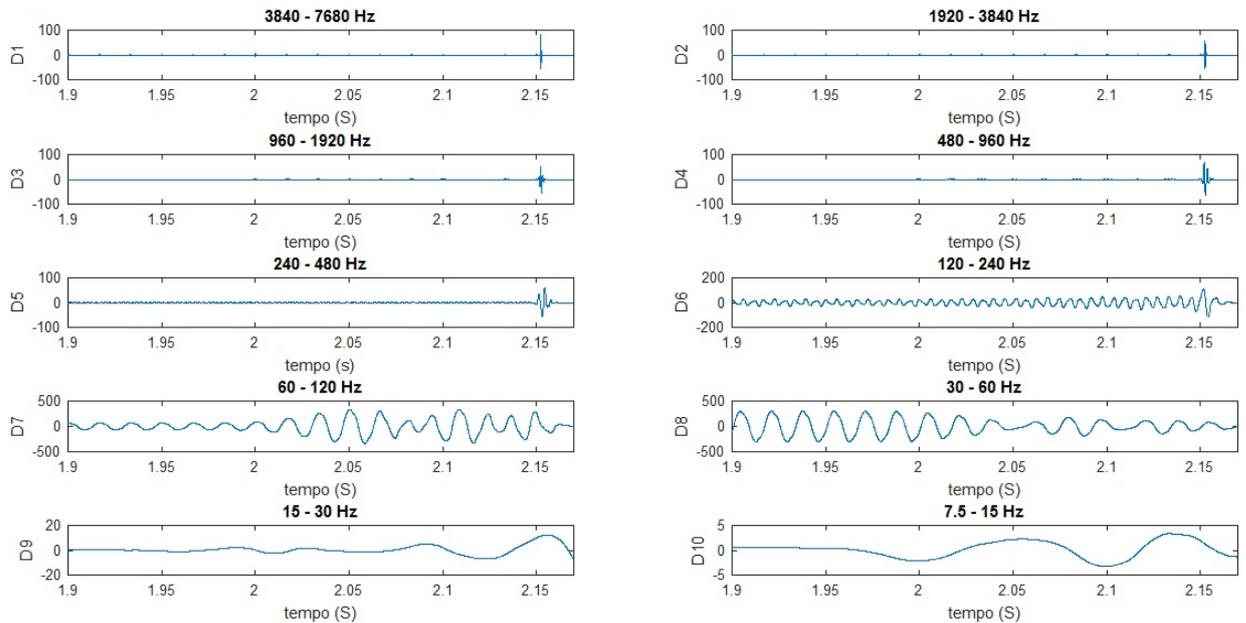
O tempo de detecção é maior no sistema simulado devido a técnica de detecção aplicada (sub e sobretensão e sub e sobrefrequência) ser de difícil detecção para o caso de equilíbrio entre o inversor e a carga. Provavelmente a técnica de detecção utilizada no inversor do sistema real seja diferente.

Figura 63 – Transitório da tensão PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-3



Fonte: Autoria Própria

Figura 64 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-3



Fonte: Autoria Própria

Para estudos comparativos do comportamento entre o sistema desenvolvido e o sistema real em outras condições de carga, é realizada a alteração da carga resistiva para uma carga RLC conforme apresentado no próximo item através dos estudos de casos 4 à 6.

4.3 Resultados práticos envolvendo um sistema real, alimentando uma carga RLC

Para os estudos comparativos entre o modelo desenvolvido e o sistema real foram realizados mais três estudos de casos complementares, sendo:

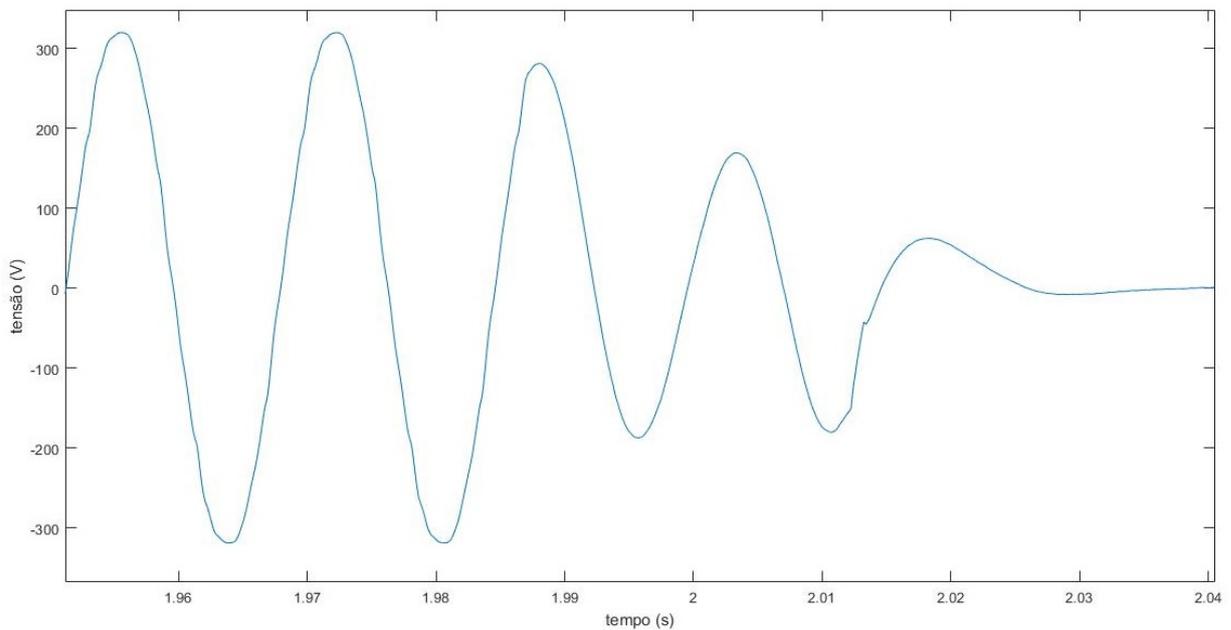
- Caso-4 - Sistema fotovoltaico gerando uma potência inferior à potência da carga;
- Caso-5 - Sistema fotovoltaico gerando uma potência superior à potência da carga;
- Caso-6 - Sistema fotovoltaico gerando uma potência próxima à potência da carga (condição de equilíbrio).

4.3.1 Caso - 4

Para este caso a potência da carga é de 927 W e a potência disponibilizada pelo sistema fotovoltaico de 309 W. Na Figura 65 é apresentado o sinal de tensão no PCC no instante do desligamento da rede elétrica. Observa-se um afundamento do sinal de tensão devido a incapacidade momentânea do sistema fotovoltaico em fornecer a potência requerida pela carga. Antes do desligamento, a potência requerida pela carga é fornecida

pelo sistema fotovoltaico e pela rede de distribuição elétrica. Após o desligamento da rede, ocorre subtensão no PCC e, conseqüentemente, desligamento do inversor.

