

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
MARCELO PANSANI FREITAS

**UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE  
WAVELET PARA DETECÇÃO DE VARIAÇÕES  
ANORMAIS DE TENSÃO EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Uberlândia/MG  
2016

MARCELO PANSANI FREITAS

UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET  
PARA DETECÇÃO DE VARIAÇÕES ANORMAIS DE  
TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS COM  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado  
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal  
de Uberlândia como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Ciências, área de  
concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

Uberlândia/MG  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

F866u  
2016      Freitas, Marcelo Pansani, 1973-  
Utilização da transformada de wavelet para detecção de variações  
anormais de tensão em sistemas elétricos com geração distribuída /  
Marcelo Pansani Freitas. - 2016.  
178 f. : il.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica -  
Teses. I. Guimarães, Geraldo Caixeta, 1954- II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

---

CDU: 621.3

UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA  
DETECÇÃO DE VARIAÇÕES ANORMAIS DE TENSÃO EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Marcelo Pansani Freitas

Dissertação apresentada por Marcelo Pansani Freitas à Universidade Federal de  
Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título Mestre em Ciências.

---

Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

Orientador

---

Prof. Dr. Darizon Alves de Andrade

Coord. do Curso de Pós-Graduação

UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA  
DETECÇÃO DE VARIAÇÕES ANORMAIS DE TENSÃO EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

MARCELO PANSANI FREITAS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Mestre em Ciências,  
área de concentração: Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04/03/2016.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães (orientador)  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Adélio José de Moraes  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Daniel Araújo Caixeta  
Faculdade Pitágoras de Uberlândia

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”. (*Arthur Schopenhauer*)

*Dedico este trabalho à minha família,  
principalmente minha esposa e meu filho,  
pelo incentivo e apoio constantes.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Andréa e meu filho João Pedro, pela compreensão, colaboração e carinho incondicional.

À minha mãe, Mirtis pelo apoio e acolhida, nos momentos de precisão.

Ao meu pai, Walter que, mesmo não estando presente neste plano, me deu forças nos momentos de insegurança e dificuldade.

Aos meus irmãos Waleska, Valéria, Karina e Márcio.

À minha cunhada Carla Rosane, que me acolheu e proporcionou condições de estadia na cidade de Uberlândia, juntamente com meu sogro Aby, sempre prestativo e atencioso.

Aos colegas do Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela colaboração, ensinamentos e companheirismo de todos, sem exceção.

Aos amigos do IFTM, em especial ao professor Julio César que colaborou imensamente para a realização deste trabalho.

À secretária de pós-graduação, Cinara, por toda colaboração e presteza.

Ao professor Geraldo Caixeta Guimarães que sempre me motivou através de uma palavra amiga, uma orientação ou um aconselhamento nos momentos de incerteza. Me ofereceu um crédito de confiança, me recebendo no programa de Mestrado, com sua enorme capacidade de clareza em realizar sua orientação nos trabalhos.



## RESUMO

O aumento crescente da demanda na energia elétrica e a previsão de diminuição, cada vez maior, das reservas de combustíveis fósseis, além de aumentar a preocupação ambiental no uso destes têm gerado uma preocupação quanto à qualidade da geração de energia elétrica, tornando bem-vindos novos investimentos na geração através de fontes alternativas, limpas e renováveis.

A geração distribuída é uma das principais soluções para os sistemas de geração independentes e autossuficientes, como é o caso do setor sucroenergético. Este setor tem crescido consideravelmente, contribuindo de modo expressivo na produção de energia elétrica para as redes de distribuição.

Diante desta conjuntura, um dos os principais objetivos deste trabalho consiste em propor a implementação de um algoritmo capaz de detectar distúrbios de ilhamento no sistema elétrico, caracterizados por situações de sub ou sobretensão. O algoritmo também deve quantizar o tempo em que o sistema esteve 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 multiresolução (AMR) para detecção dos distúrbios gerados. Os dados obtidos podem ser tratados de modo a serem utilizados para uma possível manutenção preditiva nas nos equipamentos de proteção das redes elétrica, visto que estes estão sujeitas a danos quando em prolongada operação sob condições anormais de frequência e tensão.

**Palavras-chave:** *Geração Distribuída, Ilhamento, Subtensão, Sobretensão, Distúrbios, Transformada de Wavelet.*

## ABSTRACT

The increasing demand in electricity and decrease forecast, increasingly, of fossil fuel reserves, as well as increasing environmental concern in the use of these have generated a concern about the quality of electricity generation, making it well welcome new investments in generation through alternative, clean and renewable sources.

Distributed generation is one of the main solutions for the independent and self-sufficient generating systems, such as the sugarcane industry. This sector has grown considerably, contributing expressively in the production of electricity to the distribution networks.

Faced with this situation, one of the main objectives of this study is to propose the implementation of an algorithm to detect islanding disturbances in the electrical system, characterized by situations of under- or overvoltage. The algorithm should also commonly quantize the time that the system was operating in these conditions, to check the possible consequences that will be caused in the electric power system.

In order to achieve this it used the technique of wavelet multiresolution analysis (AMR) for detecting the generated disorders. The data obtained can be processed so as to be used for a possible predictive maintenance in the protection equipment of electrical network, since they are prone to damage on prolonged operation under abnormal conditions of frequency and voltage.

**Keywords:** *Distributed Generation, Islanding, Undervoltage, Overvoltage, Disturb, Wavelet Transform.*

# SUMÁRIO

## Capítulo I

<b>Introdução</b>	<b>20</b>
1.1 – Considerações Iniciais	20
1.2 – Motivações e Justificativas	21
1.2.1 – Vantagens na Utilização da TW para Detecção de Distúrbios	23
1.3 – Objetivo Geral	27
1.4 – Objetivos Específicos	27
1.5 – Organização dos Capítulos	28

## Capítulo II

<b>Geração Distribuída e o Setor Sucroenergético</b>	<b>30</b>
2.1 – Considerações Iniciais	30
2.2 – Legislação e Regulamentação de Sistemas de GD	31
2.3 – Impactos da Geração Distribuída na Qualidade de Energia	36
2.3.1 – Tipos de Acoplamentos na Geração Distribuída	40
2.4 – Setor Sucroenergético	41
2.4.1 – Produção do Setor	43
2.4.2 – Círculo de Desenvolvimento Sustentável do Setor Sucroenergético	49
2.5 – Considerações finais	50

## Capítulo III

<b>Impactos dos Ilhamentos em Sistemas de Geração Distribuída</b>	<b>52</b>
3.1 – Considerações Iniciais	52
3.2 – Conceitos sobre Ilhamentos no Sistema Elétrico de Potência	52
3.3 – Problemas Causados por Ilhamentos no Sistema Elétrico	55
3.4 – Distúrbios Relacionados à QEE	57
3.4.1 – Transitórios	58
3.4.2 – Variações de Tensão de Curta Duração	61
3.4.3 – Variações de Tensão de Longa Duração	62
3.4.4 – Distorções da Forma de Onda	63
3.4.5 – Variações na Frequência do Sistema Elétrico	65
3.5 – Métodos de Detecção de Ilhamento	66

3.5.1 – Classificação dos Métodos de Detecção de Ilhamento	69
3.5.2 – Técnicas Remotas de Detecção de Ilhamento	69
3.5.3 – Técnicas Locais de Detecção de Ilhamento	71
3.6 – Sistemas de Proteção e Detecção de Ilhamento	76
3.6.1 – Elementos de Proteção Anti-Ilhamento	77
3.6.2 – Relé de Frequência	77
3.6.3 – Relés Digitais Microprocessados	80
3.6.4 – Disjuntores	83
3.6.5 – Chaves Fusíveis	83
3.7 – Considerações Finais	84

## Capítulo IV

<b>A Utilização da Transformada de Wavelet para Detecção de Distúrbios</b>	<b>86</b>
4.1 – Considerações Iniciais	86
4.1.1 – História da Transformada Wavelet	86
4.2 – Conceitos sobre Transformada Wavelet	87
4.3 – Transformada Wavelet Contínua (TWC)	89
4.3.1 – Escalamento da Função Wavelet	92
4.3.2 – Transladar uma Função Wavelet	93
4.4 – Transformada Wavelet Discreta (TWD)	94
4.5 – Técnica de Análise Multiresolução - AMR	96
4.6 – Famílias Wavelets	103
4.7 – Considerações finais	107

## Capítulo V

<b>Estudos de Casos e Desenvolvimento do Algoritmo</b>	<b>109</b>
5.1 – Considerações Iniciais	109
5.2 – Sistema Elétrico Proposto	109
5.2.1 – Descrição do Sistema Utilizado	117
5.2.2 – Lógica Computacional Proposta	119
5.3 – Estudos de Casos	123
5.3.1 – Ilhamento devido a Curto-Circuito	123
5.3.2 – Ilhamento devido a Rejeição de Carga	125
5.3.3 – Ilhamento Intencional	127
5.4 – Famílias Wavelets não Satisfatórias	129

5.4.1 – Tensão no Ilhamento por Curto-Circuito	130
5.4.2 – Frequência no Ilhamento por Curto-Circuito	131
5.4.3 – Tensão no Ilhamento por Rejeição de Carga	132
5.4.4 – Frequência no Ilhamento por Rejeição de Carga	133
5.4.5 – Tensão no Ilhamento Intencional	134
5.4.6 – Frequência no Ilhamento Intencional	135
5.5 – Considerações Finais	136
 <b>Capítulo VI</b>	
<b>Conclusões Finais</b>	<b>137</b>
6.1 – Conclusão	137
6.2 – Trabalhos Futuros	139
 <b>Referências Bibliográficas</b>	<b>140</b>
 <b>Anexo I</b>	
Algoritmo Proposto	146
<b>Anexo II</b>	
Dados do Software PSAT (Manual)	148
<b>Anexo III</b>	
Dados do Sistema Utilizado (Modelo IEEE)	157
<b>Anexo IV</b>	
Famílias Wavelets	161
<b>Anexo V</b>	
Relatórios de Ilhamento - ONS	163
<b>Anexo VI</b>	
Relé Digital (Manual do Fabricante)	172

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Aplicação da Transformada Wavelet em Sistemas de Energia Elétrica .....	24
Figura 2: Sistema de geração distribuída e unidades consumidoras.....	35
Figura 3: Conexões do gerador nos processos de cogeração .....	41
Figura 4: Utilização de vapor nos processos de cogeração.....	41
Figura 5: Produção de Etanol no Brasil .....	45
Figura 6: Energia contratada da biomassa em leilões do governo federal .....	46
Figura 7: Potencial de geração adicional de bioeletricidade a partir da biomassa .....	46
Figura 8: Energia elétrica excedente, gerada e comercializada pelas usinas no Brasil.....	47
Figura 9: Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa no Brasil.....	47
Figura 10: Geração de bioeletricidade sucroenergética, 2005-2014, Brasil.....	49
Figura 11: Potencial técnico de oferta de bioeletricidade para a rede elétrica .....	50
Figura 12: Círculo de desenvolvimento do setor sucroenergético no Brasil.....	50
Figura 13: Área ilhada formada pela abertura do disjuntor .....	54
Figura 14: Ilhamento formado pela abertura do disjuntor .....	54
Figura 15: Alimentador de distribuição com possibilidade de ilhamento.....	60
Figura 16: Corrente de ilhamento devido ao curto-circuito trifásico.....	60
Figura 17: Estabilidade de um sistema de duas máquinas .....	60
Figura 18: Chaveamento de um banco de capacitores. Tensão no terminal .....	60
Figura 19: Chaveamento de um banco de capacitores. Fluxo de corrente no terminal .....	60
Figura 20: Fenômeno de ferorressonância na energização de transformadores.....	60
Figura 21: Corrente impulsiva devido à descarga atmosférica .....	61
Figura 22: Afundamento de tensão causado por falha fase-terra. ....	61
Figura 23: Afundamento de tensão devido a partida de um motor.....	62

Figura 24: Elevação de tensão originado por uma falha fase-terra .....	62
Figura 25: Interrupção momentânea por curto-circuito com afundamento de tensão .....	62
Figura 26: Distorções harmônicas de 3ª a 5ª ordem .....	63
Figura 27: Distorções Inter-harmônicas .....	64
Figura 28: Sinal de tensão com ruído de alta frequência .....	64
Figura 29: Notching no sinal de tensão .....	65
Figura 30: Forma de onda ilustrativa com resumo dos distúrbios referentes à QEE.....	66
Figura 31: Circuito de teste anti-ilhamento.....	67
Figura 32: Fluxograma de classificação das Técnicas de Detecção de Ilhamento .....	69
Figura 33: Elementos de um sistema de proteção SCADA .....	70
Figura 34: Sistema PLCC para detecção de ilhamento.....	71
Figura 35: Fluxograma de detecção de ilhamento através de adição de perturbações .....	72
Figura 36: Detecção Ativa de ilhamento devido a curto-circuito.....	73
Figura 37: Modelo de Não Ilhamento e Circuito Ilhado .....	74
Figura 38: Detecção Passiva de ilhamento devido a curto-circuito.....	75
Figura 39: Condições de Confiabilidade da Proteção.....	76
Figura 40: Diagrama de blocos de um relé de frequência tipo estático .....	79
Figura 41: Arquitetura interna e externa de um relé digital .....	80
Figura 42: Bloco multifunção de um relé digital.....	81
Figura 43: Disjuntor isolado a vácuo para uso externo.....	83
Figura 44: Chave fusível, cartucho porta fusível e elos fusíveis .....	84
Figura 45: Resumo cronológico da Wavelet .....	87
Figura 46: Sinal transformado do domínio do tempo para a frequência usando TF.....	89
Figura 47: Transformada Janelada de Fourier continua - STFT .....	90
Figura 48: Análise das baixas frequências, altas frequências e tempo pela TW .....	90
Figura 49: Gráfico Translação x Escala com janelas variáveis .....	91
Figura 50: Sinal da TW em diferentes escalas e posições .....	92

Figura 51: Fator de escala aplicado em uma função seno.....	92
Figura 52: Fator de escala aplicado em uma função Wavelet.....	93
Figura 53: Aplicação da translação em uma Wavelet.....	94
Figura 54: Diagrama de blocos do primeiro estágio da TWD .....	95
Figura 55: Processo de filtragem de um sinal .....	97
Figura 56: Diminuição do número de amostras do sinal com operador downsampling.....	98
Figura 57: Filtragem de um sinal senoidal ruidoso com operador downsampling.....	98
Figura 58: Processo sucessivo de decomposição de um sinal em AMR .....	99
Figura 59: Decomposição sucessiva de um sinal .....	99
Figura 60: Processo de reconstrução de um sinal filtrado.....	102
Figura 61: Decomposição e reconstrução de um sinal Ingrid Daubechies .....	102
Figura 62: Sinal reconstruído a partir de seus coeficientes.....	103
Figura 63: Wavelet mãe Coiflet .....	104
Figura 64: Wavelet mãe Haar .....	105
Figura 65: Wavelet mãe Daubechie.....	105
Figura 66: Wavelet mãe Symlet .....	106
Figura 67: Wavelet mãe Biortogonal.....	107
Figura 68: Representação de um sistema de GD com Usinas Sucroenergéticas.....	110
Figura 69: Diagrama de um sistema de GD com usinas sucroenergéticas.....	111
Figura 70: Representação básica de uma máquina síncrona .....	114
Figura 71: Estrutura clássica de um AVR conectado ao gerador .....	116
Figura 72: Estrutura de um PSS convencional.....	117
Figura 73: Sistema Elétrico Proposto – ênfase para o barramento B7 .....	118
Figura 74: Fluxograma do Algoritmo Proposto .....	120
Figura 75: Módulo proposto para um relé de proteção digital .....	121
Figura 76: Decomposição sucessiva de um sinal .....	122
Figura 77: Curto-circuito na barra 7 e aplicação da técnica wavelet AMR .....	124



Figura 78: Frequência do curto-circuito na barra 7 e aplicação da técnica AMR .....	125
Figura 79: Rejeição de carga (barras 7-8) com aplicação da técnica AMR .....	126
Figura 80: Frequência na rejeição de carga (barras 7-8) e aplicação da técnica AMR.....	127
Figura 81: Ilhamento Intencional (barras 7 e 5) e aplicação da técnica AMR.....	128
Figura 82: Frequência de ilhamento intencional e aplicação da técnica AMR .....	129
Figura 83: Técnica AMR na tensão do ilhamento por Curto-Circuito .....	130
Figura 84: Técnica AMR na tensão do ilhamento por Curto-Circuito .....	131
Figura 85: Técnica AMR na tensão do ilhamento por Rejeição de Carga.....	132
Figura 86: Técnica AMR na frequência do ilhamento por Rejeição de Carga .....	133
Figura 87: Técnica AMR na tensão do Ilhamento Intencional.....	134
Figura 88: Técnica AMR na frequência do Ilhamento Intencional .....	135

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Mecanismos legais referentes a GD no Brasil .....	33
Tabela 2: Tipos de acoplamento de GD no sistema elétrico .....	40
Tabela 3: Níveis dos reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro.....	43
Tabela 4: Composição da matriz energética brasileira .....	44
Tabela 5: Circuito de teste anti-ilhamento .....	68
Tabela 6: Família Wavelet mãe adequada para cada distúrbio .....	136

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AMR	Análise Multiresolução
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AVR	Automatic Voltage Regulator
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CVU	Custo Variável Unitário
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
KW	Kilowatts
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica
MW	Megawatts
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIE	Produtor Independente de Energia
PLCC	Power Line Carrier Communication
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PSAT	Power System Analysis Toolbox
PSS	Power System Stabilizer
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QF	Quadrature Filter
REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infra-estrutura
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
STFT	Short-Time Fourier Transform
TF	Transformada de Fourier
TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWDI	Transformada Wavelet Discreta Inversa
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
VMF	Magnitude de Tensão e Frequência
VR	Valor de Referência
WAN	Wide Area Network

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A fim de melhorar a oferta de energia elétrica frente à crescente demanda de energia, necessária ao desenvolvimento do país, houve a necessidade da reestruturação do sistema elétrico para atender os consumidores com o menor investimento possível. Neste contexto surgiram as unidades de Geração Distribuída (GD), que possuem capacidade reduzida, mas atendem pequenas regiões ou participam no atendimento energético de grandes centros consumidores. Algumas vantagens deste novo modelo são a redução do impacto ambiental causado e dos custos associados à transmissão da energia elétrica gerada, uma vez que estas centrais já se situam próximas aos pontos de consumo.

A geração distribuída são pequenas unidades geradoras, conectadas em sistemas de distribuição ou subtransmissão e, em alguns casos, bem próximas das cargas a serem atendidas. Tratam-se de construções de menor porte e representam uma vantagem adicional na capacidade de diminuição das perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica. Estes sistemas são considerados por muitos especialistas como uma possível solução para complementar a demanda de consumo futuro, quando comparados com as grandes centrais hidrelétricas existentes [1].

Entretanto, este modelo traz alguns desafios ao planejamento e à operação do sistema elétrico, sendo um deles a detecção da geração ilhada. Assim, este trabalho apresenta uma proposta para detecção de ilhamentos de unidades de geração distribuída, utilizando os recursos técnicos de software em conjunto com recursos existentes nos sistemas atuais de proteção.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro apresenta muitos geradores de pequena potência interligados pela rede de distribuição, desta forma os desempenhos destes podem ocasionar oscilações no sistema de distribuição que, conseqüentemente, podem causar problemas ainda não enfrentados nas empresas do setor elétrico ou apresentados na literatura técnica. Diante disso, é importante analisar as mudanças e impactos na operação dos sistemas de distribuição com geração independente de energia, seja do ponto de vista de dinâmica dos

sistemas elétricos, ou mesmo, da qualidade de energia elétrica, considerando que geralmente os sistemas de distribuição não foram projetados, originalmente, para suportar o acréscimo de unidades geradoras [2].

A cogeração é o processo de geração simultânea de energia elétrica e térmica, por meio da queima de um combustível. Esta pode ser considerada uma forma de geração distribuída, pois se localiza próxima a carga. A cogeração é muito utilizada na indústria, tendo como combustível um subproduto do processo industrial [3]. Na indústria sucroenergética o principal subproduto utilizado na queima é o bagaço da cana-de-açúcar, mas a palha também já é bastante utilizada.

## 1.2- MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVAS

A complexidade de operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) vem aumentando num ritmo acelerado nas últimas décadas. Além disso, o SEP está sujeito a faltas e outros eventos que prejudicam o fornecimento de energia e que trazem consequências prejudiciais aos equipamentos interligados [4,5].

Devido às crescentes expansões das conexões nos sistemas elétricos que ocorrem com a finalidade de aumentar a sua robustez e minimizar os riscos, as redes de transmissão são exploradas no limite de suas capacidades e operadas sob um grande número de restrições de operação. Para superar algumas dessas dificuldades, é necessária a modernização dos sistemas elétricos existentes, bem como de seus sistemas de monitoramento, proteção e operação, com a finalidade de minimizar a duração, a proporção e a quantidade de eventos [6].

Um dos prováveis distúrbios que podem ocorrer é o ilhamento, onde uma determinada região fica eletricamente isolada das demais, sendo suprida apenas pelas fontes geradoras que estão dentro desta área e que podem ser insuficientes para se manter a demanda nesta nova configuração. Desta forma, pode ocorrer uma diminuição da frequência do sistema, fazendo com que aconteça a atuação das proteções que são responsáveis por rejeitar (desligar) determinadas cargas anteriormente preestabelecidas, na tentativa de manter o sistema dentro dos valores nominais de trabalho [7].

A expansão do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), não só em termos de capacidade instalada, mas também em termos da malha de transmissão, fez com que fossem alcançados territórios que antes operavam de forma isolada [7]. Essa maior interligação entre subsistemas

traz diversos benefícios para os consumidores conectados às redes mais fracas, tais como maior confiabilidade e melhor qualidade do fornecimento da energia elétrica. Entretanto, para o SEB isso representa um desafio, pois torna a sua operação mais complexa.

No Brasil os sistemas de GD utilizam tecnologia desenvolvida no país, o que pode permitir um incentivo econômico, bem como ambiental, utilizando as fontes de energia renováveis. Em diversas regiões do Brasil observa-se um aumento do número de geradores independentes e da quantidade de potência fornecida à rede elétrica. Diversas empresas, principalmente as do setor sucroenergético, indústrias de fertilizantes e do setor alimentício, iniciaram um grande interesse pelo mercado de energia e passaram a produzir sua própria energia através de turbinas a vapor e geradores, utilizando os resíduos de seus processos como combustível principal para a geração [8].

Contudo, acontece também o surgimento de questões relacionadas a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) com a ampliação dos diversos sistemas de GD. Existem considerações relevantes aos aspectos de QEE, devido ao tipo de tecnologia utilizada nos sistemas de GD. A extinção da qualidade de energia nos sistemas não deve acontecer, mas devido a falhas e operações de chaveamento na rede, pela ocorrência de transitórios ou distúrbios causados pela operação de cargas, esta falta de qualidade pode se apresentar.

Devido à configuração do sistema de geração e transmissão, impedâncias de seus componentes, potências dos geradores, atuação dos reguladores de velocidade e estabilizadores de tensão e a capacidade de curto-circuito, pode ocorrer a presença de um distúrbio. Alguns desses distúrbios podem ser as oscilações de frequência, os afundamentos de tensão, os harmônicos e os desequilíbrios entre fases [2].

Em específico no contexto deste trabalho, observa-se a importância da manutenção da estabilidade transitória do Sistema Elétrico de Potência (SEP), especialmente das variações de tensão e frequência, respeitando os limites do sistema para a sua operação dentro dos valores nominais de trabalho. Isto pode proporcionar sérios problemas no funcionamento dos equipamentos conectados à rede elétrica.

Na referência [9] é mais uma vez mencionada a importância da supervisão da tensão e frequência do sistema sob determinadas condições de operação. Para tanto, com a utilização de relés de frequência, que acionam os dispositivos de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede fora dos patamares aceitáveis para a operação normal do SEP. A monitoração do SEP se torna imprescindível para que se possa ter QEE. Buscando evitar a ocorrência de

ilhamentos de parte do sistema elétrico da unidade, pode-se contar com diversos equipamentos com grande confiabilidade e rápida resposta às ações propostas, uma vez que estes são interligados aos sistemas de proteção local.

Com a elevada quantidade de dados, são necessárias técnicas e ferramentas matemáticas que auxiliem no entendimento do comportamento do sistema, aumentando a eficiência e reduzindo o tempo gasto na análise desses dados. Uma ferramenta promissora é a Transformada *Wavelet* (TW), que possui como característica de destaque sua capacidade de decompor os sinais analisados no domínio do tempo e frequência, sendo capaz de realizar detecção exata e apontamentos temporais de eventos, facilitando e melhorando a análise de ocorrências.

### **1.2.1- VANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS**

Um resumo sobre as técnicas que são utilizadas na detecção de distúrbios de perturbação na QEE é apresentado nesta seção. As Wavelets são dispositivos rápidos e eficientes para análise de tensão transitória e sinais de corrente. Um aspecto importante dos sinais sob ilhamento para a condição da QEE é que a informação é muitas vezes uma combinação de características que são localizadas no tempo e na frequência, de sinais não-estacionários. As Wavelets são adequadas para a análise de sinais não estacionários, analisando a informação no plano da frequência e do tempo.

Para destacar as vantagens de utilização da TW na detecção de distúrbios, são apresentadas diversas publicações sobre a aplicação da TW em sistemas elétricos de potência que tem expandido nos últimos anos. Diferentes aplicações são propostas, principalmente na área de qualidade da energia, destacando neste contexto diversos trabalhos.

Existe uma grande quantidade de publicações encontradas em revistas especializadas, conferências, dissertações e teses de doutorado na área da proteção de sistemas de potência. Esses trabalhos propõem diferentes metodologias para a resolução de problemas encontrados nos esquemas de proteção tradicionais, sempre enfatizando a importância da TW para estas análises.

Os primeiros trabalhos com o uso da transformada wavelet em sistemas de potência foi feito no ano de 1994. A partir de então, o número de publicações em que se utiliza transformada wavelet na solução de problemas em SEPs vem aumentando.

Um estudo é apresentado por [10] mostrando como a transformada wavelet estava sendo usada até então no Sistema de Energia Elétrica. A figura 1, adaptada de [10], mostra que até aquele ano os maiores esforços eram concentrados em aplicações na qualidade de energia e que também havia um grande percentual de proposta de utilização da transformada wavelet na proteção de SEPs.

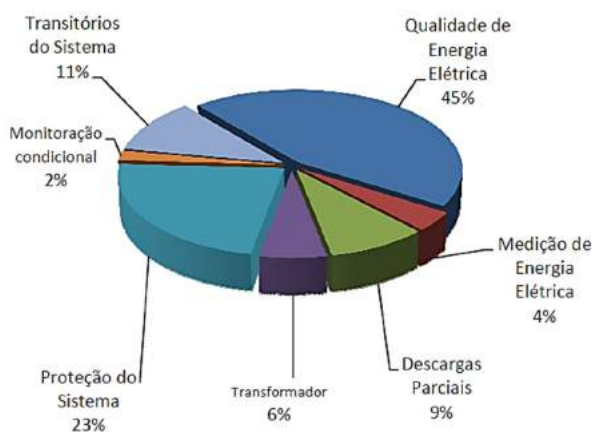


Figura 1: Aplicação da Transformada *Wavelet* em Sistemas de Energia Elétrica [10].

Os estudos relacionados à QEE possuem cada vez mais importância tanto para o fornecimento quanto para o consumo. Foi desenvolvido por [11] um programa baseado na TWD para classificação de problemas da qualidade de energia elétrica, tais como, afundamentos, elevações de tensão e chaveamento de capacitores.

Um algoritmo de proteção diferencial de transformadores de potência baseado na análise wavelet é apresentado por [12]. O projeto consiste em dois blocos principais, onde um deles faz a detecção do distúrbio e o outro faz a discriminação do tipo de distúrbio, apresentando numa interface gráfica os resultados obtidos no algoritmo desenvolvido.

Já o trabalho desenvolvido por [13], faz a comparação do desempenho de um algoritmo de localização de faltas utilizando diversas famílias wavelets e diferentes ordens das famílias analisadas. A metodologia utilizada no trabalho serviu para o estudo de fenômenos transitórios



no SEP e a ferramenta desenvolvida foi baseada no ambiente MATLAB para auxiliar no estudo de proteção de sistemas de potência.

Robertson *et al.* [14] utilizaram a TW como um método para analisar transitórios eletromagnéticos associados com situações de falta e chaveamento de capacitores. A proposta deste método é a de capturar e analisar os dados. O sinal analisado, ou sinal de entrada, é característico de uma fase de tensão de uma linha de transmissão trifásica com situações de falta e chaveamento, com uma taxa amostral de 10KHz.

Huang *et al.* [15] propuseram uma técnica que utiliza a TW para a classificação de distúrbios relacionados com a QEE. Esta técnica utiliza a *Wavelet* mãe de Morlet para a decomposição AMR (Análise Multiresolução) de um sinal, extraindo deste as componentes de frequência de 60 e 600 Hz. A componente de 60 Hz indica variações de amplitude do sinal, classificando distúrbios entre afundamentos de tensão, elevação de tensão e interrupção momentânea. Já a componente de 600 Hz indica presença de pequenas variações transitórias, classificando distúrbios como oscilações transitórias. Desta forma, a técnica descrita pelos autores, além de detectar a presença de distúrbios, também é capaz de classificar os mesmo de diferentes formas.

Santoso *et al.* [16] procuraram uma nova abordagem para detectar e localizar vários distúrbios relacionados a QEE. Eles diferenciaram os distúrbios em duas categorias: transitórios rápidos e lentos. Para transitórios, as formas de onda são caracterizadas por pulsos, variações rápidas e abruptas em um tempo de curta duração. Neste caso, db4 e db6, devido a seus suportes compactos são melhores na detecção e localização de distúrbios. Para transitórios lentos, as formas de onda são caracterizadas por mudanças suaves. Segundo os autores as db4 e db6 não são adequadas para captar tais distúrbios. Com isso as db8 e db10 são usadas, pois o intervalo de integração é longo e suficiente para a Wavelet captar essas mudanças lentas. Os sinais foram gerados usando códigos computacionais e uma taxa amostral de 2,56KHz. Os distúrbios analisados foram transitórios, afundamentos de tensão e distorções harmônicas. No primeiro distúrbio analisado a wavelet mãe que melhor se adequou foi a db4. No caso de afundamento de tensão, a melhor resposta foi a db10, pelo fato do suporte compacto em relação a db4. Já nas distorções harmônicas, foram adicionadas harmônicas de ordem inferior a 25 e somente de

ordem ímpar. Uma onda senoidal, apenas com frequência fundamental de 60 Hz, tem um THD (Distorção Harmônica Total) de 0%, o que seria ideal, encontrando-se nestes testes uma taxa de 11,49%. Com as respostas foi possível perceber que a wavelet detectou o início e término do evento, porém, não identificou os conteúdos harmônicos inclusos no sinal. Na comparação dos resultados a db10 superou a db4 também no caso dos harmônicos.

Abdel-Galil *et al.* [17] propuseram um método automático constituído de dois estágios de reconhecimento de sistemas que é baseado em Monitorar Nós de Distribuição para QE. No primeiro estágio, o evento de QEE são rastreados, detectados e então classificados. A função do segundo estágio é identificar a causa do distúrbio e sua localização. Sendo capaz de detectar um grande número de distúrbios de QEE. As formas de ondas de tensão foram obtidas através de vários pontos especiais de um sistema de distribuição industrial. Para extrair características importantes foi utilizada a wavelet mãe db4 e uma taxa amostral de 15,36KHz.

Em um artigo, Magnago e Abur [18] utilizam a transformada *wavelet* com a finalidade de detectar o ponto de falha do sistema analisando os transientes de alimentação (tensão e corrente). São utilizados os dados de monitoração do relé conectado na linha e, através da teoria das ondas viajantes e utilizando as componentes de alta frequência obtidas com a transformada *wavelet*, é feita uma associação com o tempo de viagem dos transientes ao longo da linha monitorada, ou seja, a distância entre o ponto de falha e do relé.

No ano de 2008, Megahed *et al.* [19] descreveram uma estratégia para escolher uma *wavelet* que fosse adequada para análise de transientes do sistema de potência. Muitas *wavelets* têm sido utilizadas para esta análise, como Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, etc e escolher ou até mesmo desenvolver uma *wavelet* é um fator importante para a aplicação empregada.

Recentemente, Ren e Kezunic [20] propuseram um algoritmo capaz de estimar os parâmetros fasoriais em um quarto de ciclo do sinal monitorado, ou seja, possuindo rápida resposta e também com alta precisão, mesmo com uma vasta gama de desvios de frequência.

Sousa Neto [21] apresenta um estudo com a análise de decomposição da tensão terminal de um gerador síncrono de polos salientes nos coeficientes de aproximação e wavelet da primeira escala da TWD, utilizando a wavelet mãe db4.

A ferramenta TW demonstra ser adequada para a caracterização, monitoração e ou proteção de sistemas elétricos devido a sua capacidade de discriminar e identificar com precisão os instantes de descontinuidade sobre as formas de onda. Para a técnica com dados provenientes do sistema elétrico, na maioria dos trabalhos já realizados com a TW, os sinais são decompostos em um nível por meio da análise multiresolução Wavelet, escolhendo uma wavelet-mãe adequada.

### 1.3- OBJETIVO GERAL

Como objetivo principal deste trabalho, propõe-se implementar um algoritmo capaz de detectar ilhamentos do SEP, causados por distúrbios de sobretensão/sobrefrequência ou subtensão/subfrequência. Ao analisar os valores de subfrequência e sobrefrequência é possível detectar o instante exato do distúrbio e verificar a dinâmica do sistema elétrico quando operando nestas condições. Com a formulação destes dados, disponibilizá-los como proposta para uma eventual manutenção preditiva em geradores síncronos de unidades de GD, visto que estes elementos estão sujeitos a danos quando em prolongada operação sob condições anormais de tensão e frequência.

### 1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho objetiva desenvolver, utilizando um sistema computacional, uma metodologia para detecção, análise e geração de relatórios de eventos relacionados a ilhamentos. Nas análises são empregados dados provenientes de sistemas de medição fasorial sincronizada. Como ferramenta matemática para análise dos dados fasoriais é utilizada a Transformada *Wavelet* Discreta para apontar pontualmente os instantes de tempo dos eventos analisados. A implementação da metodologia proposta utiliza a plataforma Matlab como base,

que possui facilidades para desenvolvimento de protótipos, de interface gráfica e geração de relatórios.

Buscando alcançar o objetivo principal proposto, deverão ser trabalhados nesta dissertação os itens seguintes:

- Pesquisa para o referencial teórico da dissertação, com conteúdo focado em: Geração Distribuída; Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas de Potência do setor Sucroenergético; Detecção de ilhamentos nos sistemas de GD; Utilização da técnica de Wavelet em Sistemas Elétricos de Potência.
- Analisar as variações de tensão causados pelos ilhamentos de geradores síncronos distribuídos.
- Realizar as simulações dos estudos de casos propostos, com a utilização do software PSAT (Power System Analysis Toolbox) para implementação.
- Detecção dos distúrbios gerados nos estudos de casos, com a utilização da técnica wavelet de decomposição AMR (Análise Multiresolução).
- Desenvolvimento de um algoritmo para análise de sub/sobretensão e sub/sobrefrequência, utilizando o software MATLAB.

## 1.5- ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação foi estruturada em seis capítulos que buscam, individualmente, a obtenção de objetivos específicos, mas, no conjunto, permitem atingir o objetivo apresentado anteriormente.

Este capítulo faz a introdução do trabalho, apresentando a motivação que o originou o objetivo geral que norteou o desenvolvimento do mesmo e sua estruturação final.

No capítulo II é efetuada uma breve definição sobre os sistemas de geração distribuída, a legislação que regulamenta o setor sucroenergético e os possíveis impactos causados na qualidade de energia pela implantação de sistemas de GD na rede elétrica.

O capítulo III trata do conceito de ilhamento em SEP, dos impactos dos ilhamentos em sistemas de GD, descreve os problemas causados no SEP, identifica os tipos de distúrbios que ocasionam os ilhamentos, identifica os métodos de detecção dos mesmos e trata dos sistemas anti-ilhamentos existentes e sua eficiência nos sistemas elétricos.

O capítulo IV descreve os conceitos e fundamentos básicos da técnica da transformada wavelet, tanto contínua como discreta, a técnica de Análise Multiresolução (AMR) de uma forma bastante prática, mostra exemplos das famílias Wavelets existentes, finalizado com um tópico sobre as aplicações da Transformada Wavelet em SEP.

No capítulo V são apresentados os estudos de casos implementados no software PSAT e analisados no software MATLAB. Neste capítulo também é apresentado o algoritmo proposto para obtenção dos resultados, com a finalidade de atingir o objetivo geral deste trabalho.

O capítulo VI é destinado para a apresentação das principais conclusões e contribuições desta dissertação, sendo também sugeridos alguns pontos que podem ser seguidos nesta área de pesquisa.

Em seguida apresenta-se as referências bibliográficas utilizadas e os anexos.

## CAPÍTULO II

### GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E O SETOR SUCROENERGÉTICO

#### 2.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A geração distribuída (GD) é um tipo de geração que se faz diferente da realizada pela geração centralizada, por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo, desse modo, para aumentar a distribuição geográfica da geração. A GD pode ser feita em regime de cogeração, que é a geração simultânea e em sequência de duas ou mais modalidades de energia.

Todo sistema de cogeração é geração distribuída, mas nem toda GD é um sistema de cogeração. Em micro redes a utilização da geração distribuída são, idealmente falando, fontes alternativas ou renováveis de energia. Além dos benefícios ambientais, vários benefícios técnicos e econômicos poderiam ser adquiridos com a utilização de geração distribuída, atendendo com qualidade de energia e confiabilidade os consumidores [22].

A expressão GD surgiu da língua inglesa. Nas nossas literaturas existem vários termos relacionado à GD os quais possuem diferentes conotações específicas para cada vertente do assunto, exemplificando podemos mencionar: *on-site generation*, *dispersed generation*, *decentralized generation*, *micropower*. As palavras “geração distribuída” da língua inglesa “*distributed generation*”, traduzida literalmente para língua portuguesa é adequada à representação da mensagem linguística por ela trazida [23].

Neste capítulo, faz-se uma abordagem sobre GD, em termos de definição, legislação, regulamentação seguindo com a apresentação das vantagens para o sistema elétrico. Na sequência é feita uma descrição dos fatores relevantes sobre os possíveis impactos causados pela implantação de sistemas de GD, analisando as questões técnicas, como estabilidade, ajuste de proteção e a qualidade de energia. Ressalta-se também importantes características do setor sucroenergético. Para finalizar, apresenta-se considerações sobre o extenso e diversificado assunto, debatidos neste capítulo.

## 2.2- LEGISLAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE GD

A GD contribui com o sistema elétrico nacional quanto à confiabilidade e estabilidade, pois pode diminuir a dependência do parque gerador com despacho centralizado, mantendo reservas próximas aos centros de carga. Com a descentralização da geração de energia elétrica, haverá redução da necessidade de investimentos em redes de transmissão, de interligação regional e de distribuição para o tráfego da energia produzida. De acordo com [24], a redução das LTs (Linhas de Transmissão), possibilita ganhos financeiros que são distribuídos entre consumidores e geradores. Diante do crescimento da demanda, a geração distribuída terá maior agilidade, devido aos menores prazos e menor complexidade para a obtenção de licenciamento e liberação na implantação dos projetos.

O potencial da geração distribuída, segundo os conceitos estabelecidos pela legislação nacional, ainda é pouco explorado, o que pode contribuir para a diversificação da matriz energética e do setor elétrico brasileiro. Outros benefícios a serem relacionados à GD são: dispersão dos impactos ambientais e redução daqueles provenientes do estabelecimento de reservatórios e da construção de extensas linhas de transmissão; geração de empregos e desenvolvimento econômico; diversificação de investimentos privados pela ampliação do número de agentes geradores distribuídos regionalmente; e eficiência no uso das fontes energéticas pela valorização daquelas de custo variável unitário (CVU) nulo e de baixo impacto ambiental [24].

O Decreto n.º 5.163/04, regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, em seu artigo 14º, da seguinte maneira:

2004. Decreto n.º 5.163/04.

Art. 14º: Para os fins considera-se GD a produção de energia proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo os potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1.000 kW e termelétricas de potência igual ou inferior a 5.000 kW tratados pela lei n.º 9.074/18, de 1995, conectados diretamente no sistema de distribuição do comprador. Não são considerados GD empreendimentos hidrelétricos com capacidade instalada superior a 30 MW [25].

A partir desta definição pode-se observar diversos elementos como: conscientização sobre as fontes de energias existente, a abertura do mercado de energia, o grande potencial para novas tecnologias de suprimento de energia, incentivo dos governos para a utilização de fontes

alternativas. Todos estes são elementos que atualmente impulsionam a implantação de sistemas ditos como GD.

Atualmente, a regulamentação legal existente afirma que, no atendimento à contratação da totalidade do mercado das distribuidoras, deverá ser considerada, dentre outras, a energia elétrica proveniente de geração distribuída, observados os limites de contratação e de repasse às tarifas, baseados no valor de referência (VR) do mercado regulado e nas respectivas condições técnicas, conforme Lei n.º 10.848/04.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) do governo federal procura buscar a utilização e diversificação da matriz energética de forma renovável. Sendo assim, a implantação de unidades de GD cresceu bastante nos últimos anos. Sistemas energéticos como, energia eólica, solar, biomassa e pequenos aproveitamentos hidrelétricos são considerados substanciais para o crescimento do sistema de energia brasileiro. Com isso cria-se a necessidade de leis, padrões, regulamentação, ou seja, uma legislação específica sobre sistema de GD é importante por parte do governo [9].

Observa-se uma evolução progressiva da legislação e da regulamentação, o que demonstra a propensão das autoridades setoriais para o estímulo do setor. O ano de 2003 foi o ponto forte, que através da lei 10.762 determinou-se o desconto da tarifa de distribuição, concedido com a lei 9.427, devendo incidir sobre a produção e o consumo. Mais um avanço na legislação aconteceu em 2007 com a lei 11.488 que modificou o critério de 30 MW de potência instalada para potência injetada no sistema, com isso houve grande investimento por parte dos produtores [26].

O emprego de geradores diretamente conectados em sistemas de distribuição ou subtransmissão de energia elétrica exige que sejam desenvolvidos e implantados esquemas especiais de proteção (detecção deilhamento de geradores, por exemplo), controle dos níveis de tensão na rede de distribuição, normas de regulamentação e despacho de geração, entre outros. Tradicionalmente, estudos em redes de distribuição e subtransmissão não consideram aspectos relacionados à estabilidade, uma vez que essas redes são passivas e, em geral, operam de maneira estável sempre que os sistemas de geração e transmissão (conectados a essas redes) estiverem em condições estáveis [27].

A tabela 1 apresenta um resumo sobre alguns dos principais mecanismos legais referentes a GD no Brasil [28].



Tabela 1. Mecanismos legais referentes a GD no Brasil.

Mecanismos	Descrição
<b>Lei n.º 9.074/1995</b>	Instituiu a figura do PIE (Produtor Independente de Energia) e garantiu o livre acesso aos sistemas de transmissão e de distribuição mediante o ressarcimento do custo do transporte envolvido. Consumidor atendido em alta tensão, com carga mínima de 3000 KW pode escolher livremente seu fornecedor de energia.
<b>Decreto n.º 2.003/1996</b>	Regulamentou a produção de energia elétrica por autoprodutor e PIE.
<b>Lei n.º 9.427/1996</b>	Instituiu a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Estabelece percentual de redução maiores ou igual a 50% para as tarifas de uso das redes para os geradores qualificados – incentivo ao gerador.
<b>Decreto n.º 2.655/1998</b>	Regulamentou o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE) e definiu regras para a organização do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).
<b>Resolução ANEEL n.º 112/1999 (vigente)</b>	Estabeleceu os requisitos necessários à obtenção de registro ou autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, cólicas e de outras fontes alternativas de energia, tal como o bagaço de cana.
<b>Resoluções ANEEL n.º 281/1999 (vigente) n.º 282/1999 (revogada) e n.º 286/1999 (revogada)</b>	Estabeleceram as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão dos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica e as tarifas de uso dos sistemas de distribuição.
<b>Resolução ANEEL n.º 371/1999 (vigente)</b>	Regulamentou a contratação e a comercialização de reserva de capacidade por autoprodutor ou PIE para atendimento a unidade consumidora diretamente conectada às suas instalações de geração.
<b>Resolução ANEEL n.º 233/1999 (revogada)</b>	Estabeleceu os valores normativos que limitam o repasse, para as tarifas de fornecimento, dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica por parte dos concessionários e permissionários.
<b>Resolução ANEEL n.º 021/2000 (revogada)</b>	Estabeleceu os requisitos necessários à qualificação das centrais cogeneradoras de energia.
<b>Lei n.º 10.438/2002</b>	Criou o PROINFA e a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) e dispôs sobre a universalização do serviço público de energia elétrica. Estende desconto na tarifa de uso das redes para a ponta do consumo.
<b>Decreto n.º 4.873/2003</b>	Instituiu o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica “ <i>LUZ PARA TODOS</i> ”.
<b>Lei n.º 10.847/2004</b>	Autorizou a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
<b>Lei n.º 10.848/2004</b>	Dispôs sobre a comercialização de energia elétrica e criou a figura do gerador distribuído.
<b>Decreto n.º 5.163/2004</b>	Regulamentou a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e definiu GD, no seu próprio âmbito.
<b>Decreto n.º 5.175/2004</b>	Constituiu o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE).
<b>Decreto n.º 5.177/2004</b>	Dispôs sobre a organização, as atribuições e o funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).
<b>Resolução Autorizativa ANEEL n.º 328/2004 (vigente)</b>	Aprovou o Estatuto do ONS.
<b>Decreto n.º 5.184/2004</b>	Criou a EPE.

<b>Decreto n.º 5.429/2004</b>	Deu nova redação ao inciso XI do § 2.º do art. 1.º do Decreto n.º 5.163/2004.
<b>Decreto n.º 5.879/2006</b>	Dispôs sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.
<b>Resolução Normativa ANEEL n.º 247/2006 (vigente)</b>	Estabeleceu as condições para a comercialização de energia elétrica oriunda de empreendimentos de geração que utilizam fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW.
<b>Lei n.º 11.488/2007</b>	Criou o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infra-estrutura (REIDI) e alterou a Lei n.º 9.427/2006 e a Lei n.º 10.438/2002.

Fonte: ANEEL.

Com a GD, torna-se possível obter maior eficiência energética. Por isso, o INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética) tem trabalhado para derrubar eventuais imperfeições do mercado que dificultam o desenvolvimento desta forma de geração de energia.

Segundo informações do COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia), a GD pode trazer diversos benefícios para o sistema elétrico, em função da sua característica de contratação. Não se trata da única solução para o Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, no entanto não deve ser deixado de lado. As características mais interessantes desta modalidade podem se resumir em:

- 1- Construção e comissionamento mais rápido;
- 2- Baixo impacto ambiental;
- 3- Eliminação de projetos, o que evita a concentração e os riscos envolvidos com atrasos e as grandes transferências de energia pela rede;
- 4- Maior segurança para o sistema de abastecimento de determinadas fontes de GD;
- 5- Melhorias no padrão de utilização das redes elétricas;
- 6- Desenvolvimento regional segmentado em cada região do país.

Todo sistema de GD propicia um aproveitamento de fontes locais de energia disponíveis, não sendo necessárias obras grandiosas de conexão e transmissão com as usinas hidrelétricas, que são a matriz energética brasileira. Tais fontes possuem pequeno porte e são conectadas à rede de distribuição, suprimindo possíveis necessidades energéticas do sistema elétrico interligado num determinado local [26]. A figura 2 mostra as diversas fontes de energia com GD e as unidades consumidoras.