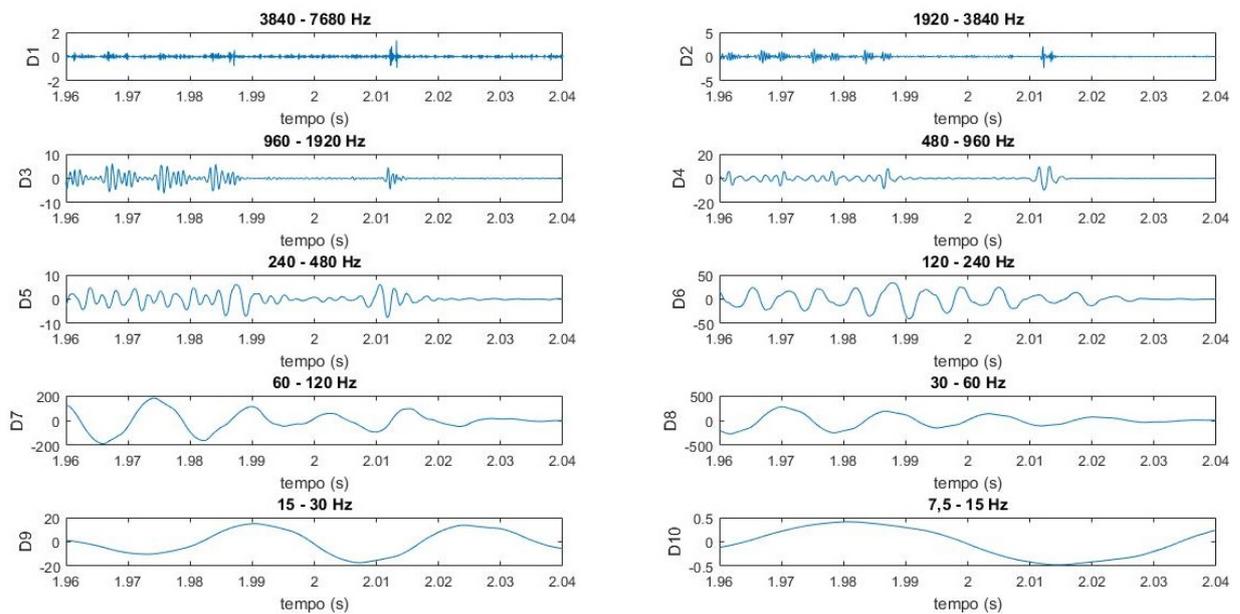
Figura 65 – Transitório de tensão no PCC sistema real - CASO-4 (potência de carga de 927 W e de geração de 309 W).



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 66 é apresentada a análise multiresolução da transformada *wavelet* utilizando dez níveis das componentes de detalhes do sinal de tensão. Pode-se observar os instantes do desligamento da rede (1,985 s) e inversor (2,015 s) nos níveis de detalhes D1 a D5. No nível de detalhes D6 o desligamento da rede não ficou evidente. Os níveis D7 e D8 (faixas em que se encontra a componente fundamental) observam-se os níveis de tensão mais elevados comparados aos demais níveis, finalizando com as decomposições dos níveis D9 e D10, que são nas faixas de baixa frequência.

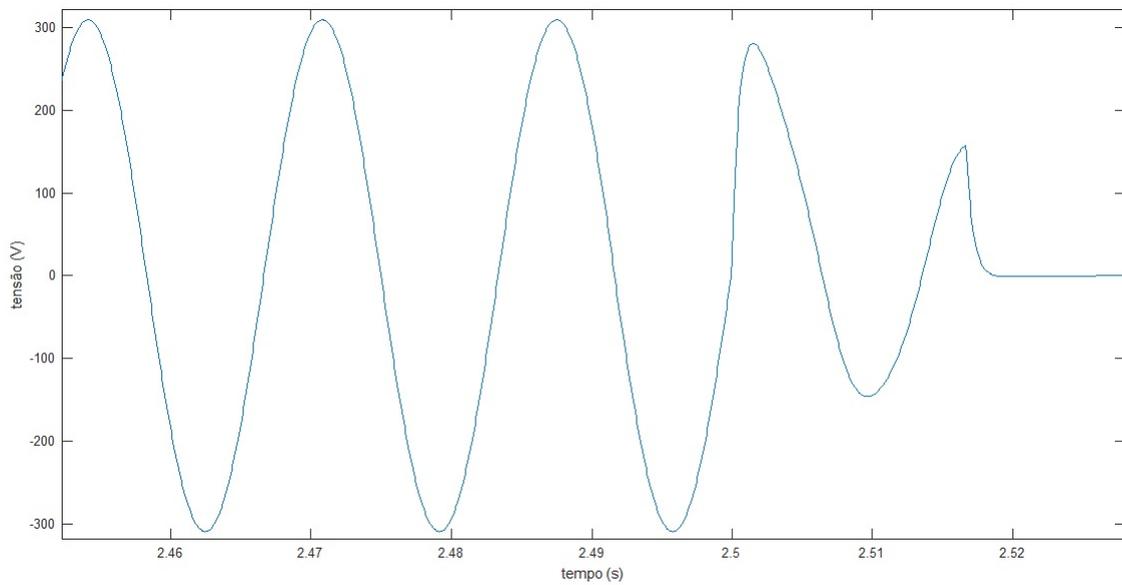
Figura 66 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-4 (potência da carga 927 W e de geração de 309 W)