No entanto, considerando a demanda crescente por energia elétrica e a importância estratégica que a bioeletricidade representa, tanto para o setor elétrico como para o sucroenergético, é necessário dobrar sua capacidade de produção para atender a demanda crescente por etanol segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE - 2012). Este estudo propõe a elaboração de leilões regulados específicos para o setor, buscando contemplar as características próprias desta fonte para viabilizar a modernização das usinas existentes.

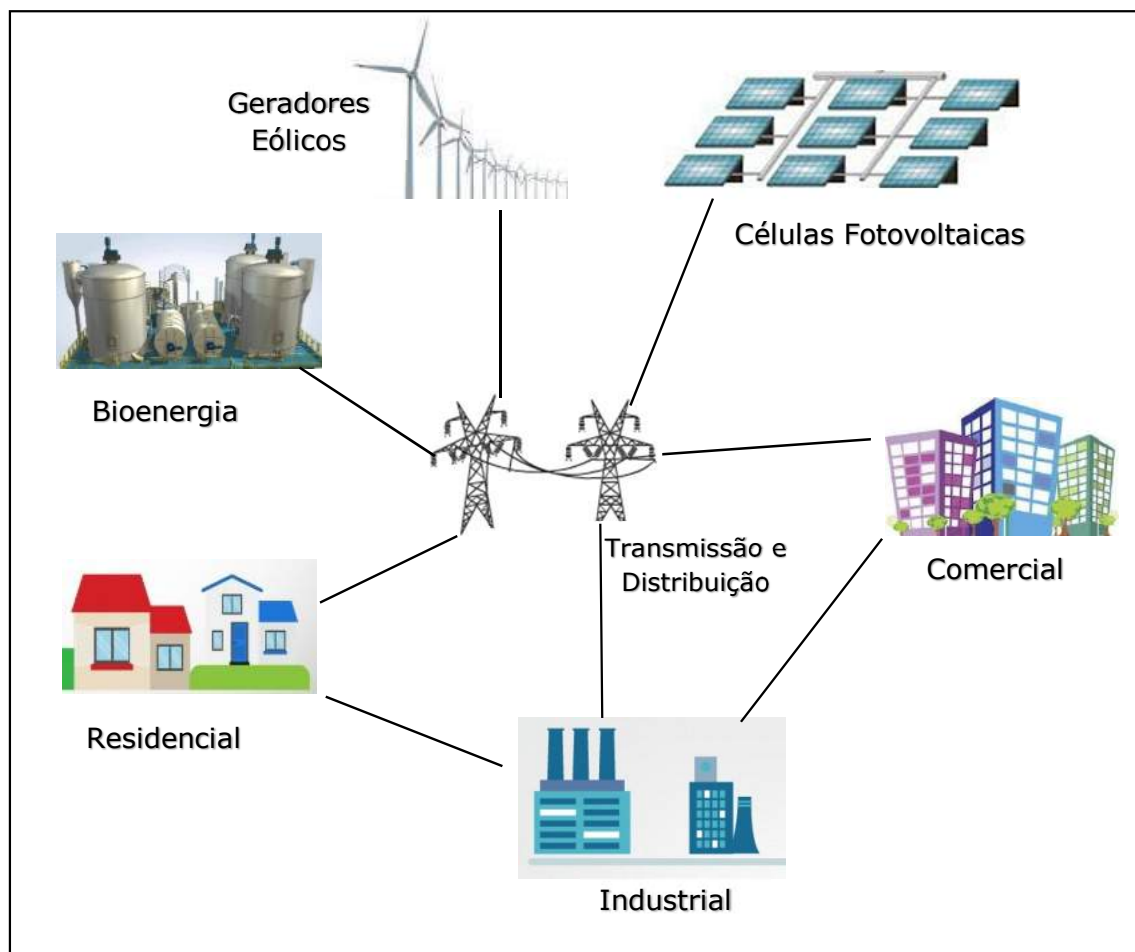


Figura 2: Sistema de geração distribuída e unidades consumidoras.  
Fonte: [9]

### 2.3- IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA QUALIDADE DE ENERGIA

O problema da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) entregue pelas concessionárias hoje em dia é mais seriamente estudado, não só pelo fato de existirem diversas empresas fornecendo o serviço, mas também pela sensibilidade de alguns equipamentos industriais. Fontes alternativas de energia como células fotovoltaicas, turbinas eólicas e biomassa podem trazer grandes benefícios ao sistema de potência, como por exemplo a utilização de fontes não poluentes e renováveis. Porém alguns cuidados devem ser tomados com este tipo de fontes de geração [29].

A referência [1] enfatiza que a geração distribuída pode contribuir para a melhoria na qualidade da energia em áreas congestionadas, no final de linha de trechos longos, e em locais onde uma alta qualidade de energia é exigida, e pode também prover capacidade de geração local sob o controle de clientes que demandam serviço ininterrupto. No entanto, ainda se analisa os possíveis impactos realizados por estas fontes de energia, tais como a regulação de tensão e frequência, níveis de curto circuito, ilhamento, qualidade de energia, despacho de geração, entre outros problemas econômicos que surgem em função do aumento do índice de penetração da GD. Deve-se ainda avaliar até que ponto as características do sistema de distribuição serão afetadas e, principalmente, como será afetada a estabilidade.

Algumas das alterações que podem acontecer no sistema elétrico, seja ela manifestada na tensão, corrente ou frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores, são classificados como problemas na qualidade de energia elétrica. Na verdade, são distúrbios ocorridos no sistema elétrico os quais podem acontecer em várias partes do sistema de energia, seja nos consumidores, transmissão, distribuição e ou concessionária.

Segundo [30] tais distúrbios, geralmente podem alterar a tensão e a frequência do sistema, e para analisar estas duas grandezas usualmente empregadas para retratar a QEE devem ser analisados três aspectos:

- As magnitudes das tensões e frequências devem estar dentro de limites aceitáveis;
- A simetria do sistema elétrico entre as fases;
- A forma de onda deve ser o mais próximo de uma senóide.

Pode acontecer um caso de instabilidade do sistema ou perda de estabilidade quando a tensão e ou frequência do sistema elétrico é afetado. Sabe-se que a estabilidade de um sistema de potência está ligada ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas (geralmente das PCH) após a ocorrência de uma perturbação. As máquinas deverão voltar ao seu estado de funcionamento normal, após a eliminação do distúrbio. Caso não seja eliminado, acontecendo qualquer alteração na configuração do sistema, como perda de carga ou das linhas de transmissão, altos fluxos de reativos, etc., ocorrerá um desequilíbrio entre a geração e o consumo pelas cargas, levando as máquinas geradoras a trabalhar em outro ponto de operação. É de primordial importância que as máquinas geradoras do sistema permaneçam em sincronismo, em qualquer uma destas situações.

Devido à alguns fatores de ordem técnica como: saturação existente nos sistemas de transmissão, redução das margens de segurança, restrições geográficas, privatização do setor elétrico, desregulamentação, mercado competitivo, aumento contínuo da carga e problemas de estabilidade de tensão, há necessidade de incentivos a pesquisas e investimentos no setor de GD em função do crescimento do setor, conforme descrito em [21]. Esses fatores têm sido a motivação incentivadora para as pesquisas nas universidades com a finalidade de analisar as **vantagens** e os possíveis **impactos** causados pelo sistema de GD.

A geração distribuída oferece uma série de benefícios para os participantes do sistema de energia, segundo [31], esses benefícios podem ser os seguintes:

- Redução dos investimentos;
- Redução dos riscos de planejamento do sistema;
- Redução das perdas na transmissão e dos respectivos custos, e adiamento no investimento para reforçar o sistema de transmissão;
- Redução de impactos ambientais da geração, pelo uso de energia eólica ou solar e benefícios na geração térmica quando forem usados combustíveis menos poluentes (como o gás natural), ou quando houver melhor utilização dos combustíveis tradicionais e, em certos tipos de cogeração, com a eliminação de resíduos industriais poluidores;
- Atendimento mais rápido ao crescimento da demanda (ou à demanda reprimida) por ter um tempo de implantação inferior ao de acréscimos à geração centralizada e reforços das respectivas redes de transmissão e distribuição;

- Aumento da confiabilidade do suprimento aos consumidores próximos à geração local, por adicionar fonte não sujeita a falhas na transmissão e distribuição;
- Maior estabilidade do sistema elétrico, nos casos em que haja reservas de geração distribuída constituídas por máquinas síncronas de certo porte;
- Aumento da eficiência energética, redução simultânea dos custos das energias elétrica e térmica, e possibilidade de colocação dos excedentes da primeira no mercado;
- Maiores oportunidades de comercialização e de ação da concorrência no mercado de energia elétrica, na diretriz das Leis que reestruturaram o setor elétrico;
- Benefícios gerais decorrentes da maior eficiência energética obtida pela conjugação bem coordenada da geração distribuída com a geração centralizada, e das economias resultantes.

Na referência citada [31] são apresentadas algumas desvantagens do sistema de geração distribuída:

- Para o produtor independente, a interligação à rede acarreta obviamente certa diminuição de autonomia, por não poder mais agir visando apenas a maximização do próprio benefício, nos casos em que possa ser prejudicado o benefício global de todos os usuários;
- Maior complexidade administrativa, contratual e comercial;
- Maiores dificuldades de coordenação das atividades;
- Em alguns casos, diminuição do fator de utilização das instalações das concessionárias de distribuição, o que leva a aumentar o preço médio de fornecimento das mesmas;
- Maior complexidade no planejamento e na operação do sistema elétrico, inclusive na garantia do "back-up";
- Maior complexidade nos procedimentos e na realização de manutenções, inclusive nas medidas de segurança a serem tomadas.

A partir deste novo quadro, torna-se necessário uma nova avaliação dos impactos técnicos que podem ocorrer na operação de sistemas de distribuição incluindo GD, sendo que

essas redes não foram inicialmente projetadas para suportar uma significativa inserção de unidades geradoras.

No trabalho desenvolvido por [8] os principais aspectos técnicos de impacto analisados foram: **perfil de tensão de regime permanente, perdas elétricas e estabilidade de tensão**, tendo como conclusão o resultado das análises realizadas a partir da estabilidade em regime permanente, identificando as barras onde a instalação de GD poderá melhorar o perfil de tensão do sistema, a minimização das perdas elétricas de potência ou o aumento da margem de estabilidade de tensão e também, caso possível, uma combinação dos casos citados anteriormente.

Agora, analisando outros aspectos técnicos como: **Fluxo de potência, Perdas Elétricas e Correntes de Curto-circuito**, com a adição de geradores síncronos na operação de redes de distribuição. Inicialmente as redes de distribuição são projetadas para entregar a potência da subestação para os consumidores finais. Segundo [5], os fluxos de potência ativa são geralmente unidirecionais. Havendo uma integração de geradores distribuídos para operar em conjunto com os sistemas já existentes, resulta em um sistema com a possibilidade de fluxos de potência bidirecionais (dependendo das condições de carregamento), mudança nas perdas e variações nas tensões.

A GD pode alterar a estabilidade de tensão de duas formas:

- 1- A GD trabalha em concordância com as exigências de carga locais: Sempre que a carga local na rede de distribuição estiver aumentando, a produção local sofrerá aumento e vice-versa. Neste caso, a GD reduz as variações entre nível máximo e o mínimo de tensão, comparados a uma situação onde não há GD. Um benefício para o sistema, pois as variações de tensão em certas regiões são críticas.
- 2- A GD não trabalha em concordância com a carga local: Neste caso, a potência da GD aumenta as variações entre o máximo e o mínimo nível de tensão, comparados a uma situação sem GD. O nível de tensão mínimo se manteria (situação de carga máxima, sem GD), mas o nível máximo da tensão aumentaria (carga leve, com GD operando com máxima geração). Neste caso o principal objetivo seria a venda de energia elétrica.

De acordo com [1], o caso de ilhamento acontece quando uma unidade de GD na rede de distribuição está operando e alimentando alguma carga, estando a GD isolada da rede central,

tendo o sistema sido desligado (intencionalmente ou não) por algum motivo. O ilhamento pode ser favorável, pois pode-se manter cargas prioritárias alimentadas, mesmo que o restante do sistema esteja desligado. Contudo, em algumas situações, esse modo de operação não é aconselhável. Caso a unidade geradora esteja fora de fase com o resto do sistema durante este curto espaço de tempo, problemas podem começar a surgir, que podem ser desde o simples desligamento da máquina ou até um colapso total do sistema.

### 2.3.1- Tipos de Acoplamentos na Geração Distribuída

Com a finalidade de tentar padronizar a conexão da GD na rede de distribuição, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* publicou em 2003 o *Standard 1547 – IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. Este padrão compreende os requisitos e critérios relevantes ao desempenho, operação, testes, condições de segurança e manutenção da interconexão da GD com o sistema elétrico [26].

Para realizar a conexão do gerador distribuído ao SEP se faz necessária a adequação da tensão no gerador ao sistema. Dependendo das características do sistema elétrico, é possível utilizar determinados tipos de acoplamentos, como mostrado na tabela 2 [28].

A tabela 2 apresenta os tipos de conexão do gerador com o sistema elétrico dependendo das características da GD. Esta conexão pode ser realizada de três formas, como mostrado na figura 3.

Tabela 2: Tipos de acoplamento de GD no sistema elétrico.

Tipos	Acoplamento	Característica	Uso
1	Gerador diretamente acoplado no Sistema da Concessionária.	Tensão gerada é igual à do sistema.	Sistemas elétricos de pequeno porte.
2	Gerador e transformador acoplados ao Sistema da Concessionária.	Ajuste de tensão entre o gerador e o sistema é realizado pelo transformador.	Sistemas de Geração de grande porte.
3	Gerador acoplado ao Sistema da Concessionária através de um transformador.	Gerador pode ser desconectado do transformador.	Geradores de médio e pequeno porte.

Fonte: ANEEL.



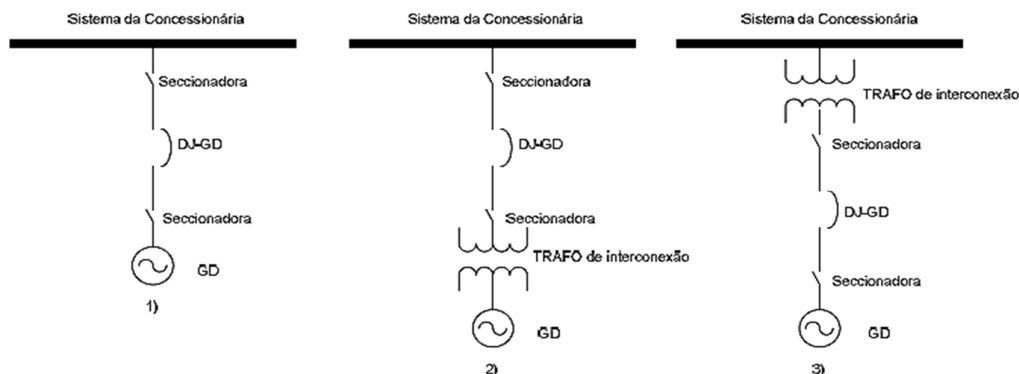


Figura 3: Conexões do gerador nos processos de cogeração [32].

## 2.4- SETOR SUCROENERGÉTICO

Segundo [33] o setor sucroenergético no Brasil compreende todas as atividades agrícolas e industriais relacionadas à produção de açúcar, bioetanol e bioeletricidade. No Brasil, estes produtos decorrem de forma quase exclusiva do processamento de cana-de-açúcar utilizada para fins industriais. O setor pode ser considerado um dos exemplos mais bem-sucedidos de estratégia integrada de desenvolvimento econômico descentralizado, capaz de atingir elevado grau de sustentabilidade ao longo do tempo.

O processo de cogeração, no Brasil, foi explorado inicialmente pelo setor industrial, com foco na auto-suficiência energética, sobretudo considerando os ganhos econômicos resultantes [32].

Na queima do bagaço nas caldeiras, o vapor produzido é utilizado para movimentar os equipamentos da própria unidade industrial e, ao mesmo tempo, movimentar elementos geradores de energia elétrica, como mostrado na figura 4.

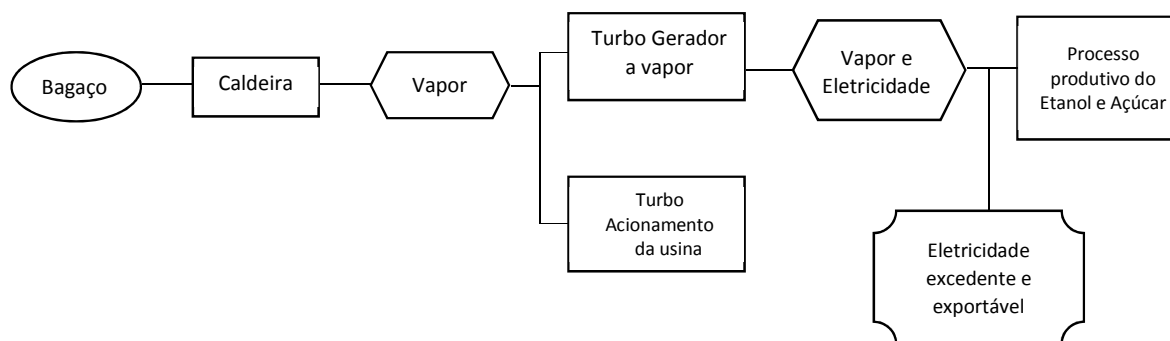


Figura 4: Utilização de vapor nos processos de cogeração [32].

A referência [33] salienta que os benefícios diretos e positivos do desenvolvimento do setor sucroenergético são reconhecidos e incontestáveis. As demandas por etanol, bioeletricidade e açúcar, nos mercados interno e externo, continuam em crescimento.

Foi somente no século XX que o Brasil iniciou as tentativas de tornar o etanol uma opção energética atraente. Em 1931, o governo estabeleceu o decreto n. 19.717 que obrigou a mistura de 5% de etanol na gasolina importada consumida no país e, em 1938, por meio do decreto-lei nº 737, estendeu a mistura à gasolina produzida no país. No período entre 1942 e 1946, com as dificuldades de abastecimento de petróleo provocadas pela II Guerra Mundial, a mistura chegou a alcançar 42%. Nas décadas seguintes, porém, a produção de etanol tornou-se menos interessante, tanto para o governo quanto para o empresariado, reduzindo a mistura para 2,9% em todo o país [34].

Em 1973 aconteceu o primeiro choque do petróleo, com isso houve grande procura por fontes alternativas de energia em todo o mundo. No Brasil, em 1975, foi lançado o programa de biocombustíveis, denominado Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Com o aumento do preço do petróleo criaram-se bases para o retorno do etanol combustível à matriz energética nacional. A segunda escalada do preço do petróleo em 1979/81 coincidiu com o desenvolvimento de motores de automóveis movidos exclusivamente a etanol, com conteúdo alcoólico em torno de 94%, promovendo assim um grande impulso na produção do biocombustível no Brasil, saltando de 600 milhões de litros na safra 1975/76 para 3,6 bilhões de litros na safra 1979/80 e com a construção de mais de 200 destilarias de etanol no país [35].

Atualmente o Brasil tem a maioria de sua matriz energética baseada em fontes renováveis, porém a maior parte provém de energia de usinas hidrelétricas, ficando o sistema condicionado às chuvas nos reservatórios. Com essa dependência de água, os períodos de seca prolongada afetam gravemente o sistema, forçando racionamentos e o aumento do preço da tarifa de energia elétrica [29].

No entanto, segundo [29], devido à recente seca que assolou as regiões Sudeste e Centro-Oeste, o Operador Nacional do Sistema (ONS) apresenta dados mostrados na tabela 3, referentes a janeiro de 2015 com os níveis dos principais reservatórios. Observa-se que é um fato preocupante, já que as duas regiões têm a capacidade de armazenamento de 70% de toda matriz hidrelétrica do país.

De acordo com a ANEEL, a Matriz de Energia Elétrica brasileira apresenta uma diversificação entre energia de fontes renováveis e não renováveis.

Tabela 3: Níveis dos reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro, jan/2015.

Região	Bacia	Reservatório	Nível
SE/CO	Rio Paranaíba	Emborcação	13,32%
		Nova Ponte	10,50%
		Itumbiara	11,27%
		São Simão	54,39%
	Rio Grande	Furnas	10,35%
		Mascarenhas de Moraes	12,58%
		Marimbondo	12,37%
		Água Vermelha	16,63%
	Rio Paraná	Ilha / 3 Irmãos	0%
	Rio Paranapanema	Jurumirim	20,65%
Chavantes		18,28%	
Capivara		23,04%	
S	Rio Iguaçu	S. Santiago	66,47%
		G. B. Munhoz	54,72%
		Segredo	100,42%
	Rio Jacuí	Passo Real	61,94%
	Rio Uruguai	Passo Fundo	92,76%
NE	Rio São Francisco	Sobradinho	19,68%
		Três Marias	10,23%
		Itaparica	19,55%
N	Rio Tocantins	Serra da Mesa	26,19%
		Tucuruí	33,53%

Fonte: ANEEL.

A fonte hidrelétrica ainda é a que tem maior percentual, representando 61,54%. Geração a partir de fontes fósseis, como petróleo, gás natural e carvão mineral, representa 17,75%. Dessa forma, a matriz elétrica brasileira é composta (geração em território nacional) de 79,29% de fontes renováveis. A biomassa da cana-de-açúcar representa 7,07% conforme dados da tabela 4.

#### 2.4.1- Produção do Setor

A produção de biocombustíveis sólidos é pouco capital-intensiva, não depende, necessariamente, de grandes escalas de produção.

Tabela 4: Composição da matriz energética brasileira.

FONTE			Capacidade Instalada			TOTAL		
ORIGEM	Fonte Nível 1	Fonte Nível 1	Nº usinas	(KW)	%	Nº usinas	(KW)	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	394	10.549.820	7,0700	411	10.662.575	7,1455
		Biogás-AGR	2	1.722	0,0011			
		Capim Elefante	3	65.700	0,0440			
		Casca de Arroz	12	45.333	0,0303			
	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2	4.350	0,0029	2	4.350	0,0029
	Floresta	Carvão Vegetal	7	51.397	0,0344	82	2.523.323	1,6910
		Gás de Alto Forno - Biomassa	9	111.865	0,0749			
		Licor Negro	17	1.978.136	1,3256			
		Resíduos Florestais	49	381.925	0,2559			
	Resíduos animais	Biogás - RA	10	1.924	0,0012	10	1.924	0,0012
	Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	12	75.151	0,0503	12	75.151	0,0503
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	324	7.793.482	5,2228	324	7.793.482	5,2228
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo - CM	1	24.400	0,0163	22	3.612.155	2,4207
		Carvão Mineral	13	3.389.465	2,2714			
		Gás de Alto Forno - CM	8	198.290	0,1328			
	Gás natural	Calor de Processo - GN	1	40.000	0,0268	146	12.427.682	8,3284
		Gás Natural	145	12.387.682	8,3016			
	Outros Fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,0987	1	147.300	0,0987
		Gás de Refinaria	7	339.960	0,2278			
	Petróleo	Óleo Combustível	41	4.141.353	2,7753	2172	9.957.536	6,6731
		Óleo Diesel	2108	4.538.295	3,0413			
		Outros Energéticos de Petróleo	16	937.928	0,6285			
Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1201	91.832.070	61,541	1201	91.832.070	61,541
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,3336	2	1.990.000	1,3336
Solar	Radiação Solar	Radiação solar	33	21.336	0,0142	33	21.336	0,0142
Importação	Paraguai			5.650.000	3,7863			5,4751
	Argentina			2.250.000	1,5078			
	Venezuela			200.000	0,1340			
	Uruguai			70.000	0,0469			
Total			4418	149.218.884	100	4418	149.218.884	100

Fonte: ANEEL.

A produção em uma usina de cana tem a vantagem de usar insumos com baixo custo local (biomassa, energia elétrica e calor) trazendo, inclusive, ganhos de escopo que alavancam a economia das atividades tradicionais da agroindústria da cana.

A partir do início da década de 2000, com o desenvolvimento e lançamento dos carros *flex-fuel*, movidos a etanol ou a gasolina em qualquer proporção, que o setor voltou a ter o etanol como base fundamental para o seu crescimento e desenvolvimento. A figura 5 mostra o aumento da produção de etanol no Brasil, com um crescimento acentuado a partir de 2002, culminando em uma safra recorde de produção no ano de 2008 [31].