Fonte: Autoria Própria

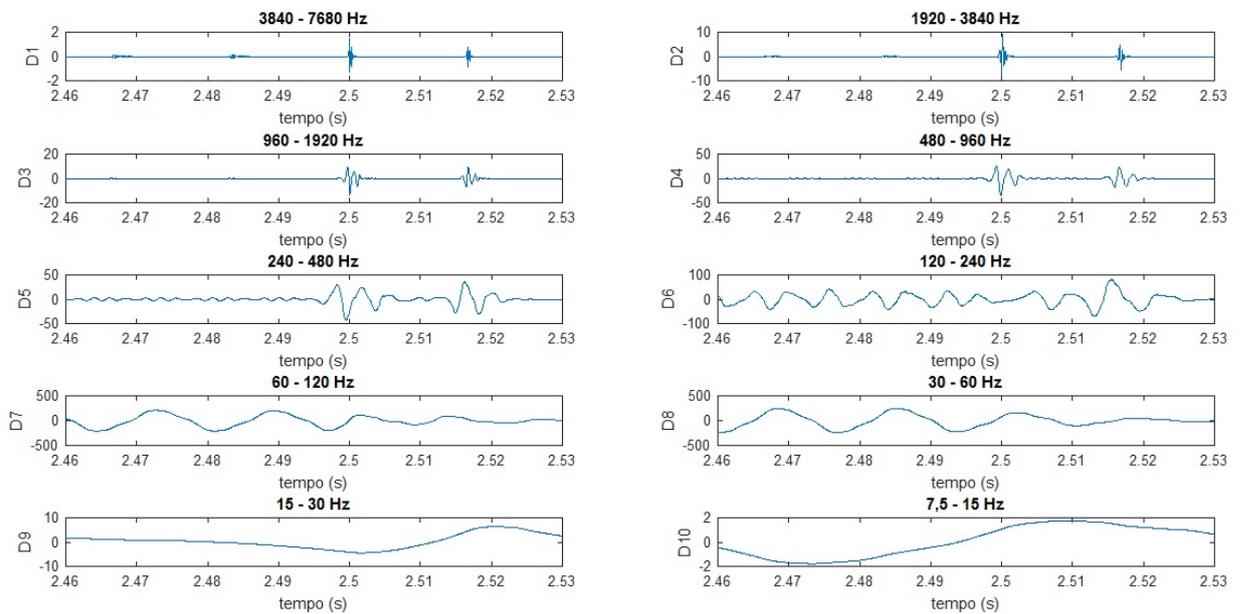
Para comparações do sistema do real com o sistema SGD proposto, foi desenvolvido no programa PSIM e MATLAB uma condição equivalente as simulações realizadas no SGD do sistema real e extraídas as informações da tensão no PCC e AMR conforme Figuras 67 e 68. Comparando as Figuras 65 e 67 observa-se uma similaridade entre os dois perfis da tensão nos respectivos V_{pcc} 's. Comparando também as Figuras 66 e 68, observa-se na maioria das decomposições uma similaridade nos sinais de tensão, principalmente nos sobressinais e diferenças entre os tempos de desligamento da rede com os tempos de desligamento dos inversores, ocorridos nas respectivas decomposições dos quatros primeiros níveis de detalhes. Tempos de desligamentos para o sistema real de 0,03 s e para o sistema simulado de 0,02 s, aproximadamente, que são menores que 2 s.

Figura 67 – Transitório de tensão no PCC - sistema simulado - CASO-4 (potência de carga de 927 W e de geração de 309 W).



Fonte: Autoria Própria

Figura 68 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-4 (potência de carga 927 W e de geração 309 W)



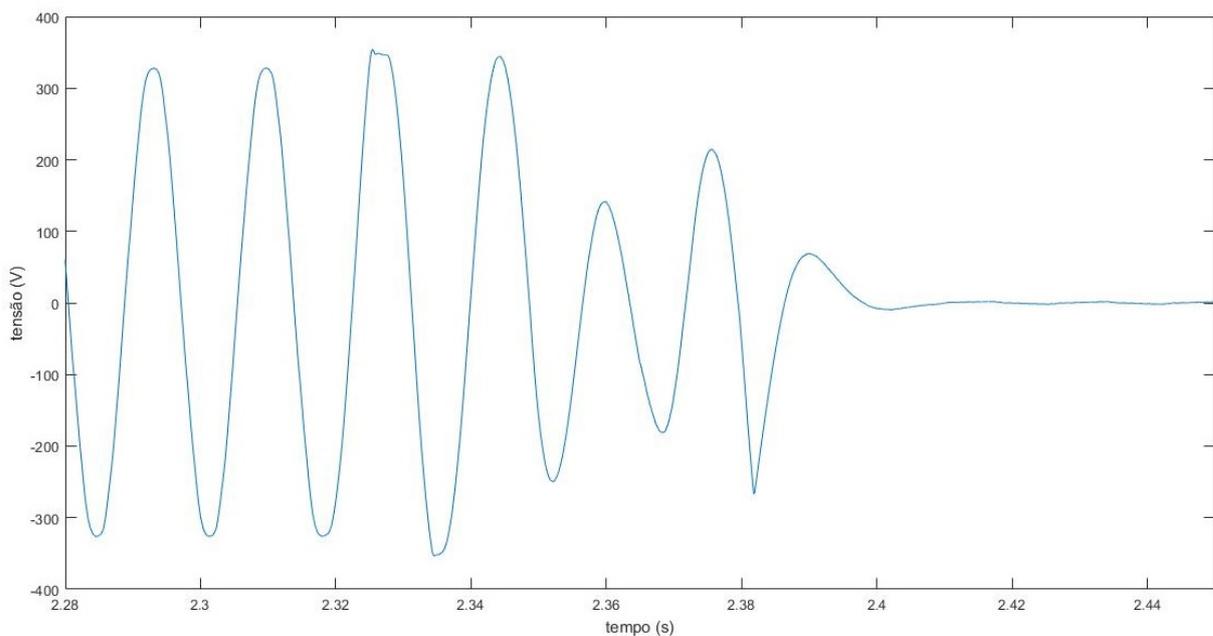
Fonte: Autoria Própria

Verificou-se nesse cenário que, antes do desligamento, a potência disponibilizada pelo inversor foi menor do que a potência da carga e por isso após o desligamento da rede ocorreu uma redução da tensão no PCC e conseqüentemente desligamento do inversor.

4.3.2 Caso - 5

Para esse caso a potência da carga é de 927 W e a potência disponibilizada pelo sistema fotovoltaico 1654 W. Na Figura 69 é apresentada o sinal de tensão no PCC no instante do desligamento da rede elétrica onde observa-se uma elevação do sinal de tensão da rede devido a potência disponibilizada pelo sistema fotovoltaico ser maior que a potência disponibilizada pela rede elétrica. Isso ocorreu porque antes do desligamento, parte da potência do inversor estava sendo fornecida para a carga e a complementação para rede de distribuição elétrica. Após o desligamento da rede ocorre uma elevação da tensão no PCC e conseqüentemente desligamento do inversor. A instabilidade do transitório do sinal de tensão após desligamento ocorre devido tratar de um sistema real ficando a potência instantânea fornecida pelo sistema fotovoltaico, sujeita a alterações devido a variações da radiação solar e sombreamentos nos painéis fotovoltaicos.

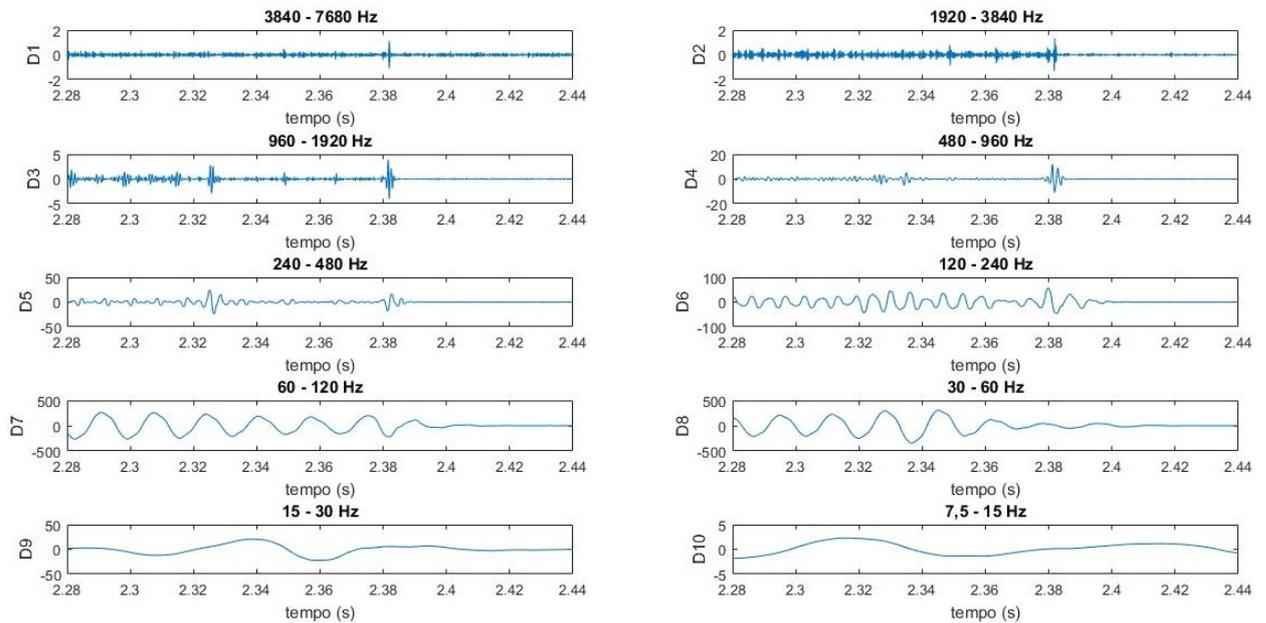
Figura 69 – Transitório da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-5 (potência de carga de 927 W e de geração 1654 W)



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 70 são apresentadas o perfil da tensão e AMR da transformada *wavelet* através dos dez níveis de detalhes do sinal de tensão. Pode-se observar os instantes do desligamento da rede (2,325 s) e inversor (2,385 s) nos níveis de detalhes D3 a D5. Nos níveis D1, D2 e D6 esses desligamentos não ficaram evidentes. Os níveis D7 e D8 (faixas em que se encontra a componente fundamental) observa-se os níveis de tensão mais elevados comparados aos demais níveis, finalizando com as decomposições dos níveis D9 e D10 que são nas faixas de baixa frequência.

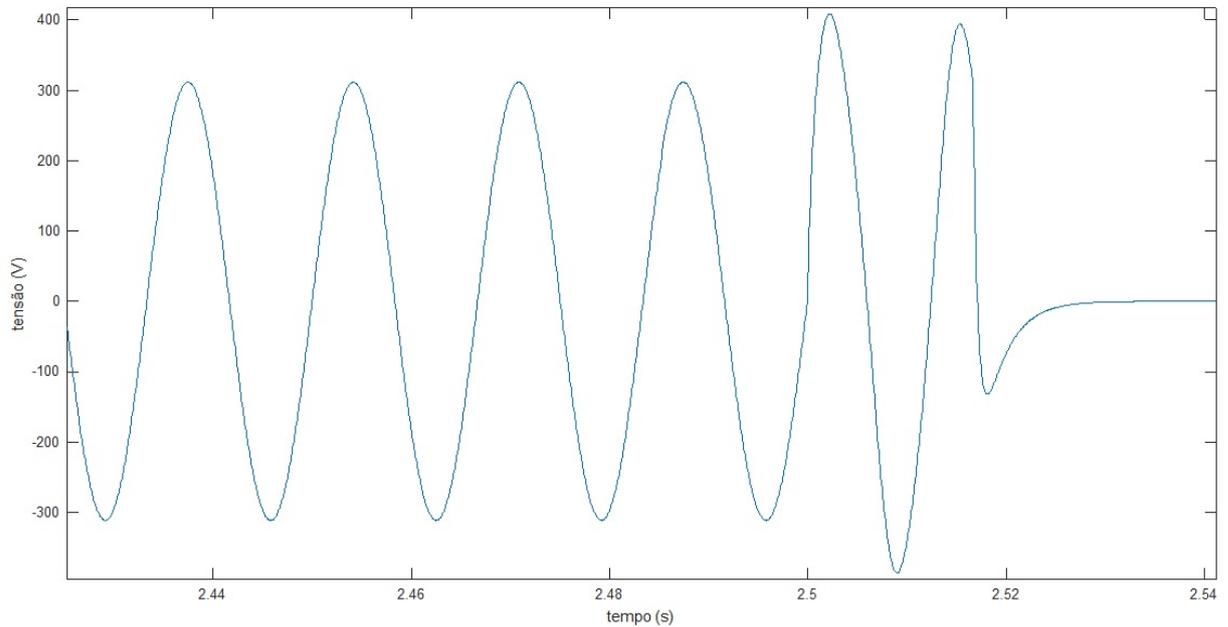
Figura 70 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-5 (potência de carga 927 W e de geração 1654 W)