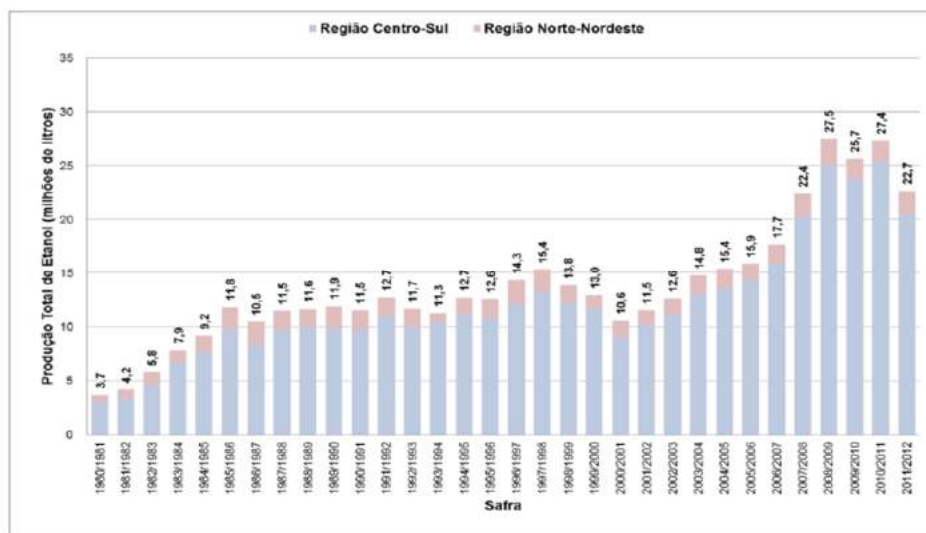


Figura 5: Produção de Etanol no Brasil.

Fonte: UNICA [36].

Os primeiros leilões do governo federal para a compra de energia elétrica gerada através de fontes alternativas aconteceram em 2005. A venda do excedente de energia gerada pelas usinas tornou-se mais um produto do setor. A energia gerada nas usinas, além de consumida na própria unidade, também é comercializada e utilizada para os consumidores finais, sendo inserida no Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável pelo gerenciamento da produção e transmissão da energia elétrica.

De acordo com dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), elaborados pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar UNICA [36], já foram contratados pelos leilões de energia elétrica do governo federal, no período de 2005 até 2011, um total de 1.233 MW, conforme apresentado na figura 6.

Em [36], é mostrado que na safra de 2010/2011, a geração adicional de energia gerada pelas usinas foi de 4.158 MW médios enquanto a oferta para a rede nacional, em 2010, foi de

1.002 MW médios, bem abaixo do potencial de geração de bioeletricidade pelo setor sucroenergético nacional, conforme mostrado nas figuras 7 e 8.

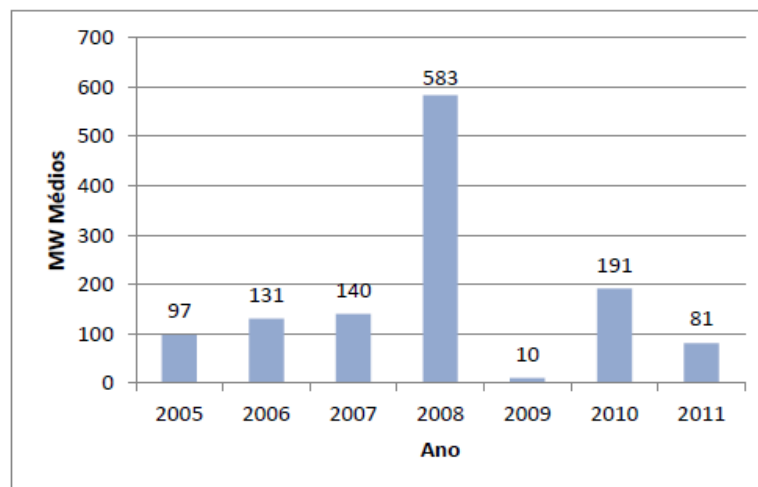


Figura 6: Energia contratada da biomassa em leilões do governo federal.  
Fonte: UNICA [36].

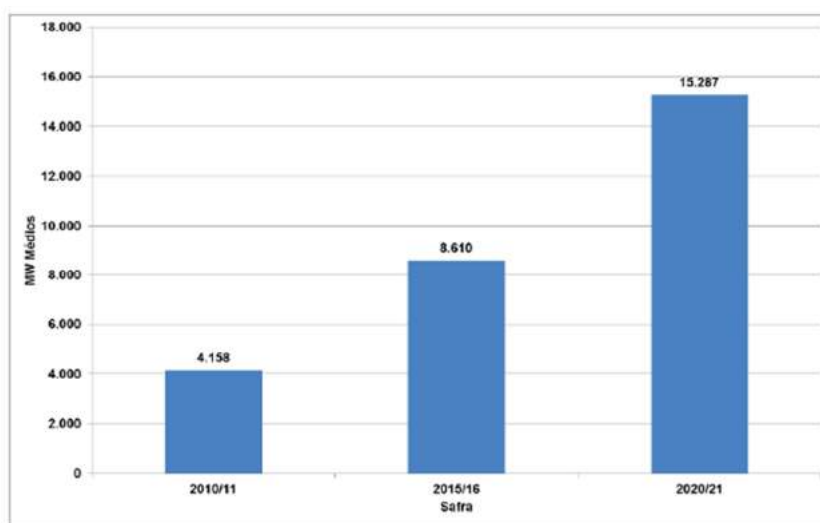


Figura 7: Potencial de geração adicional de bioeletricidade a partir da biomassa.  
Fonte: Adaptado UNICA [36].

Segundo dados apresentados pela UNICA, a comercialização do excedente da energia elétrica gerada pelas usinas vem aumentando a cada ano, como apresentado na figura 8.

É interessante ressaltar também que em 2011, menos de 30% das usinas de cana-de-açúcar do país estavam ligadas à rede elétrica como geradoras de excedente de energia, segundo dados da UNICA [36].

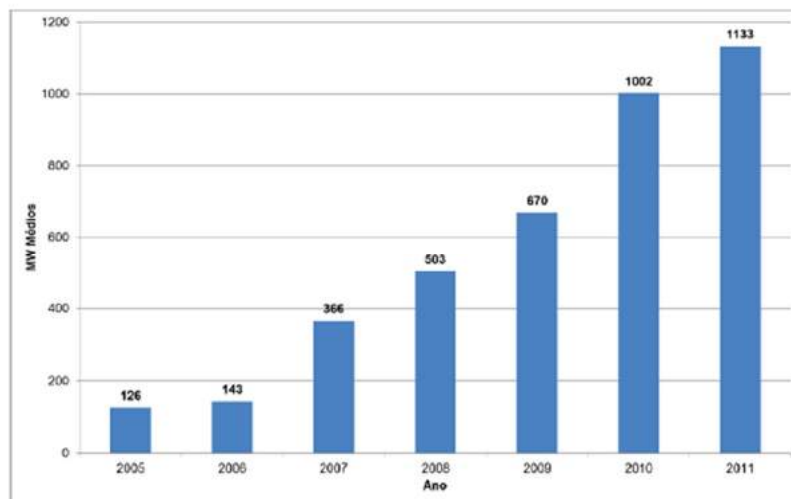


Figura 8: Energia elétrica excedente, gerada e comercializada pelas usinas no Brasil. Fonte: UNICA [36].

Na figura 9 é apresentado o acréscimo anual da capacidade instalada de geração através de biomassa das usinas sucroenergéticas. São apresentados os resultados de acréscimo anual de 2002 até uma previsão para o ano de 2020, da capacidade instalada no Brasil.



Figura 9: Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2020, Brasil (MW). Fonte: ANEEL (2015). Elaboração: UNICA [36].

A partir de 2013, o setor sucroenergético vem gerando mais energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN) do que para o consumo próprio das unidades fabris, ficando numa relação 19,4TWh de energia para a rede e 13,2TWh para consumo próprio em 2014, figura 10.

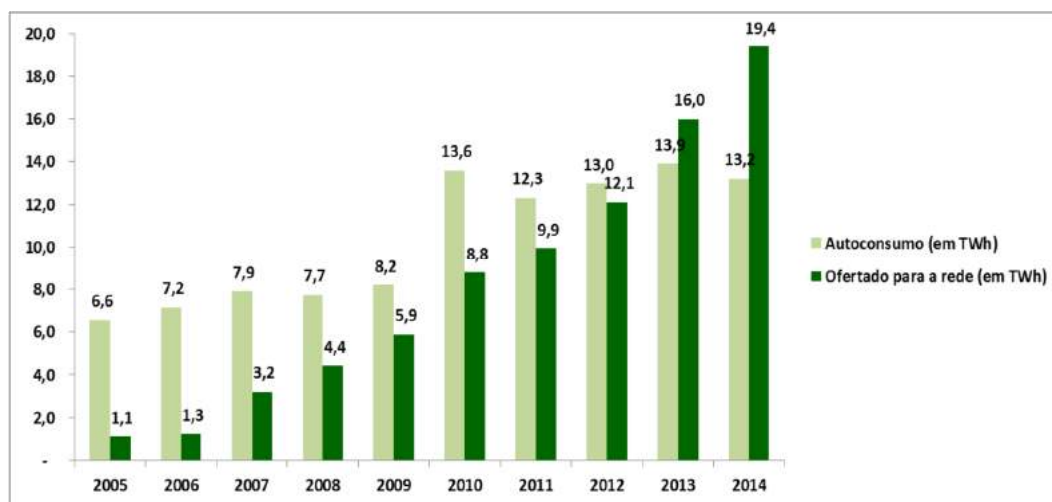


Figura 10: Geração de bioeletricidade sucroenergética, 2005-2014, Brasil (TWh).  
Fonte: UNICA [36].

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2014 existiam 177 unidades sucroenergéticas exportando excedentes de bioeletricidade para a rede, de um universo de 355 unidades produtoras, de acordo com a UNICA. Assim, a outra metade de usinas sucroenergéticas, com a biomassa já existente nos canaviais, pode passar por um processo de reforma (“retrofit”), além de aproveitarem plenamente o bagaço, a palha e o biogás da vinhaça, e tornarem-se grandes geradoras de bioeletricidade para a rede.

De acordo com o último Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2024), considerando o aproveitamento pleno da biomassa existente (bagaço e palha) nos canaviais em 2015, a geração de bioeletricidade sucroenergética para a rede tem potencial técnico para chegar a quase sete vezes o volume de oferta à rede em 2014, conforme se observado na figura 11.

A biomassa sucroenergética - energia limpa e renovável, produzida a partir dos resíduos da cana-de-açúcar, como o bagaço e a palha - terceira fonte mais importante da matriz de energia elétrica do Brasil em termos de capacidade instalada, alcançou mais um grande feito,



atingindo o marco de 10 mil MW em potência efetivamente fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

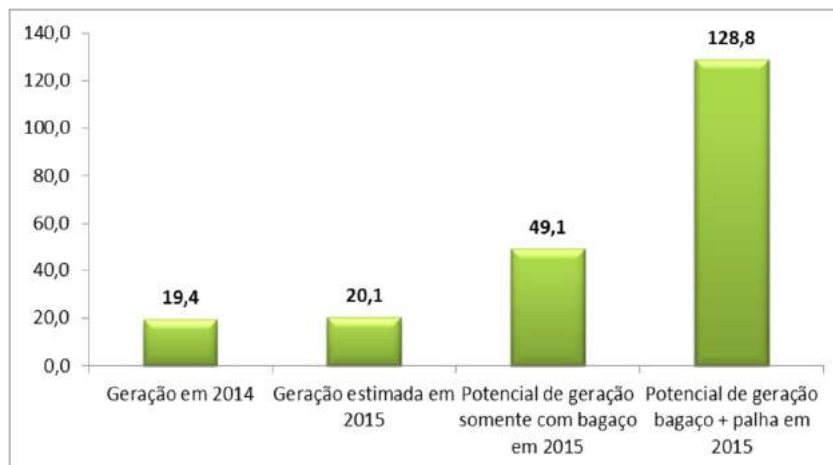


Figura 11: Potencial técnico de oferta da bioeletricidade para a rede elétrica (TWh).  
Fonte: UNICA [36].

Em agosto de 2015, segundo dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), 3.207GWh de energia produzida a partir da palha e do bagaço da cana-de-açúcar abasteceram o Sistema Interligado Nacional (SIN). Apresentando um expressivo crescimento de 9,5% em relação ao mesmo mês do ano anterior, este foi o maior volume energético mensal ofertado pela biomassa, representando, no período, 24% da geração térmica no País - 30% do total de eletricidade consumida pelas residências ou 8% do consumido em todo o País [36].

#### 2.4.2- Círculo de Desenvolvimento Sustentado do Setor Sucroenergético

Na figura 12 é apresentado o círculo de desenvolvimento sustentado para o setor sucroenergético, levando em consideração todos os fatores internos e externos de produção de açúcar, etanol e energia elétrica. Pode-se observar também os impactos trazidos pelo desenvolvimento do setor.

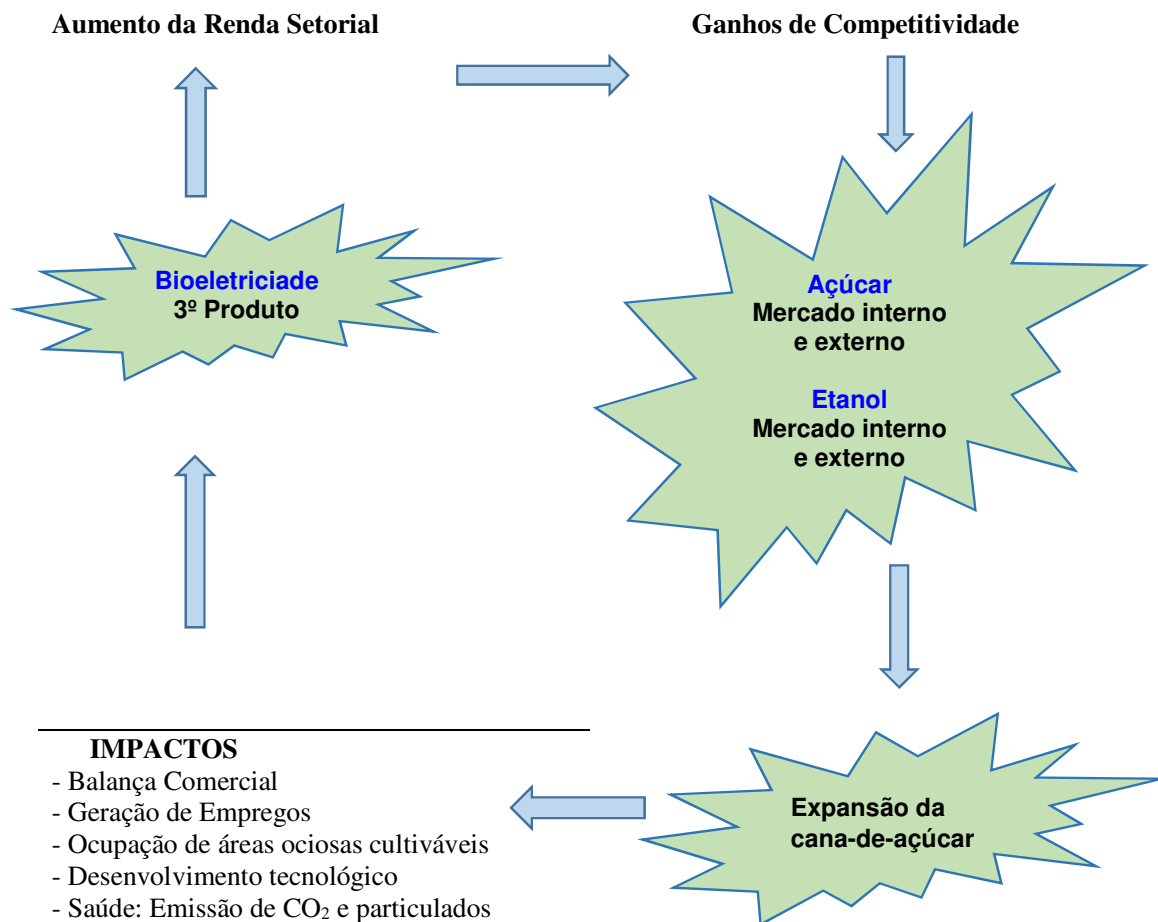


Figura 12: Círculo de desenvolvimento do setor sucroenergético no Brasil [36].

## 2.5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado, de forma sucinta, a evolução das normas técnicas da geração distribuída, a regulamentação do sistema de distribuição de energia, a importância e as características do setor sucroenergético. Fica evidente a necessidade do desenvolvimento de esforços no sentido da elaboração de normas de regulamentação da GD, considerando todos os aspectos das usinas de bioenergia.

Vale ressaltar que uma avaliação sobre o fluxo de potência, curto-circuito, ilhamentos, aspectos relacionados à proteção e estabilidade de tensão e frequência de sistemas de distribuição na presença de geração distribuída, perfazem um grande e promissor campo de

pesquisa na atualidade. Diversos estudos estão sendo realizados no sentido de verificar os impactos causados pelos sistemas de GD na estabilidade dos sistemas elétricos de potência, visto que para cada tipo de geração de energia utilizado em GD pode-se obter níveis diferentes de impactos no sistema elétrico. Para exemplificar, pode-se citar os geradores de parques eólicos e os geradores de PCHs que possuem dinâmica de funcionamento diferentes, e os prováveis impactos de estabilidade no sistema, por sua vez serão distintos.

Existe legalidade nos contratos pertinentes ao acesso, com consulta através das regulamentações. Porém, ainda existe certa autonomia das concessionárias de energia sobre os produtores, uma vez que devem atender legislações específicas das mesmas mediante algumas particularidades de cada região e sistema elétrico. Notoriamente percebe-se que as instituições governamentais não podem ignorar a necessidade de padrões regulatórios para proporcionar um crescimento com qualidade de energia no sistema elétrico. Leis, resoluções e decretos tem proporcionado aos sistemas de GD um avanço significativo na matriz elétrica brasileira como foi citado sobre a resolução normativa da ANEEL.

O crescimento dos sistemas de GD fica claro e não deve ser afetada por buscar somente melhores condições de custos de produção, diminuição dos impactos ambientais ou simplesmente para o comércio da energia, mas aliado a este crescimento deve-se também desenvolver pesquisas e projetos que possam ter como objetivo a estabilidade, confiabilidade e a qualidade dos sistemas elétricos de potência.

O setor energético brasileiro está bem postado, apesar das diversas oscilações desde sua definitiva solidificação no cenário energético. No entanto, deve-se fornecer maiores incentivos para que o mesmo possa continuar a colaborar efetivamente para que a GD seja mais uma alternativa energética para o país.

## CAPÍTULO III

### IMPACTOS DOS ILHAMENTOS EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

#### 3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma grande reestruturação do setor de energia elétrica realizado em diversos países nos últimos anos procurou minimizar significativamente, ou quase completamente, obstáculos legais e econômicos para o surgimento de novos agentes geradores de energia [37].

O desenvolvimento de novas tecnologias de geração de energia, o crescente aumento da demanda, a necessidade de produção de energia com a preservação do meio ambiente e procurando-se aumentar a credibilidade do armazenamento interno associado à uma redução de custos em alguns sistemas elétricos industriais, como a cogeração, são elementos que cooperam para uma expansão da GD [38].

Essas condições envolvem desde recomendações sobre os tipos e ajustes a serem feitos nos dispositivos de proteção no ponto de interconexão entre o gerador e a rede elétrica, até recomendações sobre o modo de controle do sistema de excitação dos geradores.

Um dos requisitos que merece destaque determina que no caso de acontecer a perda do suprimento da concessionária em uma rede contendo geradores distribuídos, estes devem ser automaticamente desconectados dentro de um tempo pré-determinado, permanecendo nesse estado até que o fornecimento de energia seja restabelecido [38,39].

De acordo com [40], esse mecanismo evita a formação de ilhas energizadas pelos geradores distribuídos que estejam separadas do restante do sistema elétrico. O ilhamento é um evento extremamente indesejado pelas concessionárias de energia elétrica.

#### 3.2- CONCEITOS SOBRE ILHAMENTOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Essencialmente, uma situação de ilhamento acontece no momento em que parte de uma rede do sistema elétrico permanece eletricamente isolada do sistema interligado ou até mesmo

da concessionária, no entanto ainda continua energizada pelas fontes de energia elétrica interligadas a esse sistema, mas agora isoladamente.

Quando interligado em paralelo ao sistema elétrico, um gerador apresenta, necessariamente, a mesma frequência do sistema em que está interligado, fazendo com que a sua velocidade e tensão seja controlada, de maneira a evitar variações na frequência e tensão em seus terminais [41]. No entanto, no momento em que o sistema elétrico é desconectado, o gerador continua a atender a uma determinada carga de forma isolada, sendo configurado o ilhamento.

Estando nesta condição, o gerador pode acelerar ou desacelerar em função da configuração da carga atendida, do regulador de velocidade e das suas características dinâmicas [42].

Segundo a IEEE Standards 929-2000, ilhamento é, por definição:

*Uma condição em que uma porção do sistema de distribuição que contém tanto cargas como geradores distribuídos permanece energizado quando isolado do restante do sistema de distribuição de energia.*

Neste contexto, um requisito importante para a integração de sistemas de GD em redes de distribuição é a capacidade do sistema em detectar a condição de ilhamento. Esse fenômeno ocorre quando o sistema de GD continua a entregar potência à rede de distribuição mesmo quando o fluxo de potência da rede principal é interrompido, podendo causar danos aos operadores da linha que realizam manutenção, aos equipamentos da unidade de GD e à própria carga que se encontra no sistema ilhado [43].

De acordo com as bibliografias pesquisadas, os autores afirmam que um ilhamento pode ser **intencional** ou **não intencional** [43,44].

O ilhamento intencional é um caso autônomo, onde a ilha é planejada e desejada. Uma ilha não intencional ocorre quando o dispositivo de comutação entre a geração principal e o resto da rede de distribuição é aberto e a GD continua a alimentar a rede de distribuição [44]. Nas figuras 13 e 14 são apresentados ilhamentos de sistemas elétricos de potência.

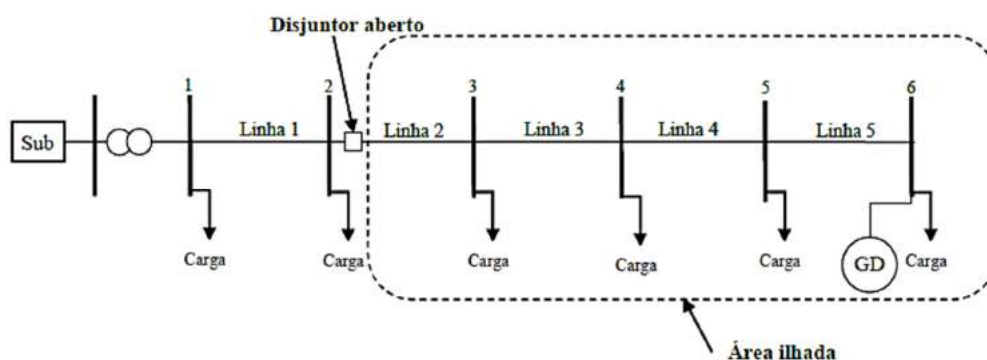


Figura 13: Área ilhada formada pela abertura do disjuntor [44].