Fonte: Autoria Própria

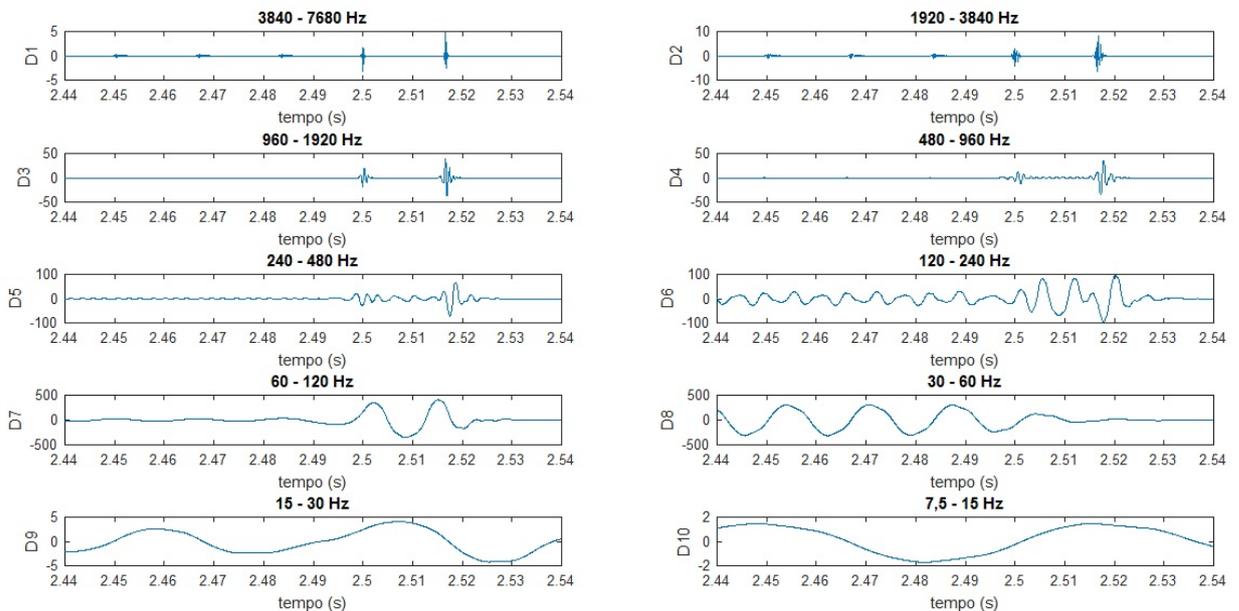
Para comparações do sistema real com o sistema SGD proposto, foi desenvolvido no programa PSIM e MATLAB uma condição equivalente às simulações realizadas no SGD do sistema real e extraídas as informações da tensão no PCC e AMR conforme Figuras 71 e 72. Comparando as Figuras 69 e 71 observa-se uma similaridade entre os dois perfis da tensão nos respectivos V_{pcc} 's. Comparando também as Figuras 70 e 72, observa-se na maioria das decomposições uma similaridade nos sinais de tensão, principalmente nos sobressinais e diferenças entre os tempos de desligamento da rede com os tempos de desligamento dos inversores, ocorridos nas respectivas decomposições dos níveis de detalhes D3 à D5 no sistema real e D3 e D4 no sistema simulado. Tempo de desligamentos totais aproximados de 0,06 s para o sistema real e 0,03 s para o sistema simulado, sendo ambos menor que 2 s.

Figura 71 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-5 (potência de carga de 927 W e de geração de 1654W).



Fonte: Autoria Própria

Figura 72 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-5 (potência de carga 927 W e de geração 1654 W)



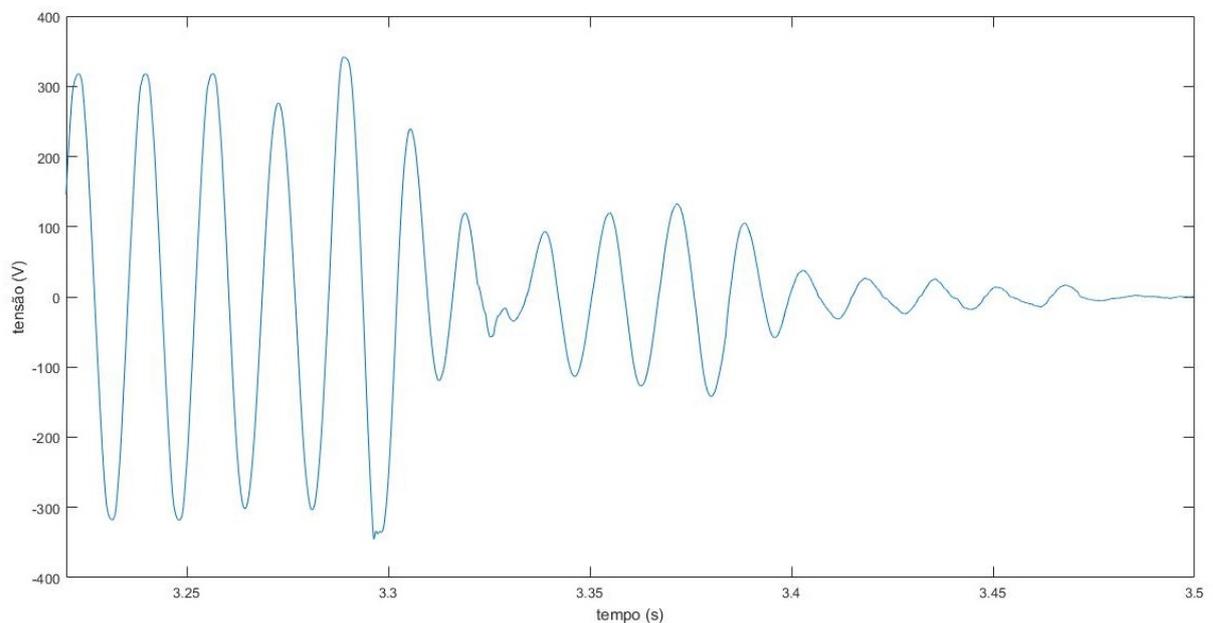
Fonte: Autoria Própria

Verificou-se nesse cenário que antes do desligamento a potência disponibilizada pelo inversor foi maior do que a potência da carga e por isso após o desligamento da rede, ocorreu uma elevação da tensão no PCC e consequentemente desligamento do inversor.

4.3.3 Caso - 6

Para esse caso a potência da carga é de 927 W e a potência disponibilizada pelo sistema fotovoltaico 1000 W. Na Figura 73 é apresentada o sinal de tensão no PCC no instante do desligamento da rede elétrica onde observa-se uma instabilidade do sinal de tensão da rede devido a potência disponibilizada pelo sistema fotovoltaico ser próxima da potência disponibilizada pela rede elétrica. Isso ocorre porque antes do desligamento, pequena parte da potência do inversor estava sendo fornecida para a carga e a complementação para rede de distribuição elétrica. Após o desligamento da rede ocorreu uma pequena elevação da tensão no PCC e conseqüentemente desligamento do inversor. Pode-se observar também que o tempo de desligamento total (rede elétrica e inversor) é superior aos casos anteriores devido ao sistema fotovoltaico operar com uma fonte de corrente tomando a tensão da rede como referência. No instante do desligamento a potência disponibilizada pelo sistema fotovoltaico estava muito próxima da potência de rede elétrica ocasionando um baixa variação na tensão e conseqüente detecção mais prolongada por parte do sistema anti-ilhamento do inversor.