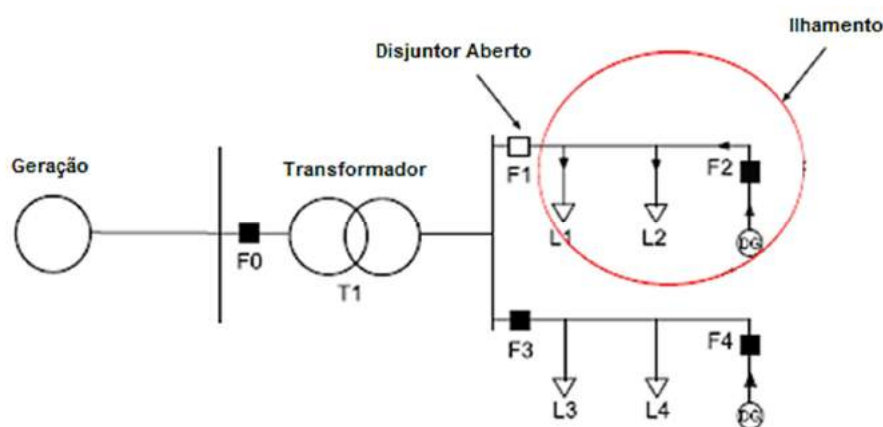


Figura 14: Ilhamento formado pela abertura do disjuntor [45].

Conforme [45] a introdução da geração distribuída no SEP pode alterar o fluxo de energia a partir de um maior fluxo centralizado a nível de tensão mais baixa em um fluxo de potência bidirecional. Quando se projeta um sistema de distribuição, o aspecto da geração do sistema deve ser sempre considerado.

Se a rede elétrica está desconectada da rede de distribuição (por consequência de um curto-circuito, por exemplo) uma ilha não intencional é formada, e é de grande importância que a geração de energia distribuída esteja também desconectada da rede elétrica. Isso deve acontecer devido à segurança pessoal e também dos equipamentos.

A importância dos elementos de detecção de ilhamento se origina por motivos de segurança. Possuir um gerador de energia acionado quando os operadores da rede de distribuição realizam a manutenção ou reparação pode ser extremamente perigoso. Muitas redes de distribuição utilizam dispositivos automáticos de religamento [46]. Depois de um tempo

específico acontece a comutação do dispositivo e o religamento do circuito é realizado. Caso ainda exista um curto-circuito na rede de distribuição, o dispositivo seccionador irá interromper a corrente novamente, como apresentado na figura 15.

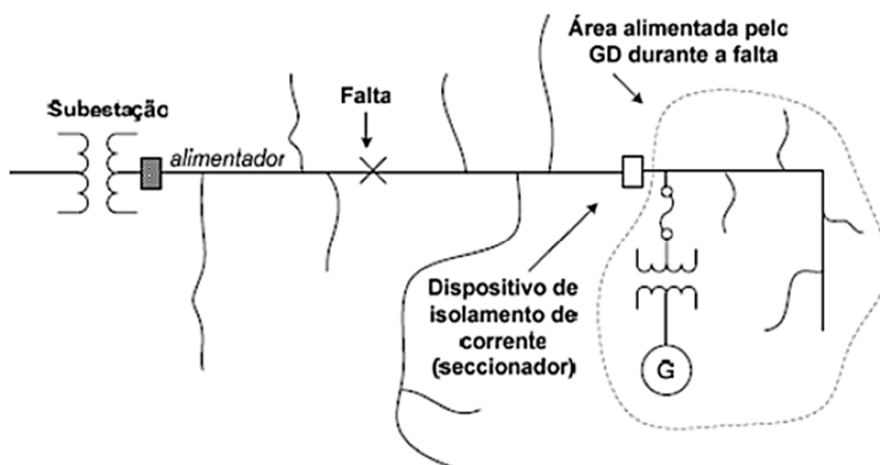


Figura 15: Alimentador de distribuição com possibilidade de ilhamento [46].

Salienta [45] que uma situação bastante grave é quando muitos curto-circuitos acontecem devido à descargas atmosféricas em linhas de distribuição aéreas. Caso a rede de distribuição continue sendo energizada e um religamento do dispositivo de comutação entre a GD e a rede de distribuição de baixa tensão aconteça, o dispositivo de proteção do sistema de alimentação pode ser danificado devido às variações de magnitudes de tensão e frequência entre a concessionária e a ilha. No anexo V são apresentados alguns relatórios de ilhamentos emitidos pela ONS.

### 3.3- PROBLEMAS CAUSADOS POR ILHAMENTOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Afirmam [40,47] que dentre os diversos transtornos causados por ilhamentos, pode-se observar um enfoque nas questões de segurança, comercial e técnica do sistema, quando os geradores distribuídos estão em operação de ilhamento. Dentre eles, pode-se citar:

- Não manutenção do controle dos níveis de tensão e frequência dentro do sistema ilhado. Desse modo, a qualidade da energia fornecida aos consumidores dentro da ilha energizada não pode ser garantida;

- A concessionária perde o controle de parte do suprimento do sistema, com parte da rede elétrica permanecendo energizada. Isso faz com que a segurança da equipe técnica de operação e manutenção dos sistemas elétricos fique comprometida;
- Ocorrendo a redução brusca das correntes de curto-circuito, após a perda da conexão com a concessionária, os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos existentes dentro da ilha podem perder a coordenação entre si. Na figura 16, pode-se observar o sinal da corrente na extremidade da rede de distribuição com um gerador distribuído (síncrono) em situação de ilhamento e não ilhamento.

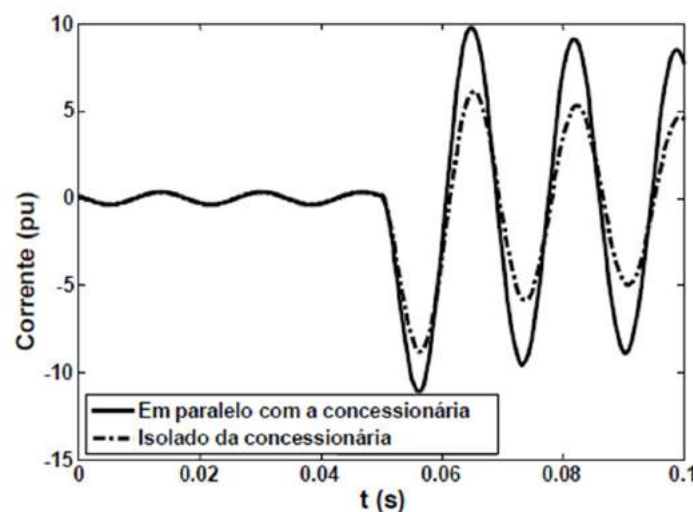


Figura 16: Corrente de ilhamento devido ao curto-circuito trifásico [40].

- A perda da conexão com a concessionária leva um sistema ilhado a perder seu aterramento fase-terra, tornando-o não aterrado e apresentando condições inadequadas para sua operação. Desta forma, a ocorrência de curtos-circuitos fase a terra é de difícil ou impossível detecção pelos relés de sobrecorrente, pois a corrente de curto-circuito torna-se muito pequena ou quase nula (IEEE, 2001);
- Estando os geradores distribuídos fora de sincronismo com a rede elétrica podem sofrer graves danos caso ocorra a reconexão da ilha ao sistema elétrico, isso em função das elevadas correntes que podem surgir nesses casos, podendo danificar também outros equipamentos elétricos conectados na rede ilhada.

Segundo [40], devido a todos os problemas mencionados anteriormente existe uma imensa motivação para o emprego das técnicas de detecção de ilhamento nos sistemas elétricos.



Como o ilhamento ainda não é uma situação desejada pelas concessionárias, inúmeros trabalhos estão sendo desenvolvidos na tentativa de fazer com que a operação ilhada se torne mais segura e confiável [48,49].

Cada país possui as normas que tratam do problema do ilhamento, mas em geral seguem os mesmos padrões com os requisitos seguintes, podendo variar de acordo com a concessionária [41]:

- a) O gerador distribuído deve se desconectar da rede elétrica em caso de variações anormais de tensão ou frequência;
- b) Caso uma das fases ou mais sejam desconectadas do sistema, o gerador distribuído deve se desligar imediatamente da rede;
- c) Caso aconteça religamento automático, o gerador distribuído deve se desconectar antes do religamento da rede.

### 3.4- DISTÚRBIOS RELACIONADOS À QEE

Algumas alterações que podem vir a ocorrer no sistema elétrico, manifestada por variações na tensão, corrente ou frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores são classificadas como problemas na QEE. Os distúrbios ocorridos nos sistemas elétricos podem acontecer em várias partes do sistema de energia, geração (concessionárias), transmissão, distribuição, unidades de cogeração (GD) ou consumidor final.

Tais distúrbios afetam, geralmente, a tensão e a frequência do sistema e para analisar estas duas variáveis, geralmente empregadas para descrever a Qualidade de Energia Elétrica (QEE), deve-se observar três principais características [50]:

- As amplitudes das tensões e frequência dentro de limites aceitáveis;
- A manutenção da simetria do sistema elétrico entre as fases;
- A forma de onda deve ser sempre próxima de uma senóide.

Os casos de instabilidade de um sistema, ou seja, perda de estabilidade acontecem quando a tensão e ou frequência do sistema elétrico são afetados. A estabilidade de um sistema de potência está ligada ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas (centrais hidrelétricas) após a ocorrência de uma perturbação. Acontecendo a extinção da perturbação as

máquinas deverão voltar ao seu estado de funcionamento normal. Caso contrário, se houver qualquer tipo de mudança na configuração do sistema, tais como, perda de carga, problemas nas linhas de transmissão, fortes fluxos de reativos, etc., poderá ocorrer um desequilíbrio entre a geração e as cargas. Neste caso as máquinas geradoras passam a trabalhar em outro ponto de operação, e é de fundamental importância que, em qualquer situação, as máquinas geradoras interligadas ao sistema permaneçam em sincronismo [50]. A figura 17 mostra o comportamento dinâmico de duas máquinas, durante uma perturbação.

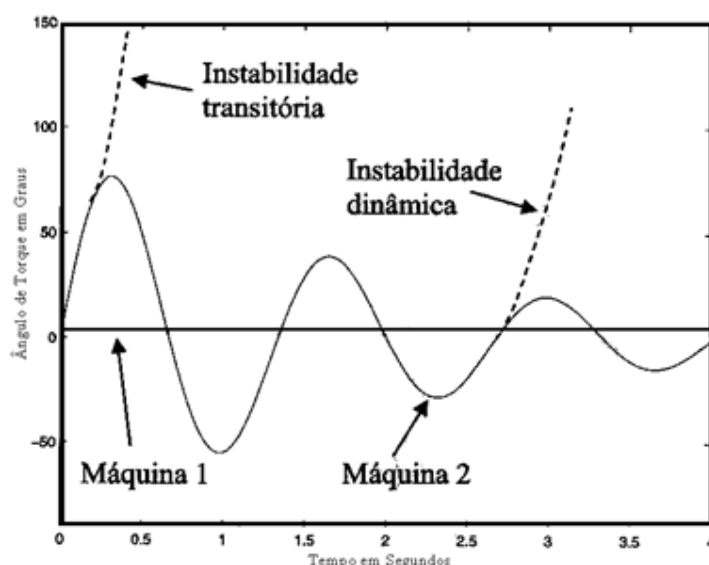


Figura 17: Estabilidade de um sistema de duas máquinas [50].

Conforme o comitê 22 do IEEE [51], em conjunto com outras entidades internacionais, existe uma coordenação de normas junto à chamada comunidade de qualidade de energia elétrica. Basicamente os distúrbios são definidos pela amplitude e duração destes fenômenos eletromagnéticos [52]. A seguir são mencionados alguns destes distúrbios.

### 3.4.1- Transitórios

Diante das causas dos fenômenos transitórios decorrentes nos sistemas elétricos, pode-se citar algumas delas: variações instantâneas na corrente, as quais dependem da impedância e carga do sistema, resultando em pulsos de tensões instantâneas. Carga com operação intermitente, curto-circuito, operação de dispositivos semicondutores, chaveamento de bancos de capacitores e problemas nos condutores. Em seguida, descreve-se de forma objetiva os

fenômenos ligados a QEE de acordo com a referência [51]. Em [51] é apresentado de forma normativa, uma abordagem completa.

## I- Transitórios Oscilatórios

Este tipo de transitórios são decorrentes também da energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, além da utilização dos bancos de capacitores.

Conforme comenta [52], com a expansão do uso de banco de capacitores pelas concessionárias com a finalidade da manutenção dos níveis de tensão e pelas indústrias para correção do fator de potência, tem-se observado com uma preocupação especial a possibilidade de acontecimentos de uma condição de ressonância. Esta condição pode ser apresentada devido às oscilações de altas frequências, entre o sistema da concessionária e a indústria, e assim ocorrer uma amplificação das tensões transitórias. Transitórios oscilatórios com frequências menores do que 300 Hz podem também ser encontrados nos sistemas de distribuição. Estes estão, geralmente, associados aos fenômenos de ferrorressonância na energização de transformadores.

A figura 18 ilustra a tensão em p.u. de uma das fases em um dado consumidor, quando da conexão de um banco de capacitores à rede. Na figura 19, é apresentado o comportamento da corrente durante o chaveamento do banco de capacitores. Já a figura 20, mostra um fenômeno de ferrorressonância em transformadores.

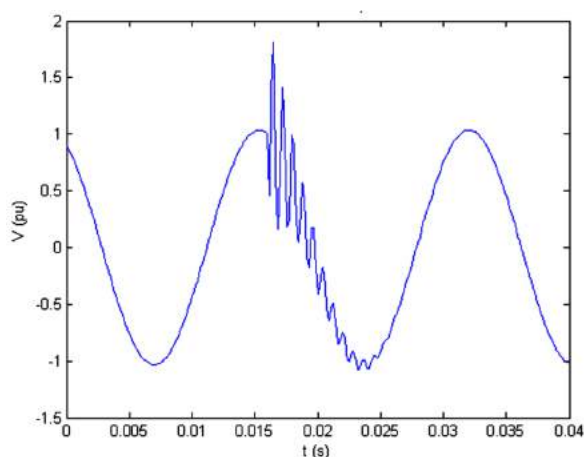


Figura 18: Chaveamento de um banco de capacitores. Tensão no terminal [30].

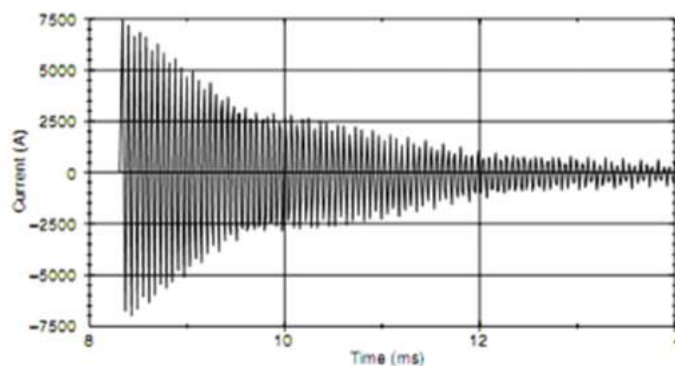


Figura 19: Chaveamento de um banco de capacitores. Fluxo de Corrente no terminal [51].

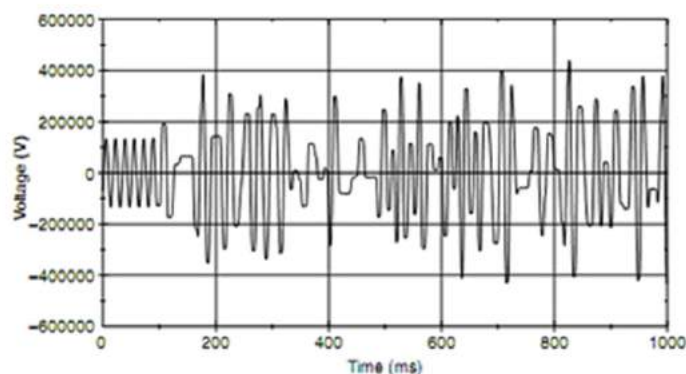


Figura 20: Fenômeno de ferorressonância na energização de transformadores [51].

## II- Transitórios Impulsivos

Geralmente, os transitórios impulsivos acontecem em função de descargas atmosféricas. Consistem numa alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão e ou corrente, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e com frequência bem diferente daquela da rede elétrica. Os transitórios impulsivos geralmente possuem um tempo de subida e outro de descida do impulso. No exemplo da figura 21 é mostrada uma corrente típica de um transitório impulsivo, de uma descarga atmosférica.

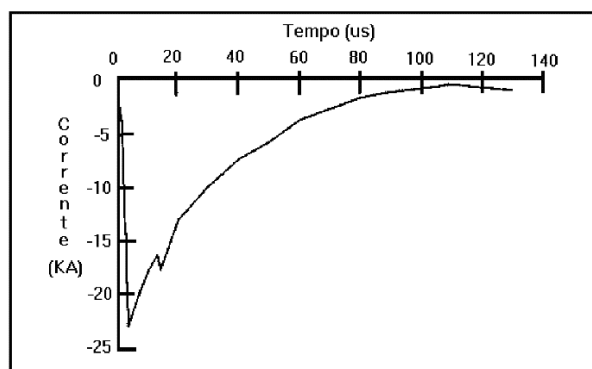


Figura 21: Corrente impulsiva devido à descarga atmosférica [30].

### 3.4.2- Variações de Tensão de Curta Duração

Conforme apresentado por [53], variações de tensão de curta duração apresentam duração típica entre 0,5 ciclo e 1 minuto, e podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração do fenômeno. São causadas por condições de falta, energização de grandes cargas ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. Um curto-circuito pode causar tanto um afundamento de tensão, como uma elevação de tensão, ou mesmo uma interrupção completa do fornecimento da energia no sistema elétrico, isto dependerá do local e das condições do sistema.

Em [51] é comentado sobre a importância do monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica através da identificação dos distúrbios de **afundamento de tensão, elevação de tensão e interrupção de tensão**, sendo que cada um destes distúrbios possui uma particularidade para sua definição. Em seguida são apresentadas as figuras 22, 23, 24 e 25 com os distúrbios citados anteriormente.

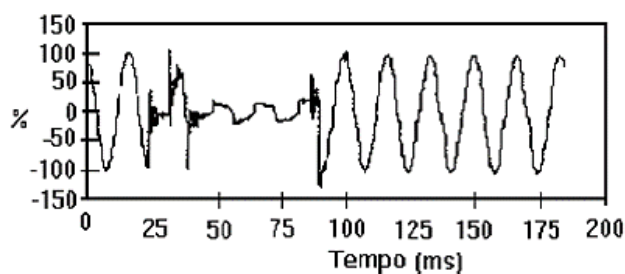


Figura 22: Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra [51].

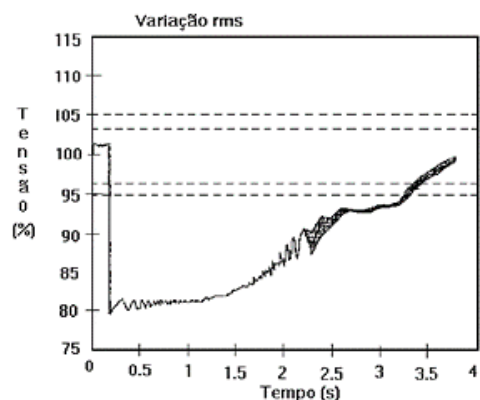


Figura 23: Afundamento de tensão devido a partida de um motor [51].

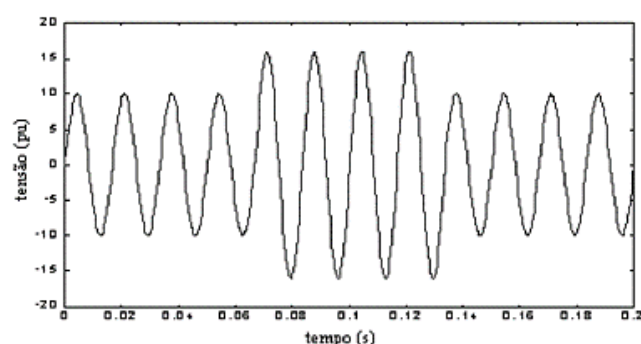


Figura 24: Elevação de tensão originado por uma falta fase-terra [51].

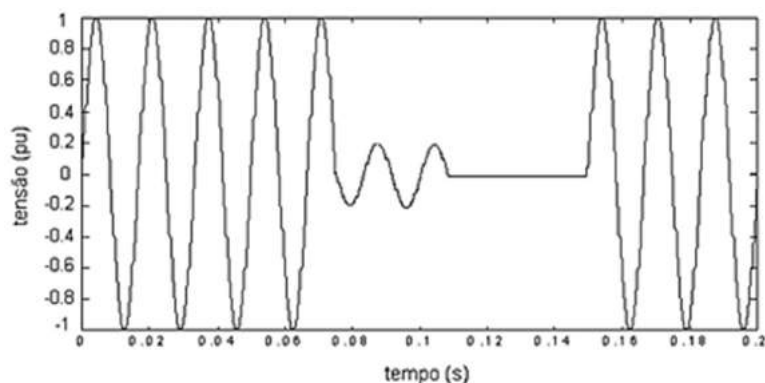


Figura 25: Interrupção momentânea por curto-circuito, com afundamento de tensão [51].

### 3.4.3- Variações de Tensão de Longa Duração

Podem ser descritas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, estando a mesma na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto. A resolução 505 da ANEEL [54], define os índices que caracterizam variações de tensão de longa duração. As variações de tensão podem se dar como **afundamentos de tensão**, **elevações de tensão** ou **interrupções**

**sustentadas.** Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema [30,52].

### 3.4.4- Distorções da Forma de Onda

É definida como um desvio da situação de regime permanente (forma de onda puramente senoidal - frequência fundamental) caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Os principais tipos de distorções mencionadas por [30,52] são:

#### I- Distorções Harmônicas:

São tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas e inteiras em relação à frequência fundamental do sistema de energia elétrica. Estão em desacordo com as finalidades da qualidade de suprimento promovido pelas concessionárias de energia elétrica, as quais devem fornecer aos seus consumidores uma tensão totalmente senoidal, com amplitude e frequência constantes [52]. A figura 26 ilustra uma distorção harmônica.

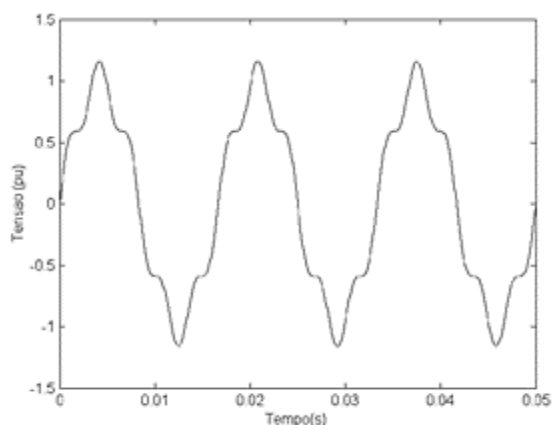


Figura 26: Distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem [32].

#### II- Distorções Inter-harmônicas:

São componentes de frequência, em tensão ou correntes, que não são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60 Hz). Tais distorções podem surgir como frequências discretas ou por uma larga faixa espectral. As suas principais fontes são

conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. [50]. A figura 27 mostra uma distorção inter-harmônica.

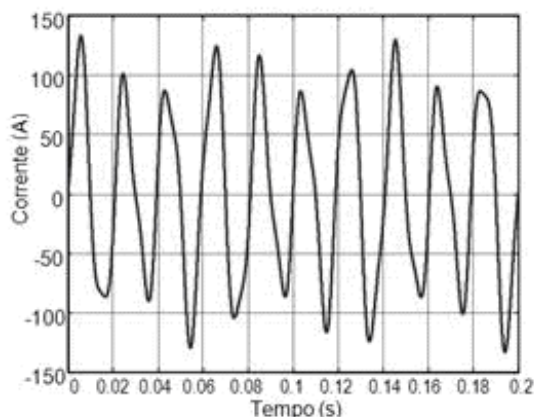


Figura 27: Distorções Inter-harmônicas [32].

### III- Ruídos:

São definidos como sinais elétricos indesejados, contendo uma larga faixa espectral com frequências de até 200 kHz, as quais se apresentam superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro nas linhas de transmissão. Nos sistemas de potência, os ruídos podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores de estado sólido e fontes chaveadas. Podem estar relacionados com sistemas de aterramentos impróprios [50]. A figura 28 ilustra um distúrbio de ruído.