Figura 73 – Transitório do sinal de tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-6 (potência de carga 927 W e de geração 1000 W)

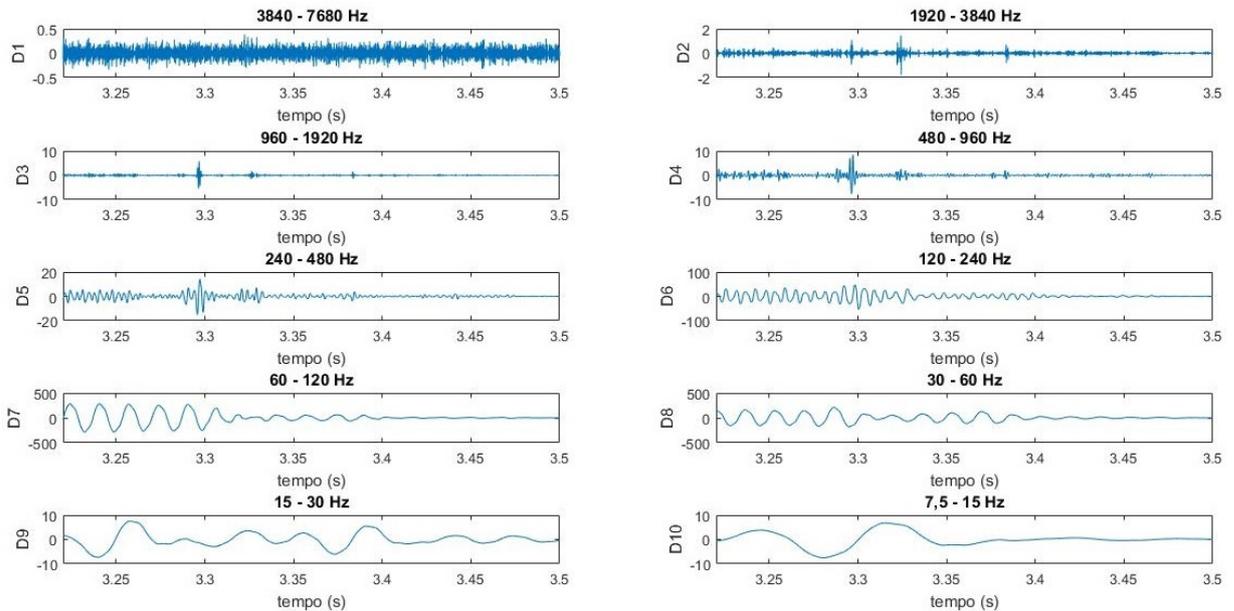


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 74 são apresentadas o perfil da tensão e AMR da transformada *wavelet* através dos dez níveis de detalhes do sinal de tensão. Pode-se observar os instantes do desligamento da rede (3,275 s) e inversor (3,375 s) nos níveis de detalhes D3 a D4. Nos níveis D1, D2, D5 e D6 esses desligamentos não ficaram evidentes. Nos níveis D7 e D8 observa-se antes do desligamento as faixas onde se encontra a componente fundamental

com uma estabilidade no tempo do sinal de tensão dos detalhes D7 e D8, finalizando com as decomposições dos níveis D9 e D10 que são nas faixas de baixa frequência.

Figura 74 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema real - CASO-6 (potência de carga 927 W e de geração 1000 W)

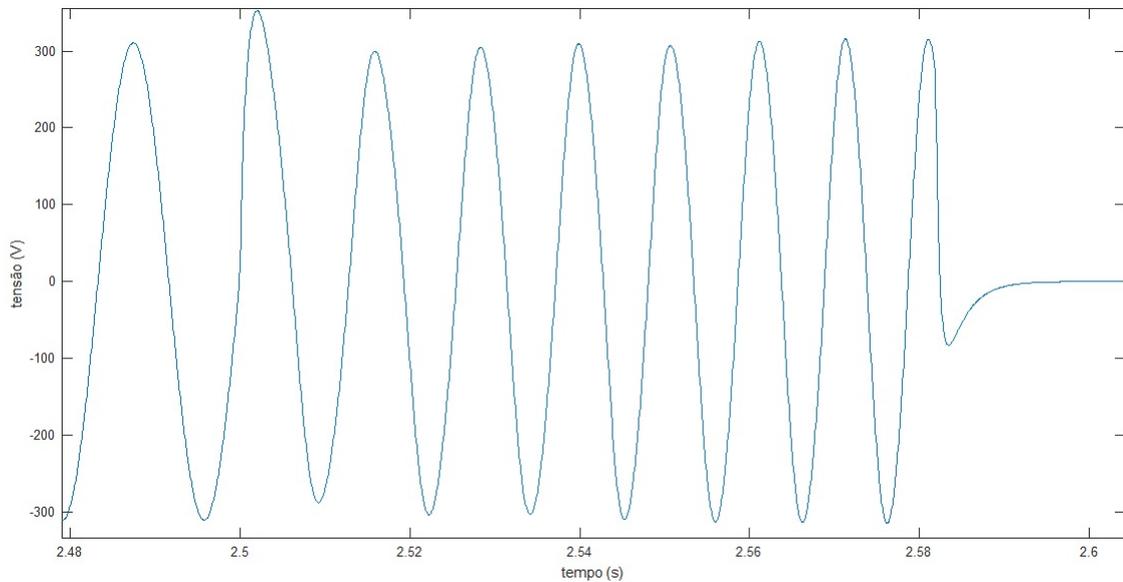


Fonte: Autoria Própria

Para comparações do sistema do real com o sistema SGD proposto, foi desenvolvido no programa PSIM e MATLAB uma condição equivalente as simulações realizadas no SGD do sistema real e extraídas as informações da tensão no PCC e AMR conforme Figuras 75 e 76.

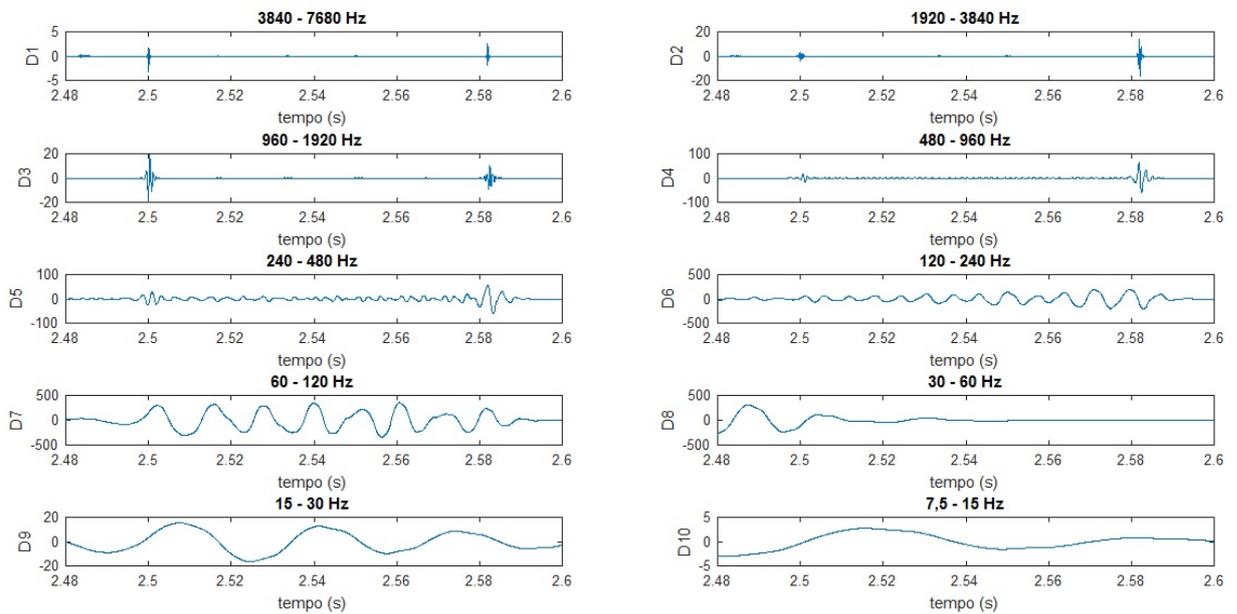
Comparando as Figuras 73 e 75 observa-se que após o desligamento da rede de distribuição, houve uma tendência de estabilidade dos sinais de tensão nos respectivos V_{pcc} 's, não definindo se o perfil da tensão elevaria ou abaixaria. Comparando também as Figuras 74 e 76, observa-se nas decomposições D1 à D4, uma maior instabilidade do sinal de tensão do sistema real em relação ao sistema simulado. Apesar dessas diferenças os tempos de detecções dos dois sistemas ficaram muito próximos, ficando o tempo de detecção do sistema real em 0,1 s e o tempo de detecção do sistema simulado em 0,09 s.