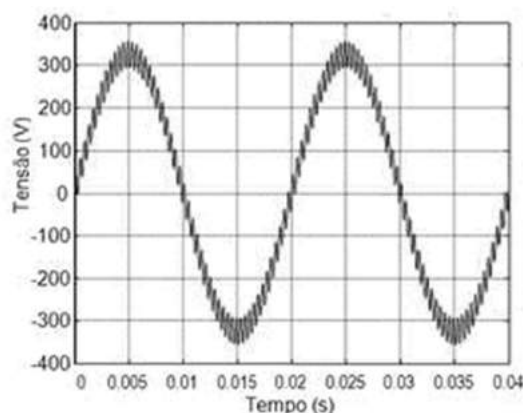


Figura 28: Sinal de tensão com ruído de alta frequência [32].



#### IV- Notching:

Quando a corrente é comutada de uma fase para outra, na operação normal em equipamentos de eletrônica de potência, acontece o distúrbio de tensão chamado notching. Este fenômeno pode ser detectado através do conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os notchings são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica [52]. A figura 29 apresenta um distúrbio de notching no sinal de tensão.

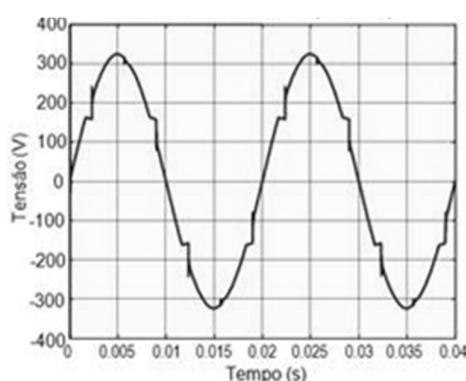


Figura 29: Notching no sinal de tensão [52].

#### V- Nível CC:

Caracteriza-se pela presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA (“DC offset” termo bastante utilizado), podendo acontecer como resultado de uma operação ideal de retificadores de meia-onda. Em redes de corrente alternada, o nível CC pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil do equipamento. Além disso, pode também provocar a corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores [52].

#### 3.4.5- Variações na Frequência do Sistema Elétrico

São definidas como sendo os desvios ocorridos na frequência em relação ao valor fundamental. No Brasil a frequência fundamental é de 60 Hz, a frequência do sistema de

potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Na figura 30 são apresentados os principais fenômenos eletromagnéticos inerentes a QEE.

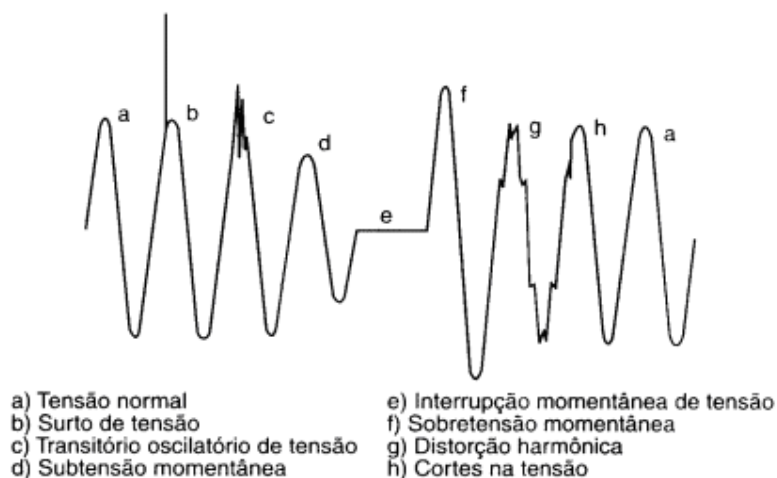


Figura 30: Forma de onda ilustrativa com resumo dos distúrbios referentes à QEE [32].

### 3.5- MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO

A identificação de um ilhamento é uma tarefa de extrema importância para a segurança e o controle do sistema elétrico de potência [53]. A detecção de um ilhamento nos sistemas de transmissão em SEPs tem ganhado importância na análise de segurança e controle, pois os ilhamentos podem, inclusive, levar o SEP à perda de estabilidade (transitória, tensão ou frequência) acarretando o colapso do fornecimento de energia [55].

A perda da estabilidade do SEP, usualmente, está relacionada a uma grandeza elétrica específica, sendo que, em termos de análise, geralmente a estabilidade deve ser classificada observando-se a natureza do fenômeno preponderante [55].

Na atualidade, os elementos de proteção mais utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para detecção de ilhamentos são os relés, que utilizam técnicas de medição de tensão e de frequência [38,39]. Logo após a ocorrência de um ilhamento, os valores das tensões e a frequência do subsistema isolado variam dinamicamente dependendo dos desbalanços de potência ativa e reativa, isto é, da diferença entre as potências ativas e reativas geradas e consumidas.

Caso as variações de tensões e frequências sejam grandes, o desbalanceamento do sistema será maior. O sistema de proteção detecta facilmente estas grandes variações de tensão

e frequência e dessa forma a situação de ilhamento pode ser identificada facilmente. No entanto, caso os desbalanços de potência ativa e reativa sejam pequenos, as tensões e frequências não variam significativamente e a ocorrência de ilhamento pode ser detectada além do tempo determinado pela concessionária ou até mesmo não ser identificada, caracterizando um problema para a concessionária (empresa de energia). Logo, é de extrema importância a detecção deste evento em redes de distribuição de energia elétrica com os sistemas de geração distribuída [40].

Em [56,57] são realizados testes padrões para detecção de ilhamento em Geração Distribuída. Os testes foram limitados, desde o início, para unidades de geração menores, mas em [56] são realizados em unidades com uma capacidade máxima de 10 MVA ou menos. O teste realizado em [57] possui importância devido ao seu circuito, em que a carga local na rede de distribuição de baixa tensão é modelado como um circuito RLC em paralelo. O circuito utilizado pode ser observado na figura 31.

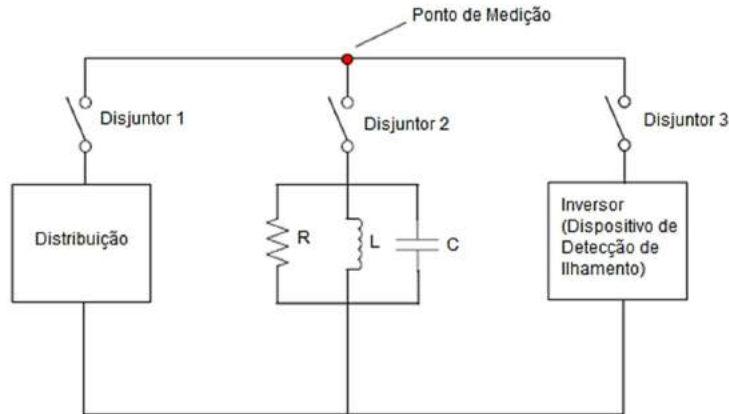


Figura 31: Circuito de teste anti-ilhamento [57].

A qualidade do fator de carga de ilhamento do circuito é dada pelas equações 1 e 2:

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1)$$

R = resistência de carga eficaz ( $\Omega$ )

C = capacitância de carga eficaz (F)

L = indutância de carga eficaz (H)

ou

$$Q = \frac{1}{P} \times \sqrt{P_{qL} \times Q_{qC}} \quad (2)$$

$P_{qL}$  = Potência reativa consumida pelo componente de carga indutiva (kVar)

$P_{qC}$  = Potência reativa consumida pelo componente de carga capacitiva (kVar)

$P$  = Potência ativa (kW)

Antes do ensaio, a frequência de ressonância do circuito de carga deve ser igual ao nominal do inversor de frequência sob a condição  $Q \leq 2,5\text{kVar}$ , de acordo com a equação 3:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

$f$  = frequência de ressonância da carga no circuito de ilhamento (Hz).

Conforme [45], antes do teste de detecção de ilhamento, um experimento de *Magnitude de Tensão e Frequência* (VMF) é realizado para verificar o ajuste correto dos relés de proteção. A tabela 5 especifica as diferentes condições que deve ser realizado. Cada condição é testada em cada disparo, e o tempo é também medido a partir de quando o interruptor 1 é aberto até que a chave faça a inversão de corrente para a carga. Se um dos testes falhar, conclui-se que todo o teste falhou.

Tabela 5: Circuito de teste anti-ilhamento.

Condições de Tensão e Frequência de Teste				
Ponto de medição no circuito de teste			Tempo de deslocamento máximo em uma rede de 60 Hz (a)	
Condição	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Ciclos (60 Hz)	Tempo (s)
A	$V < 0,5V_n$ (b)	aprovado	6	0,1
B	$0,5V_n \leq V < 0,88V_n$	aprovado	120	2
C	$0,88V_n \leq V < 1,10V_n$	aprovado	excedido	excedido
D	$1,10V_n \leq V < 1,37V_n$	aprovado	120	2
E	$1,37V_n \leq V$	aprovado	2	2/60
F	aprovado	$f < f_n - 0,7$ (c)	6	0,1
G	aprovado	$f_n + 0,5 < f$	6	0,1

(a) Tempo de deslocamento refere-se ao tempo máximo após o interruptor 1 ser aberto antes do fechamento do atual entregue ao ponto de medição (em todas as fases) durante uma condição específica. Em uma rede com frequência nominal diferente de 60 Hz o número máximo de ciclos não deve exceder o limite máximo do número de ciclos permitidos numa rede de 60 Hz.

(b)  $V_n$  = Tensão Nominal (de linha para neutro)

(c)  $f_n$  = Frequência Nominal, com  $df/dt < 0,5$  Hz/s

Fonte: [57].

### 3.5.1- Classificação dos Métodos de Detecção de Ilhamento

Existem algumas técnicas propostas para a detecção de uma ilha nos sistemas elétricos. Estas técnicas podem ser classificadas em técnicas de locais e remotas. Sendo que as técnicas locais se classificam em ativas e passivas, conforme mostra a figura 32.

De acordo com [58], as técnicas remotas para a detecção de ilhas são baseados na comunicação entre a concessionária e as unidades de GD. Embora essas técnicas possam ter uma maior confiabilidade do que as técnicas locais, elas são mais onerosas para se implementar e, por conseguinte, financeiramente inviáveis. As técnicas locais dependem das informações de dados do sistema de GD.

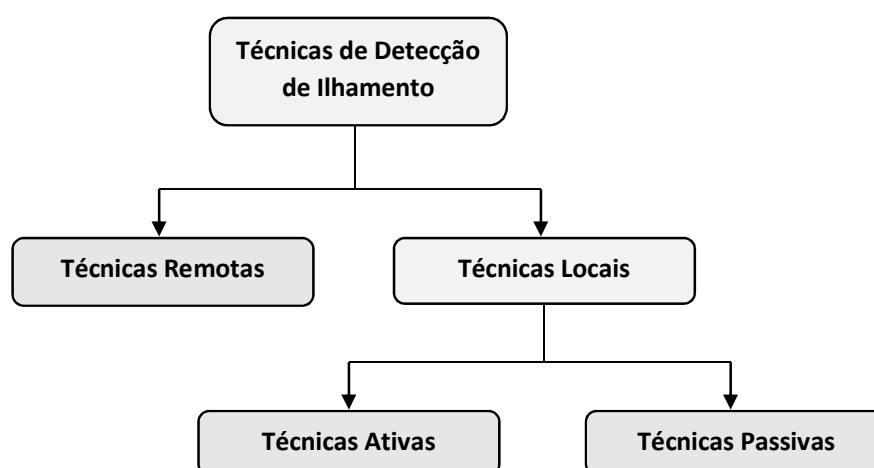


Figura 32: Fluxograma de classificação das Técnicas de Detecção de Ilhamento [59].

### 3.5.2- Técnicas Remotas de Detecção de Ilhamento

Em [7] é afirmado que as técnicas remotas mais populares são as técnicas baseadas em sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), técnicas baseadas em sistema PLCC (*Power Line Carrier Communication*) e a Rede de Comunicação entre Relés.

#### I- Técnica do Sistema Scada

A partir da ocorrência de um evento de ilhamento, o sistema SCADA identifica a área isolada, podendo ser acionado o esquema de teleproteção para, por exemplo, comandar o

desligamento de um gerador distribuído [60]. Na figura 33 é apresentado os elementos de um sistema SCADA.

Apesar de muito eficiente, a grande desvantagem dessa técnica é sua implantação, considerando seus elevados custos que podem se elevar de acordo com a complexidade do sistema [61].

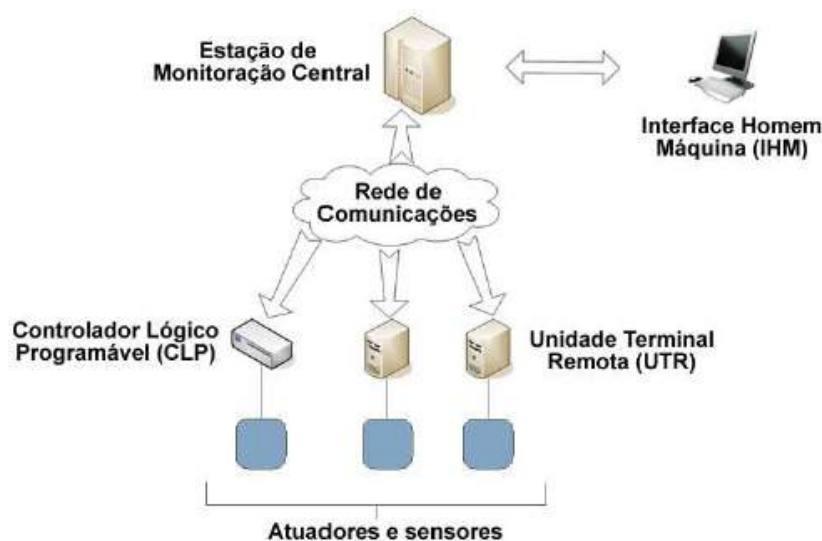


Figura 33: Elementos de um sistema de proteção SCADA [61].

## II- Técnica do Sistema PLCC (Power Line Carrier Communication)

Para geradores distribuídos essa é a técnica mais utilizada, sendo que um gerador de sinais é conectado ao secundário do transformador de uma subestação de uma concessionária. A Figura 34 mostra um sistema PLCC onde a GD está conectada à rede elétrica. O transmissor emite, continuamente, um sinal de baixa frequência (abaixo de 500Hz) através da rede elétrica para o receptor. O ilhamento é indicado quando o receptor deixa de receber sinais a partir do transmissor, e a ausência de sinal do transmissor é usado para indicar existência de ilhamento no sistema [58].

O sinal enviado percorre toda a rede elétrica e, quando algum gerador distribuído não recebe o sinal do gerador da subestação, o sistema entende como uma condição de ilhamento.

As vantagens das técnicas baseadas em sistema PLCC incluem a alta confiabilidade e a facilidade de implementação (uma vez que uma mudança topológica não influencia no seu

desempenho). Em contrapartida, os custos do transmissor e receptor, são as desvantagens deste sistema.

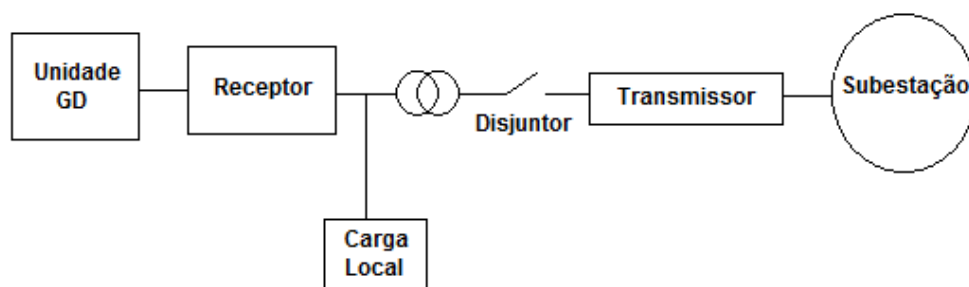


Figura 34: Sistema PLCC para detecção de ilhamento [62].

### III- Rede de Comunicação Entre Relés

As redes de comunicação podem ser implementadas utilizando portas RS232, RS485, PLCC, WAN (*Wide Area Network*) através de protocolo TCP/IP.

Os dispositivos utilizados em sistemas de proteção contra ilhamentos são interligados por redes de comunicação, uma vez que requerem a troca de informações para diminuir a possibilidade de falsa operação, aumentando a capacidade de detecção de distúrbios [63].

#### 3.5.3- Técnicas Locais de Detecção de Ilhamento

As técnicas locais, segundo [58], detectam o ilhamento por meio de medidas das grandezas de tensão, corrente ou uma outra variável disponível no ponto de instalação dos dispositivos de proteção. Essas técnicas podem ser ativas ou passivas e possuem característica de confiar nas informações e dados recebidos das unidades de GD.

Os dispositivos mais comuns para este propósito são os relés de proteção baseados em medidas de frequência e de tensão. São eles, os relés de sub/sobrefrequência, relé de taxa de variação de frequência e os relés de sub/sobretensão.

Neste caso, o funcionamento da proteção é baseado no fato de que a intensidade da variação de frequência elétrica está fortemente relacionada ao valor do desbalanço de potência ativa no subsistema ilhado [62].

## I- Técnica Ativa

Para a detecção de ilhamentos em sistemas de geração distribuída, as técnicas ativas são mais utilizadas, principalmente pelo recurso de medição de impedância. Um sinal de alta frequência, segundo [64] é injetado no sistema, realizando a medição da impedância no sistema.

Uma técnica ativa utilizada por [65] é realizada através da variação da tensão nominal e potência reativa entregue pelo gerador. Utilizada em geradores síncronos, são inseridas pequenas variações na tensão do gerador e então monitora-se a saída (potência reativa), se houver grandes variações da potência reativa o gerador estará operando de forma isolada.

Outra técnica utilizada é a detecção de ilhamento por adição de perturbações na saída da GD é mostrada no fluxograma da figura 35 [65].

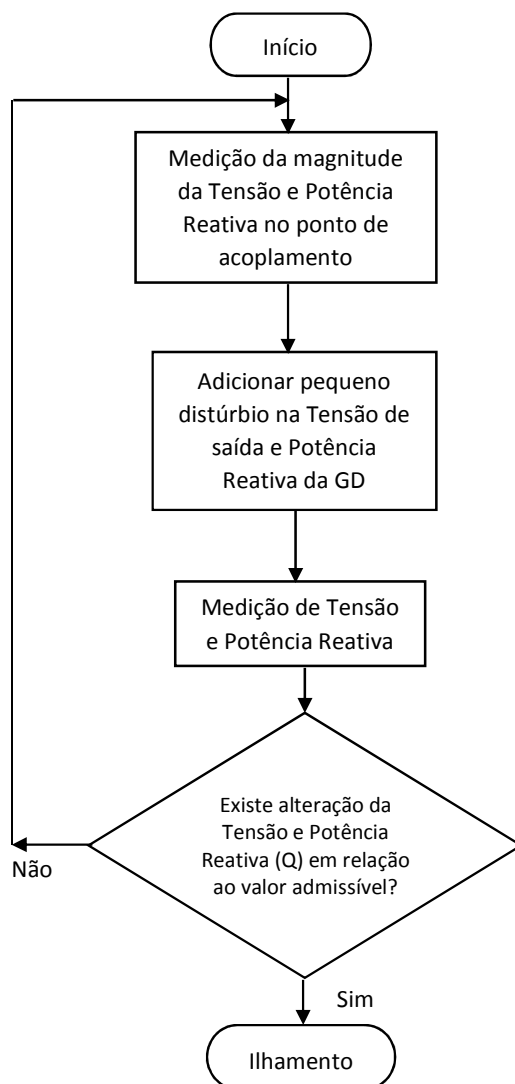


Figura 35: Fluxograma de detecção de ilhamento através de perturbações [65]. (traduzido)



Nesta técnica, durante intervalos regulares, perturbações ou distúrbios são adicionados à tensão de saída. Em seguida, é medida a tensão e potência reativa ( $Q$ ) através do ponto de acoplamento comum. Com a subestação conectada, estas perturbações não causam uma mudança significativa na tensão ou exportação da potência reativa no ponto de conexão. Caso exista uma grande alteração nestes parâmetros medidos, indica-se que a GD não está ligada à rede elétrica, e, portanto, conclui-se que existe um ilhamento [65].

Em ensaio realizado por [45], é apresentada a detecção ativa de ilhamento. Neste caso, praticamente não existe impacto sobre a segurança do sistema. Devido ao curto-circuito, uma queda de tensão acontece e com isso a frequência limite de 50,5 Hz no ponto  $V_{PM}$  é quase atingida. Acontece também um aumento da corrente, em função da queda de tensão, observado na figura 36.

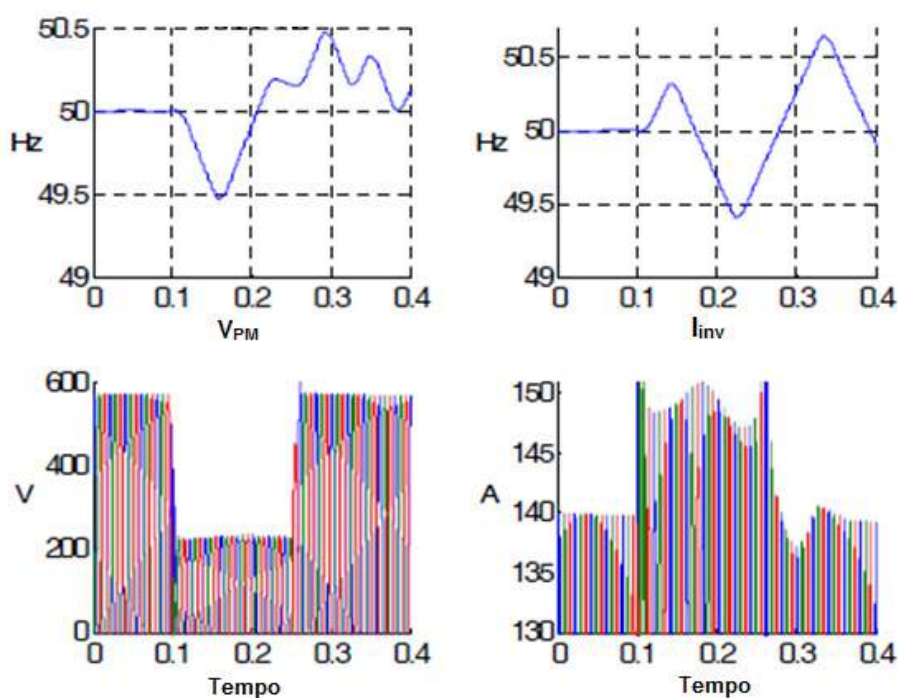


Figura 36: Detecção Ativa de ilhamento devido a curto-circuito [45].

## II- Técnica Passiva

Em [59] é mencionado que as técnicas passivas consistem na medição de grandezas elétricas para a detecção do ilhamento. Algumas técnicas passivas têm sido propostas baseadas na monitoração da magnitude da tensão, da taxa de variação da frequência, do deslocamento do

ângulo de fase e também na monitoração da variação de impedância. Na ocorrência de variações significativas dessas grandezas, identifica-se a presença do ilhamento. As principais grandezas controladas são tensão, corrente e potência. Em caso dessas grandezas monitoradas superarem um limite preestabelecido, o sistema é acionado notificando a ocorrência de um ilhamento.

Relata [58] que forças de detecção de ilhamento passiva podem ocasionar impactos sobre a QE, sem que exista a interferência de um dispositivo de detecção de ilhamento sobre outro, no caso de vários inversores injetarem distúrbios. Porém existem desvantagens que aumentam a busca por métodos de detecção mais confiáveis. Um modelo simplificado do sistema de distribuição de baixa tensão no estado ilhado e não ilhado pode ser observado na figura 37. No instante em que acontece a comutação e o dispositivo de distribuição é aberto e o inversor continua a operar, indica que está acontecendo o ilhamento.

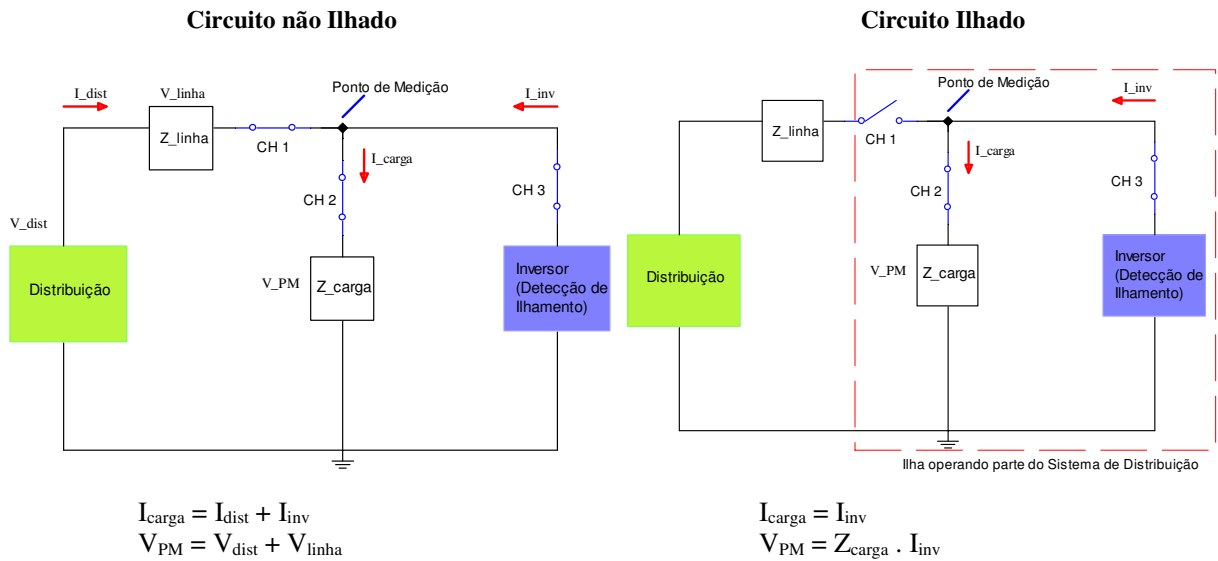


Figura 37: Modelo de Não Ilhamento e Circuito Ilhado [45].

Quando a medição da impedância ( $Z$ ) é utilizada em inversores ocorre uma combinação com uma perturbação da corrente de saída. Este método de detecção pode ser utilizado em aplicações passivas. A variação de tensão no ponto de medição ( $V_{PM}$ ) dividido pelo desvio da corrente de saída do inversor ( $I_{inv}$ ), durante um intervalo de tempo específico fornece a variação da impedância para um intervalo de tempo específico [45], de acordo com a equação 4.

$$\frac{dZ}{dt} = \left( \frac{dV_{PM}}{dI_{inv}} \right) \quad (4)$$

$Z$  = Impedância da carga

$V_{PM}$  = Tensão no ponto de medição

$I_{inv}$  = Corrente no inversor de frequência

No estado de não-ilhamento a tensão do ponto de medição ( $V_{MP}$ ) é mantida quase constante. Se o ilhamento acontece, este valor pode flutuar caso um estado de equilíbrio entre geração e carga não tenha ocorrido.

Novamente é apresentado um ensaio realizado por [45], onde é mostrado a detecção passiva de ilhamento, sem perturbação inicial da frequência. Devido ao distúrbio de curto-circuito acontece uma variação de frequência máxima no ponto  $V_{PM}$ , como mostrado na figura 38.

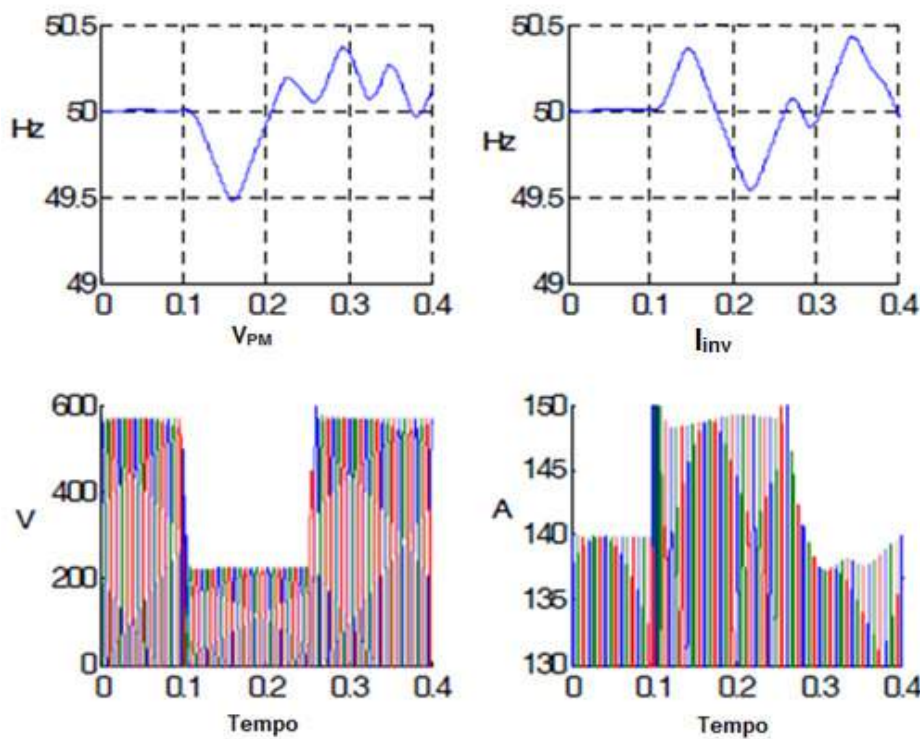


Figura 38: Detecção Passiva de ilhamento devido a curto-circuito [45].

### 3.6- SISTEMAS DE PROTEÇÃO E DETECÇÃO DE ILHAMENTOS

O desempenho dos sistemas de detecção de ilhamento podem ser classificados conforme os mesmos critérios dos dispositivos de proteção dos sistemas de potência. No sistema de proteção de alimentação do IEC (*International Electrotechnical Commission*), algumas condições são determinadas [66]:

- **Confiança de Proteção:** "A probabilidade de uma proteção não falhar na operação sob dadas condições para um determinado intervalo de tempo". A confiança na detecção de ilhamento é a capacidade de detectar todas as situações de ilha.
- **Segurança de Proteção:** "A probabilidade de não ter uma operação indesejada sob dadas condições para um determinado intervalo de tempo". Sua robustez e a capacidade de rejeição da detecção de ilhamento é semelhante à sua própria segurança. O dispositivo de detecção de ilhamento não deve detectar outros casos de ilhamento.
- **Confiabilidade de Proteção:** "A probabilidade de que uma proteção possa executar uma função requerida sob dadas condições para um determinado intervalo de tempo". Uma capacidade de detecção de ilhamento de tanto ser segura e confiável durante certas especificações (isto é, tempo máximo de desconexão).

As condições de proteção do sistema de energia devem ser utilizadas para todos métodos de detecção de ilhamento, conforme figura 39.

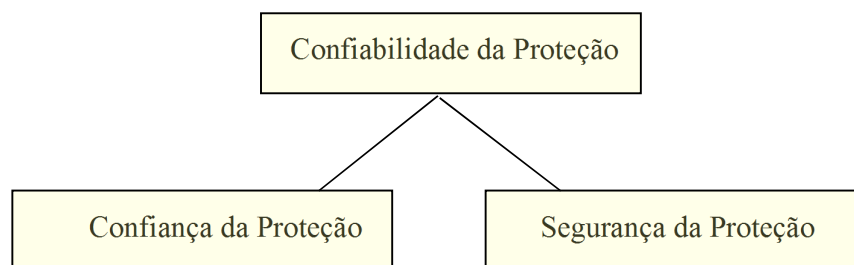


Figura 39: Condições de Confiabilidade da Proteção [7].

De acordo com [53], o sistema de energia elétrica não foi projetado para GD. No caso de apresentar unidades de geração no sistema de distribuição, operando em paralelo com esta

rede, haverá muitos impactos. Se o dispositivo de comutação entre as unidades de geração e o restante do sistema de energia é aberto, pode ocorrer o surgimento de uma ilha não intencional.

### 3.6.1- Elementos de Proteção Anti-Ilhamento

Geralmente uma rede de distribuição de energia possui proteção por dispositivos simples de proteção, tais como relés de sobrecorrente, religadores, seccionadores e fusíveis. Estas proteções sofrem alterações com a presença da GD, todos em operação paralela com o sistema de distribuição [65]. Desta forma, sempre após a ocorrência de um ilhamento deve-se novamente analisar o funcionamento destas proteções [65].

Desse modo, devem ser avaliadas as dimensões deste impacto e buscar soluções alternativas para o sistema de proteção de sobrecorrente existente, visando assegurar a segurança dos equipamentos e usuários da rede elétrica após a ocorrência do ilhamento. As medidas sugeridas devem atender às seguintes condições [22,67]:

- Segurança: o sistema de proteção não deve realizar uma falsa operação sob condições normais de operação, ou falhar no caso de faltas no sistema.
- Sensibilidade: a proteção deve ser suficientemente sensível a defeitos que possam ocorrer durante a operação do sistema. Por sensibilidade entende-se qual o menor valor da grandeza capaz de ativar o dispositivo de proteção.
- Economia: o sistema de proteção deve ter sua implantação viável economicamente, evitando-se um número excessivo de dispositivos de proteção.
- Seletividade: a proteção deve somente isolar parte do sistema atingida pelo defeito, mantendo a continuidade do serviço das demais partes do sistema.
- Rapidez: as sobrecorrentes geradas pelos curto-circuitos ou sobrecargas devem ser extintas no menor tempo possível, reduzindo a probabilidade de propagação dos defeitos.

### 3.6.2- Relé de Frequência

Elementos de proteção como os relés, assim como os demais elementos, evoluíram desde os modelos eletromecânicos, estáticos e microprocessados, de modo a garantir uma

melhor estimação da frequência e um monitoramento mais rápido e preciso do comportamento do sistema elétrico de potência frente aos possíveis distúrbios.

Trata-se de um dispositivo utilizado para a supervisão da frequência de um sistema elétrico de acordo com as oscilações de tensão e a proteção preventiva. Os relés de subfrequência são utilizados para efetuar a operação de rejeição de carga, separação das linhas de distribuição entre os centros de cargas.

Em meio às características de especificação dos relés de frequência, [67] destaca-se a restrição de tensão para a operação deste elemento. O motivo disto é que devem atuar para condição de sobre ou sub-carga e não devem atuar durante as perturbações que caracterizam uma falta no sistema elétrico. Quando ocorre um curto-circuito haverá variação na tensão, corrente, frequência etc. No entanto, os relés de tensão ou de corrente deverão atuar antes dos relés de frequência, caso contrário haverá rejeição ou restauração de carga indevida.

Como citado anteriormente, os tipos de relés de frequência existentes são os estáticos, os eletromecânicos e os digitais microprocessados. A seguir são apresentados os conceitos fundamentais destes elementos de proteção.

### **I- Relés de Frequência Eletromecânicos:**

Em [68], é citado que o princípio básico de operação deste dispositivo consiste no uso de um tambor ou copo de alumínio que se movimenta dentro do entreferro de um circuito magnético duplo (dois circuitos de bobinas separadas), as quais proporcionam um aumento do deslocamento angular entre os fluxos quando ocorre uma redução da frequência, fazendo com que o torque desenvolvido na unidade do copo feche os contatos. No século XIX, aconteceu a primeira base tecnológica eletromecânica aplicada ao projeto e construção de relés de proteção, sendo, portanto, a origem das demais tecnologias aplicadas aos sistemas proteção. Define-se este dispositivo como sendo aquele em que a operação lógica é produzida pelo movimento relativo de elementos mecânicos, em função da ação de uma grandeza elétrica nos circuitos de entrada do dispositivo [68].

Os relés de subfrequência eletromecânicos consistem de um tipo de “copo de indução”, caracterizando-se como um relé de alta velocidade. O torque ou conjugado produzido pelo relé eletromecânico é proporcional aos dois fluxos produzidos pelas bobinas e proporcional ao seno do ângulo entre estes dois fluxos. Portanto, na ocorrência de um decréscimo na frequência acontecerá um acréscimo no deslocamento angular, aumentando o torque produzido, e quanto

mais rápido for este decréscimo na frequência, menor será o tempo de fechamento dos contatos. Desta forma determina-se que o tempo de operação deste tipo de relé acontece em função da taxa de variação de frequência [69].

## II- Relés de Frequência Estáticos:

Para qualquer valor de frequência, existe um número específico de pulsos que deve ocorrer durante o período de um ciclo. Se o número de pulsos é menor que este número específico, isto significa que a frequência do sistema está acima do ajuste fixado. Caso contrário, a frequência estará abaixo do ajuste fixado.

Estes dispositivos empregam a técnicas de contagem digital para medição da frequência do sistema. Em sua maioria consiste de um oscilador de cristal controlado, altamente estável, que fornece pulsos de 2 MHz para um contador binário. O contador, juntamente com outros circuitos lógicos, determina a frequência do sistema pela contagem do número de pulsos de mesma frequência (2 MHz) que ocorreu durante um ciclo completo (um período) da tensão do sistema de potência.

Na figura 40 é apresentado o diagrama de blocos do princípio de funcionamento de um relé estático. Por razões de segurança, ao detectar um sinal de subfrequência, o relé verifica esta informação por três ciclos consecutivos antes de produzir um sinal de saída no relé [69].

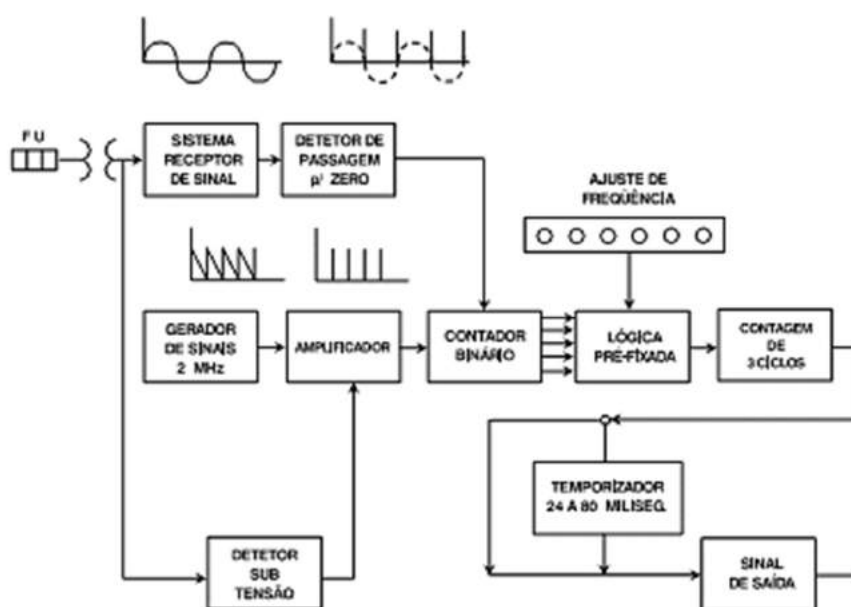


Figura 40: Diagrama de blocos de um relé de frequência tipo estático [68].

### 3.6.3- Relés Digitais Microprocessados:

A principal característica deste dispositivo baseia-se na possibilidade de implementação de algoritmos computações e utilização de operações matemáticas, as quais são utilizadas em diversos sistemas computadorizados.

Conforme destaca [67], foi a partir do desenvolvimento do hardware computacional e dos algoritmos para fins de proteção, a tecnologia digital, neste princípio de século se transformou na base de boa parte dos sistemas de uma subestação, atuando nas funções de medição, comunicação, proteção e controle. Sendo assim, o relé digital pode ser aplicado para desempenhar outras funções no ambiente de uma subestação. Na figura 41 é apresentado o aspecto construtivo geral dos relés digitais e o bloco de construção interna. No anexo VI é apresentado o manual com funções e especificações de um relé digital de proteção.

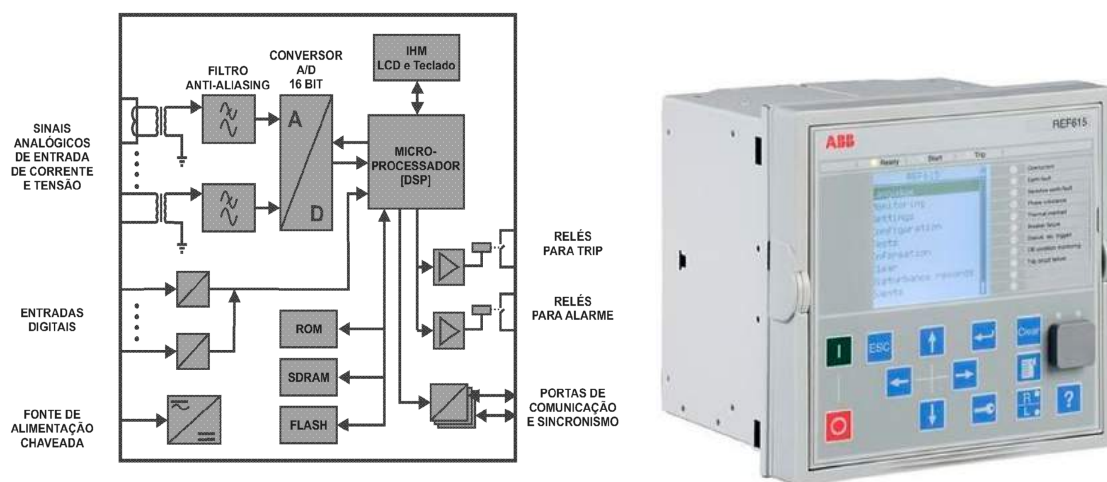


Figura 41: Arquitetura interna e externa de um relé digital [67].

Conforme destaca [5], do ponto de vista funcional, uma de suas principais características de proteção é a capacidade de execução de diversas tarefas no contexto do sistema elétrico de potência, além de seu propósito fundamental. Essa flexibilidade é obtida a partir de sua construção, que geralmente é constituída pelo conjunto hardware e software.

As informações de entrada e/ou saída são geradas por qualquer uma das vias de acesso do equipamento, entradas e/ou saídas digitais, interfaces de comunicação e valores analógicos de medida. Os dados estão disponíveis para uso por qualquer uma das funcionalidades do relé. Esse caráter multifuncional é sempre marcante, pois, é esta característica que distingue das



tecnologias prévias aplicadas na construção dos relés de proteção. A figura 42 mostra um bloco multifunção de um relé [5].

Ressalta [67], sobre as facilidades de operação e manutenção, que são proporcionadas pela utilização dos circuitos integrados. A unificação de diferentes funções de proteção, tais como a sobre ou subfrequência, o gerenciamento automático dos procedimentos de restauração e rejeição de cargas em um único aparelho, possibilitam o aumento da confiabilidade do sistema e proporcionam melhores padrões na QEE. Os procedimentos auxiliares de auto-checagem e os modernos algoritmos de avaliação incorporados aos relés atuais permitem uma grande precisão no cálculo da frequência, com aproximadamente  $\pm 0,5\%$  de erro. Além disso, eles possibilitam a manutenção preventiva do mesmo, evitando problemas mais graves no controle das proteções [67].

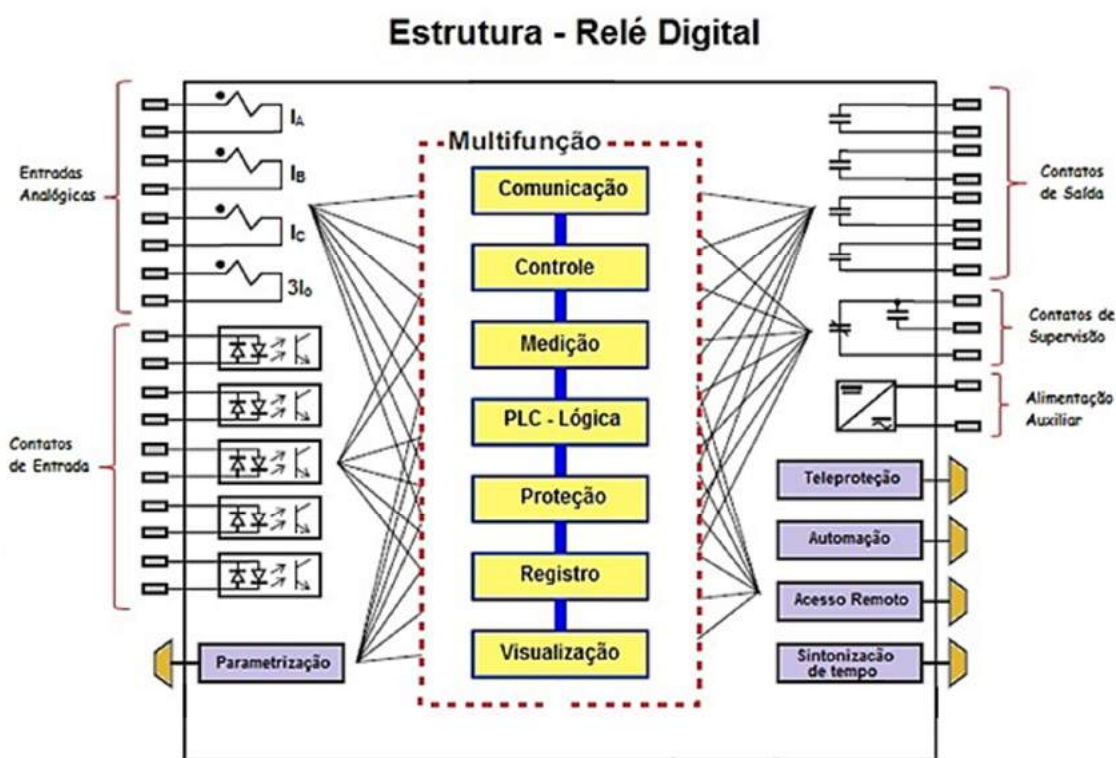


Figura 42: Bloco multifunção de um relé digital [68].

A partir de uma ampla expansão desta tecnologia, pode-se citar algumas vantagens e desvantagens destes elementos, mencionados por [68].

Principais características vantajosas:

- Auto-verificação e confiabilidade - condição de monitoramento contínuo dos subsistemas de hardware e software, podendo detectar imediatamente possíveis falhas.
- Integração de sistemas digitais - possibilitam uma maior integração entre seus componentes, permitindo uma maior flexibilidade e velocidade na obtenção das informações registradas pelos equipamentos.
- Flexibilidade funcional e adaptabilidade - uma das principais características dos relés digitais é a capacidade de alteração dos seus parâmetros de configuração de acordo com a topologia da rede.

Algumas desvantagens desse tipo de proteção:

- Sensibilidade a surtos - é necessária uma proteção especial contra surtos e interferências eletromagnéticas.
- Sensibilidade a temperatura - são sensíveis a altas temperaturas, necessitando, portanto, de dispositivos para monitorar esta condição.
- Software não portátil - os algoritmos desenvolvidos para um hardware específico, em geral, não são aplicáveis a outro.
- Foram adotados recentemente à proteção de sistemas elétricos de potência, estando em processo de assimilação desta base tecnológica, o que implica em mudança de paradigma e atualização de profissionais para esta área.

É considerável o aumento da utilização de sistemas eletrônicos em equipamentos e máquinas nas últimas décadas. Com o avanço tecnológico intensificou-se a preocupação com as variações de frequência no sistema, uma vez que estes modernos componentes são mais sensíveis a este tipo de perturbação.

A supervisão da frequência do sistema sob determinada condição de operação, frequentemente utiliza os relés de frequência digitais, que acionam os dispositivos de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede fora dos patamares aceitáveis do ponto de vista de operação normal do sistema elétrico [53].

Enfatiza [7], que o aprimoramento das técnicas utilizadas para uma melhor estimação da variação da frequência é primordial para o sistema elétrico de potência. Ligados à proteção contra a perda de sincronismo, priorizando a estabilidade do sistema elétrico, muitos algoritmos são implementados em relés digitais, como exemplo podemos citar, o método dos mínimos quadrados, a transformada rápida de Fourier - FFT, filtro de Kalman, filtros adaptativos,

transformada Wavelet etc. Essas técnicas e outras estão sendo utilizadas em diversas pesquisas para aperfeiçoar o desempenho dos relés digitais microprocessados no sistema elétrico de potência.