Figura 75 – Transitório de tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-6 (potência de carga de 927 W e de geração de 1000W).



Fonte: Autoria Própria

Figura 76 – AMR da tensão no PCC durante ilhamento - sistema simulado - CASO-6 (potência de carga 927 W e de geração de 1000 W)



Fonte: Autoria Própria

4.4 Considerações finais

Neste capítulo foram abordados os resultados práticos com as análises envolvendo um sistema real de SGD FV comparado com a modelagem proposta.

Os resultados obtidos nesta seção mostram que, nos casos em que a potência gerado pelo sistema fotovoltaico é menor ou maior que a potência da carga, os tempos de detecções são menores.

Quando a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é próxima da potência da carga, as identificações dos distúrbios durante o desligamento da rede e inversor ficam menos evidente e conseqüentemente, os tempos de detecções são maiores.

Os níveis de detalhes das decomposições das AMRs que possibilitaram melhores visualizações dos instantes de desligamentos das redes e inversores, tanto nos sistemas reais como nos simulados, foram os níveis D3 (960- 1920 Hz) e D4 (480 - 960 Hz).

Os transitórios dos sinais de tensão nos PCCs dos seis casos não mostram de forma clara os respectivos instantes dos desligamentos da rede e inversor e também em que faixas de frequências ocorrem com mais evidência.

É importante salientar que com a utilização das decomposições em AMR da transformada *Wavelet*, cria condições para uma análise de melhor qualidade dos transitórios dos sinais de tensão nos PCCs, mostrando os instantes dos desligamentos da rede e inversor, as faixas de frequências que ocorreram com mais evidência e também os níveis de tensão ao longo do tempo em cada faixa de frequência.

No capítulo 5, a seguir, são apresentas as conclusões do trabalho e recomendações de trabalhos futuros.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para o estudo dos sistemas de detecção de ilhamento a partir da modelagem em programas computacionais, devidamente ajustados às características de um sistema real com o objetivo de substituir os estudos em campo e também nas bancadas de testes.

O sistema de proteção anti-ilhamento apresentado atende ao tempo máximo estabelecido pela ABNT-62116 2012 para as condições analisadas (2 s).

Os tempos totais de detecções foram menores nos casos em que as potências geradas pelos sistemas fotovoltaicos foram maiores ou menores do que as potências das cargas, quando comparados aos casos em que as potências geradas pelos sistemas fotovoltaicos foram próximas das potências das cargas.

Para os cenários em que as potências geradas pelos sistemas fotovoltaicos foram próximas das potências das cargas os tempos de detecções foram maiores devido ser um sistema em que o inversor estava fornecendo praticamente a potência necessária para a carga e no instante do desligamento da rede, o fluxo de corrente do sistema fotovoltaico fazia com que a tensão ficasse próxima da tensão da rede, reduzindo portanto a sensibilidade do sistema de proteção anti-ilhamento do inversor e conseqüentemente aumentado o tempo de detecção por parte do inversor.

Nos demais casos os desequilíbrios desses fluxos foram maiores e conseqüentemente aumenta a sensibilidade do sistema de proteção anti-ilhamento e conseqüentemente uma redução no tempo de detecção por parte do inversor.

Os níveis de detalhes das decomposições das AMRs D3 (960- 1920 Hz) e D4 (480 - 960 Hz) possibilitaram melhores visualizações dos instantes de desligamentos das redes e dos inversores, tanto nos sistemas reais como nos simulados. Segundo Cesar (2018), o nível de detalhe D3 está relacionado com as faixas de altas frequências (ruídos) onde podem estar presentes os harmônicos 16° à 32°. O nível de detalhes D4 está relacionado com as faixas de média frequência (oscilações transitórias) onde podem estar presentes os harmônicos 8° ao 16°. No trabalho do referido autor o quarto nível de detalhes foi o que apresentou maiores variações, sendo considerado o melhor nível para detecção de ilhamento através dos detalhes.

As análises dos transitórios dos sinais de tensão nos PCCs somente pela análise do sinal de uma forma de onda única no tempo, fica impossível analisar os detalhes dos mesmos no tempo e os instantes das ocorrências dos eventos, sendo necessária fazer as decomposições da transformada *wavelet* para realizar essas análises.

A transformada *wavelet* pode ser aplicada nos estudos de sinais e melhoria na detecção de ilhamento e distúrbios da rede podendo complementar os métodos tradicionais e também em estudos de qualidade de energia elétrica.

É importante o uso da transformada *wavelet* da família Daubechies nas análises de sinais em sistemas elétricos, pois através das mesma pode-se fazer análises de sinais no domínio do tempo e frequência, em diversas faixas de frequências permitindo análises com mais detalhes e qualidade quando comparada aos métodos tradicionais.

Os instantes da ocorrência dos sobressinais que ocorrem no sistema elétrico podem ser processados dentro de um algoritmo para detecções e melhorias dos sistemas anti-ilhamentos convencionais.

A proposta deste trabalho para detecção de ilhamento foi permitir, a partir da metodologia desenvolvida, condições de análises com qualidade sobre os transitórios que ocorrem durante o instante do ilhamento em SGD FV.

Com este trabalho buscou-se contribuir nos estudos e aplicações de sistemas fotovoltaicos conectados a rede de distribuição de energia elétrica, enfatizando a importância da transformada *wavelet* dentro das análises de sistemas anti-ilhamentos.

5.1 Trabalhos futuros

Como sugestões para desdobramentos deste trabalho:

- Realizar outros cenários de emulações com novas cargas RLC e comparar com o modelo desenvolvido;
- Desenvolvimento de um algoritmo para detecção de ilhamento a partir do modelo proposto;
- Aplicar aos conjuntos de dados desenvolvidos diversas famílias das *wavelet* e realizar um estudo comparativo entre as mesmas;
- Substituição do sistema fotovoltaico utilizado por outros e realizar análises de comportamento do modelo desenvolvido sobre os mesmos;
- Testar outros métodos de detecção de ilhamento substituindo o método utilizado no modelo desenvolvido.

Referências

- ABDULLAH, A. et al. Wavelet based de-noising for on-site partial discharge measurement signal. **Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci**, v. 16, n. 1, p. 259–266, 2019.
- ABNT, N. 16149: Sistemas fotovoltaicos (fv)-características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2013.
- ABNT, N. 16150: **Sistemas fotovoltaicos (FV)–Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição–Procedimento de ensaio de conformidade**, 2013.
- ALLAN, O. A.; MORSE, W. G. A new passive islanding detection approach using wavelets and deep learning for grid-connected photovoltaic systems. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 199, p. 107437, 2021.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução normativa 482. 2012.
- BALAGUER-ÁLVAREZ, I. J.; ORTIZ-RIVERA, E. I. Survey of distributed generation islanding detection methods. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 8, n. 5, p. 565–570, 2010.
- BAYRAK, G. Wavelet transform-based fault detection method for hydrogen energy-based distributed generators. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 43, n. 44, p. 20293–20308, 2018.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Boletim mensal de Energia, mês base Janeiro de 2022**, 2022.
- CARVALHO, F. M. et al. Uma estratégia ativa para detecção de ilha em geradores fotovoltaicos por meio de injeção de sinais de teste. Artigo - Universidade Federal do Pará, 2016.
- CESAR, T. d. M. **Uso da transformada wavelet para análise dinâmica de um sistema fotovoltaico conectado à rede e sua interação com a rede elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2018.
- CHANG, W.-Y. A hybrid islanding detection method for distributed synchronous generators. In: IEEE. **The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-**. [S.l.], 2010. p. 1326–1330.
- ENEL. ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ. Especificação técnica 122 - versão nº02. 2018.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia-2024. 2015.
- FANTI, C. A. Análises e comparações de algoritmos de sincronização para aplicações em eletrônica de potência. Escola de Engenharia de São Carlos – 2016.

- FATAMA, A.-Z.; HAQUE, A.; KHAN, M. A. A multi feature based islanding classification technique for distributed generation systems. In: IEEE. **2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)**. [S.l.], 2019. p. 160–166.
- FILHO, O. D. **Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003.
- FREITAS, M. P. **Utilização da transformada de wavelet para detecção de variações anormais de tensão em sistemas elétricos com geração distribuída**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- IEC, A. N. 62116: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2012.
- KARIMI-GHARTEMANI, M. et al. Addressing dc component in pll and notch filter algorithms. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 27, n. 1, p. 78–86, 2011.
- KHAN, M. A. et al. Islanding detection techniques for grid-connected photovoltaic systems—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 154, p. 111854, 2022.
- KOLLI, A. T.; GHAFFARZADEH, N. A novel phaselet-based approach for islanding detection in inverter-based distributed generation systems. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 182, p. 106226, 2020.
- LIDULA, N.; RAJAPAKSE, A. A pattern recognition approach for detecting power islands using transient signals—part i: Design and implementation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 25, n. 4, p. 3070–3077, 2010.
- LIM, J. R. et al. Case studies for non-detection of islanding by grid-connected in-parallel photovoltaic and electrical energy storage systems inverters. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 5, p. 817, 2019.
- MALLAT, S. et al. A wavelet tour of signal processing: The sparse way. **AP Professional, Third Edition, London**, 2009.
- MARCHESAN, G. et al. **Detecção de ilhamento em sistemas de distribuição com geração síncrona distribuída**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- MARQUES, J. et al. A reliable setting-free technique for power transformer protection based on wavelet transform. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 162, p. 161–168, 2018.
- NAGATA, E. A. **Detecção, segmentação e classificação de afundamentos de tensão em sistemas elétricos de potência**. Dissertação (Mestrado) — UFLA, 2018.
- PADUA, M. S. d. et al. Técnicas digitais para sincronização com a rede elétrica, com aplicação em geração distribuída. Artigo - Universidade Estadual de Campinas, 2006.

- PAIVA, S. C. et al. A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to ac microgrids. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 121, p. 106032, 2020.
- PAIVA, S. d. C. **Proteção em sistemas elétricos com geração distribuída utilizando a transformada wavelet**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- POLIKAR, R. The wavelet tutorial: the engineer's ultimate guide to wavelet analysis. Iowa State Univ., 2002.
- RAZA, S. et al. Analysis of power system parameters for islanding detection using wavelet transform. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**. Vol. No.3, March 2020, pp. 1184-1193, Journal homepage: <http://ijeecs.iaescore.com>, 2020.
- RAZA, S. et al. 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.
- SABARIGIRI, D.; GNANADASS, R. Measurement of power quality disturbances in various electrical loads and its analysis using wavelet transform. In: IEEE. **2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)**. [S.l.], 2019. p. 1–5.
- SEVERO, L. et al. **Estudo e implementação de métodos de proteção de anti-ilhamento aplicados a sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) — Florianópolis, SC, 2011.
- SHARMA, R.; SINGH, P. Islanding detection and control in grid based system using wavelet transform. In: IEEE. **Power India Conference, 2012 IEEE Fifth**. [S.l.], 2012. p. 1–4.
- SHAYEGHI, H.; SOBHANI, B. Zero ndz assessment for anti-islanding protection using wavelet analysis and neuro-fuzzy system in inverter based distributed generation. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 79, p. 616–625, 2014.
- SILVA, H. T. d. **Estudo sobre a interação de métodos anti-ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores**. Dissertação (Mestrado), 2016.
- SILVA, P. **Estudo de compartilhamento de carga entre múltiplas fontes renováveis compondo uma microrrede cc**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, 2018.
- TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems**. [S.l.]: Livro - John Wiley & Sons, 2011. v. 29.
- VATANI, M.; SANJARI, M.; GHAREHPETIAN, G. Detection of islanding conditions in distribution network with penetration of dgs based on wavelet analysis. In: IEEE. **2013 Smart Grid Conference (SGC)**. [S.l.], 2013. p. 26–30.
- WEEKS, M. Processamento digital de sinais utilizando matlab e wavelets. **LTC, Rio de Janeiro**, 2012.

YANG, Y.; BLAABJERG, F. Synchronization in single-phase grid-connected photovoltaic systems under grid faults. In: IEEE. **2012 3rd IEEE international symposium on power electronics for distributed generation systems (PEDG)**. [S.l.], 2012. p. 476–482.

YILMAZ, A.; BAYRAK, G. A real-time uwt-based intelligent fault detection method for pv-based microgrids. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 177, p. 105984, 2019.