#### 3.6.4- Disjuntores:

Os alimentadores de distribuição devem ser protegidos na saída da subestação, realizada geralmente, por disjuntores trifásicos associados a relés de sobrecorrente.

São dispositivos de interrupção capazes de abrir e fechar um circuito em qualquer condição de trabalho, ou seja, em situações de faltas e situações normais de funcionamento. Geralmente possuem um tempo mínimo de operação de 5 ciclos, baseados na corrente de falta [70].

Na maioria dos casos, os controlados por relés são os preferidos, devido à sua maior flexibilidade.

Na figura 43 é apresentado um disjuntor de uso externo, fabricação da ABB.



Figura 43: Disjuntor isolado a vácuo para uso externo [71].

#### 3.6.5- Chaves-Fusíveis:

São elementos mais utilizados na proteção de redes de distribuição, em função de seu custo reduzido e desempenho satisfatório para um nível de proteção desejado. Tem como função abrir o circuito através do elo fusível, excluindo o arco gerado durante a destruição deste

elemento, mantendo as condições de circuito aberto com tensão nominal aplicada aos seus terminais, ou seja, sem arco através do elemento fusível [70].

Segundo [70], grande parte das chaves-fusíveis usadas em sistemas de distribuição opera com o princípio de expulsão, ou seja, possuem um tubo de confinamento do arco, com seu interior coberto por fibra desionizante e um elemento fusível. Na presença de uma falta, acontece o aquecimento da fibra interior até que o elemento fusível derreta, produzindo gases desionizantes que se acumulam no tubo. Desta forma, o arco é comprimido e expelido para fora do tubo, sendo extinto quando a corrente chega a zero.

Na figura 44 é mostrada uma chave fusível com seu cartucho e elos fusíveis.



Figura 44: Chave fusível, cartucho porta fusível e elos fusíveis [72].

### 3.7- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos vários trabalhos citados neste capítulo, os autores procuram apresentar como acontecem os problemas de ilhamento nas redes de distribuição de energia com a presença de unidades de GD. Os ilhamentos afetam drasticamente a qualidade de energia das redes de distribuição e por isso são apresentadas algumas soluções para evitar este tipo de situação.

São discutidos, por alguns autores os diversos métodos de detecção de ilhamentos, os mais vantajosos e os mais utilizados pelas concessionárias nos sistemas de distribuição. Assim como os métodos de detecção, também são apresentados os dispositivos de proteção mais utilizado contra os ilhamentos, instalados nos pontos de acoplamento comum (PAC) entre concessionária e gerador distribuído. Em muitos trabalhos a proteção adaptativa, utilizando

relés inteligentes dotadas de um sistema de comunicação, têm se mostrado como uma solução comum. No entanto, essas soluções envolvem implementação de novos recursos, inicialmente já existentes na rede de distribuição, sendo conveniente realizar um estudo de viabilidade técnico-financeira para a implantação de uma solução proposta.

Nos estudos, sempre se busca, também, mostrar as soluções para a questão dos impactos da GD sobre o sistema de proteção de sobrecorrente da rede de distribuição, analisando diferentes tipos de faltas em diferentes pontos do sistema e, com base nos resultados obtidos, propor soluções que possam possibilitar uma operação em ilha de modo seguro, realizando possíveis ajuste das proteções de sobrecorrente existentes na rede. Porém sempre tentando buscar a solução de viabilidade das unidades de GD e o não ilhamento na rede.

## CAPÍTULO IV

### A UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS

#### 4.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os tópicos integrantes deste capítulo abordarão, de forma conceitual, os princípios básicos da técnica de wavelet, trazendo uma descrição sobre wavelet contínua e discreta, a técnica de Análise Multiresolução (AMR) trabalhada de uma forma bastante prática, exemplos das famílias Wavelets e, para finalizar, algumas aplicações da Transformada Wavelet para a detecção de distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência.

##### 4.1.1- História da Transformada Wavelet

Historicamente falando, a análise wavelet é uma técnica recente. E entretanto, seus princípios matemáticos direcionam para o trabalho desenvolvido por Joseph Fourier no século XIX e, em seguida, já no século XX Jean Morlet que introduziu o termo “Wavelet”, tendo a base matemática de suas ideias formalizadas pelo físico teórico Alex Grossmann. Trata de uma análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência [73].

Destaca [9], que a expressão wavelet é bastante recente, sendo proposta pela primeira vez no ano de 1981. Entretanto, o seu desenvolvimento ocorreu no início do século XX. Desde então, os estudos sobre as utilizações, funcionalidades e vantagens das wavelets não cessaram.

A tese de doutorado escrita por Alfred Haar no ano de 1909, foi a primeira publicação que relata a transformada wavelet. Entretanto, somente no ano de 1981 é que o termo wavelet foi proposto pelo geofísico Jean Morlet.

A figura 45 apresenta um resumo temporal no desenvolvimento da wavelet [15].

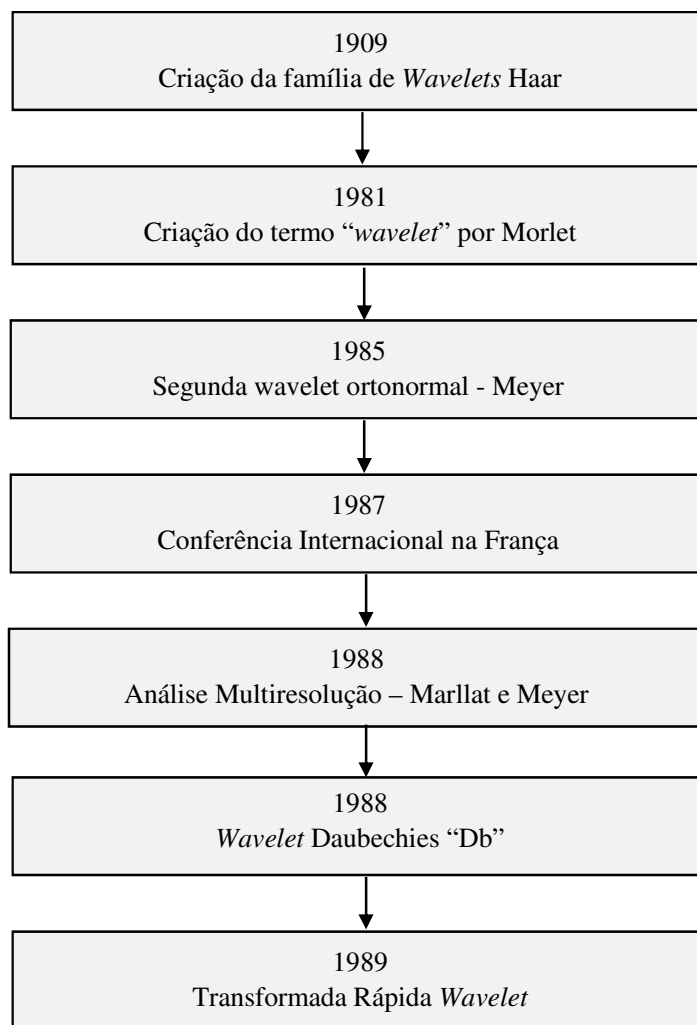


Figura 45: Resumo cronológico da Wavelet [15].

Em 1985, acontece a criação da segunda wavelet por Yves Meyer, denominada wavelet Meyer. Em 1987, numa conferência internacional ocorrida na França, diversas wavelets mães e aplicações foram apresentadas [7].

#### 4.2- CONCEITOS SOBRE TRANSFORMADA DE WAVELET

A Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta matemática para análise de sinais similar à Transformada de Fourier (TF). A TW decompõe o sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de uma única função. De maneira distinta da TF que

fornece uma representação global do sinal, a TW apresenta representações locais no domínio do tempo e da frequência de um dado sinal, sendo esta a grande vantagem do uso da TW [11, 74].

De acordo com os conceitos de (ARAÚJO, 2011):

*As wavelets são um produto da colaboração de várias áreas, desde a matemática e física puras, até engenharia e processamento de sinais. Várias pesquisas independentes nessas áreas buscavam objetivos semelhantes, apesar de utilizarem abordagens diferentes, buscavam novas formas de representar sinais no domínio tempo-frequência. As diversas linhas de pesquisa convergiram para um ponto no final da década de 80, sendo então formalizada a teoria de wavelets. A unificação de todos os pensamentos tornou-se um fator primordial para a subsequente popularidade das wavelets, impulsionando assim novas pesquisas na área [13].*

Ainda destaca [13], que a transformada wavelet concentra-se em pequenos intervalos de tempo, para componentes de alta frequência, e em longos intervalos de tempo, para componentes de baixa frequência. Com isso, ela aprimora a análise de sinais caracterizados por impulsos e oscilações localizadas, particularmente na presença da componente fundamental e dos componentes harmônicos de baixa ordem, superando as limitações dos métodos de Fourier pelo emprego de funções de análise, no tempo e na frequência.

Segundo [75], a transformada wavelet 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.

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. Esta faz o mapeamento de uma sequência de números em outra sequência de números.

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 Transformada de Fourier de Tempo Curto (*STFT - Short Time Fourier Transform*).



### 4.3- TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA (TWC)

A Transformada de Fourier (TF) é a ferramenta para análise de sinais mais conhecida, sendo que ela separa as informações contidas em um determinado sinal em diferentes frequências através de funções bases senoidais. A TF é uma técnica de transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. A TF ainda é muito utilizada para estudos de vários tipos de sinais, uma vez que o conteúdo de frequência é importantíssimo. A perda de informações referentes ao domínio do tempo quando o sinal é transformado para o domínio da frequência é uma desvantagem desta técnica. Quando o sinal não possui muitas variações no domínio do tempo, ou seja, o sinal é semi-estacionário, as informações perdidas na transformação do sinal utilizando a TF não representam perdas significativas. Entretanto, muitos sinais contêm características não estacionárias, conforme mostrado na figura 46 [7].



Figura 46: Sinal transformado do domínio do tempo para a frequência usando TF [75].

O pesquisador Dennis Gabor fez a adaptação da TF para analisar apenas uma pequena porção de tempo do sinal, dando origem a técnica STFT (Short Time Fourier Transform), que utiliza a transformada de Fourier dependente do tempo ou também dita como transformada janelada de Fourier contínua. Esta técnica faz o mapeamento de um sinal unidimensional em duas dimensões tempo e frequência. No entanto, utiliza uma forma de transformação muito limitada, uma vez que faz uso de uma “janela” de dados fixa, isto é, o conteúdo de informações do sinal, amostrado sequencialmente, é analisado em um intervalo fixo de seu espaço de domínio. Por esse motivo, conclui-se que a STFT possui uma precisão também limitada de suas informações, como mostrado na figura 47 [76,77].



Figura 47: Transformada Janelada de Fourier contínua - STFT [75].

Conforme descrito por [52], na Transformada Wavelet é apresentada uma técnica de “janelamento” variável. Este recurso da transformada permite o uso de uma janela de tempo maior para analisar informações de baixa frequência de forma mais precisa, e janelas pequenas para analisar informações de alta frequência, permitindo maior precisão nas análises. A figura 48 apresenta esta transformada.



Figura 48: Análise das baixas frequências, altas frequências e tempo pela TW [75].

A família das funções  $\psi(x)$ , chamadas “Wavelet mãe”, com escalas variáveis, são obtidas pela fixação de  $p \geq 0$  (fator de normalização) e para todo  $a \in \mathbb{R}$ ,  $a \neq 0$ , na equação (5) [9].

$$\psi_a(x) = |a|^{-p} \psi\left(\frac{x}{a}\right) \quad (5)$$

Para pequenas escalas (pequenos valores de  $a$ ),  $\psi_a(x)$  possui alta frequência, e para grandes valores de  $a$ ,  $\psi_a(x)$  possui baixa frequência.

Com o objetivo de localizar no tempo as funções  $\psi_a(x)$ , introduzimos a condição do fator  $b \in \mathbb{R}$ . Sendo assim tem-se a expressão (6) [9]:

$$\psi_{a,b}(x) = \psi_a(x-b) = |a|^{-p} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (6)$$

Representando matematicamente, a Transformada Wavelet Contínua (TWC) de um dado sinal  $x(t)$  em relação à wavelet-mãe  $\psi(t)$  é definida pela expressão (7) [9]:

$$TWC(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (7)$$

onde  $a$  é o fator de dilatação ou escala, sendo  $b$  é o fator de translação.

Um coeficiente da TW, em uma determinada escala e translação  $TWC(a,b)$ , representa a perfeita interação entre o sinal original  $x(t)$  e a wavelet-mãe escalada e transladada. Dessa forma, o conjunto de todos os coeficientes  $TWC(a,b)$ , associados a um sinal particular, é a representação wavelet do sinal original  $x(t)$  em relação à wavelet-mãe  $\psi(t)$ . A figura 49 ilustra este caso.

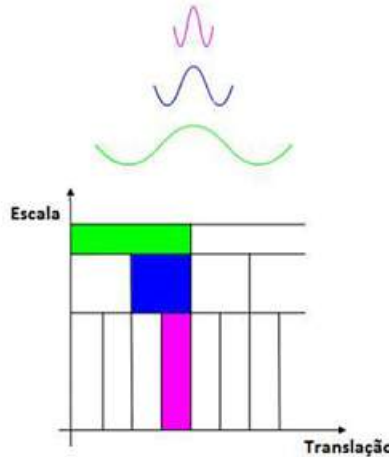


Figura 49: Gráfico Translação x Escala com janelas variáveis [7].

A função da wavelet-mãe é uma função de janela variável percorrendo o sinal. O fator de escala  $a$  e o tamanho da função janelada são interdependentes entre si e desse fato resulta

que menores escalas implicam em menores janelas. Com isso, pode-se analisar as componentes de bandas estreitas de frequência de um sinal com um pequeno fator de escala, e componentes de bandas largas de frequência com fatores de escala maiores, o que permite analisar altas e baixas frequências tendo todas as características de um sinal [52,75]. Esta análise é mostrada na figura 50.

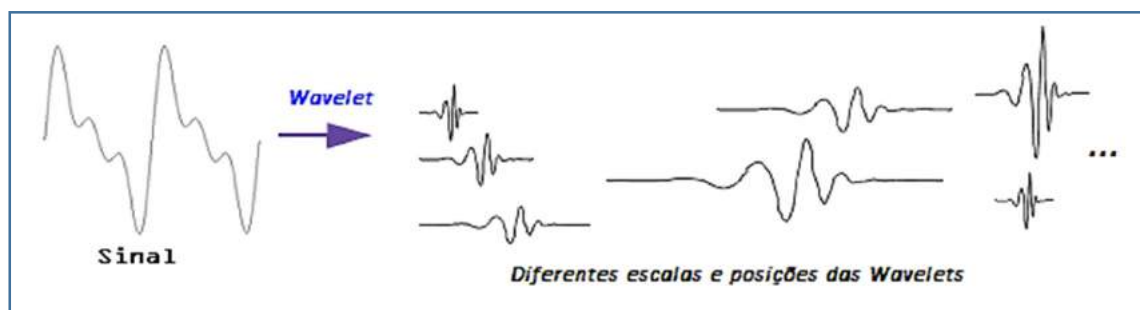


Figura 50: Sinal da TW em diferentes escalas e posições [75].

#### 4.3.1- Escalamento da Função Wavelet

Segundo [52], efetuar o escalamento de uma Wavelet significa realizar a dilatação ou contração desta função, sendo seus efeitos representados pelo fator de escala que é usualmente denotado pela letra  $a$ .

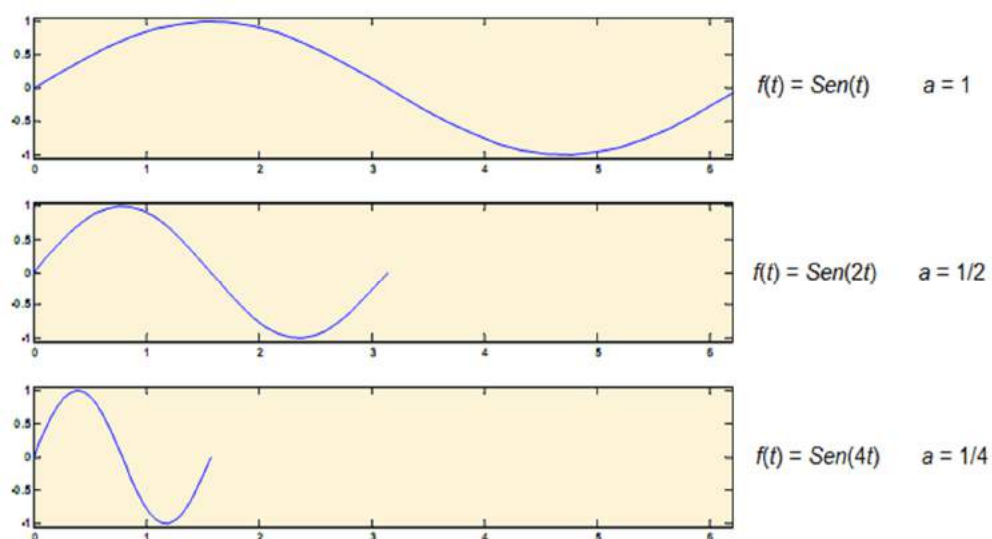


Figura 51: Fator de escala aplicado em uma função seno [9].

Nos segmentos de uma senóide, por exemplo, o efeito do fator de escala é bem aparente, como mostrado na figura 51, onde a diminuição do fator de escala “ $a$ ” realiza a contração do gráfico desta função.

O fator de escala funciona exatamente da mesma forma com a Wavelet. Quanto menor o fator de escala, mais “contraída” será o sinal da Wavelet. A figura 52 mostra como o fator de escala atua com as funções Wavelets.

Para o segmento  $\sin(\omega t)$  da senóide, existe a relação inversa do fator de escala  $a$  está com a frequência em radianos  $\omega$ . Ainda na figura 52, na análise Wavelet a escala é relacionada com a frequência do sinal. Esta análise mostra a seguinte correspondência:

- **Baixa escala  $a$**   $\rightarrow$  Wavelet contraída  $\rightarrow$  detalhes mudam rapidamente  $\rightarrow$  alta frequência.
- **Alta escala  $a$**   $\rightarrow$  Wavelet dilatada  $\rightarrow$  detalhes mudam vagarosamente  $\rightarrow$  baixa frequência.

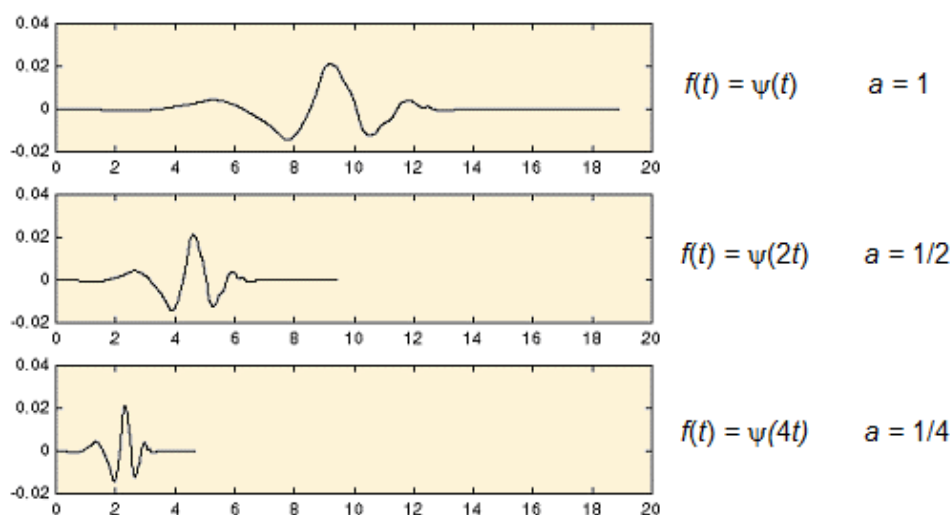


Figura 52: Fator de escala aplicado em uma função Wavelet [9].

#### 4.3.2- Transladar uma Função Wavelet

Em [52] é relatado que a realização da translação de uma Wavelet significa atrasá-la ou adiantá-la em relação ao eixo das abscissas. Matematicamente escrevemos  $f(x-k)$  como um atraso na função  $f$  de um fator  $k$ , como pode ser visto abaixo na figura 53.

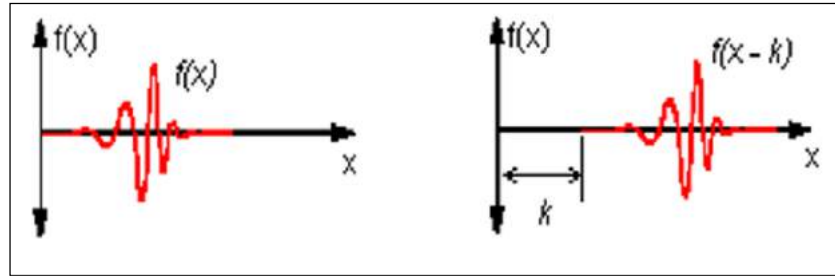


Figura 53: Aplicação da translação em uma Wavelet [52].

#### 4.4- TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA (TWD)

A Transformada Wavelet Discreta consiste, de um modo mais amplo, na realização de subamostragens do sinal de entrada através de filtros digitais. Esses filtros digitais são compostos por coeficientes  $h_n$  que correspondem ao filtro passa-alta e pelos  $g_n$  correspondentes ao filtro passa-baixa [7].

Com os filtros  $h$  e  $g$  é possível então realizar os cálculos para encontrar os coeficientes de aproximação e detalhamento, através da expressão (8) [7]:

$$\begin{bmatrix} ca(0) \\ cd(0) \\ ca(1) \\ cd(1) \\ \vdots \\ ca(n/2-1) \\ cd(n/2-1) \end{bmatrix} = [W] \cdot \begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ s(2) \\ s(3) \\ s(4) \\ \vdots \\ s(n-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

O coeficiente de aproximação é denotado por  $ca$  e o coeficiente de detalhamento é denotado por  $cd$ , sendo que  $s$  representa o sinal de entrada. A matriz  $W$  é representada pela expressão (9), a seguir:

$$W = \begin{bmatrix} h(0) & h(1) & h(2) & h(3) & \dots & h(l) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g(0) & g(1) & g(2) & g(3) & \dots & g(l) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & h(0) & h(1) & \dots & h(l-2) & h(l-1) & h(l) & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & g(0) & g(1) & \dots & g(l-2) & g(l-1) & g(l) & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(l-1) & h(l) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(0) & h(1) & \dots & h(l-2) \\ g(l-1) & g(l) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(0) & g(1) & \dots & g(l-2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Esses coeficientes (*ca* e *cd*) possuem, cada um, metade da banda de frequência do sinal que foi submetido à TWD. O coeficiente de aproximação fica com a metade inferior da banda e o coeficiente de detalhamento com a metade superior, sendo que cada um deles poderá sofrer novamente a transformada *wavelet* recursivamente, conforme a necessidade.

Na figura 54 é mostrado o processo de decomposição do sinal  $x$ , com frequência de amostragem  $f_s$ , utilizando apenas um estágio da TWD. Os blocos  $g$  e  $h$  representam os filtros passa-baixa e passa-alta, enquanto que os demais blocos representam a operação de subamostragem por dois [21].

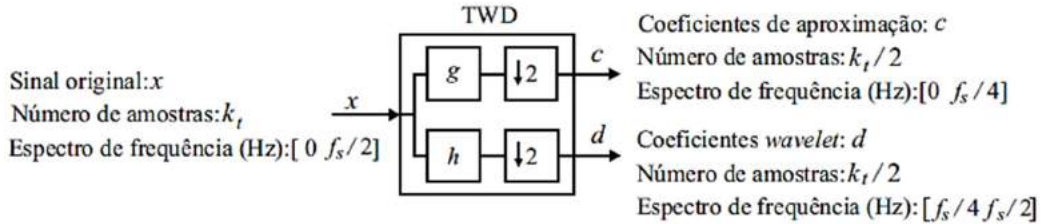


Figura 54: Diagrama de blocos do primeiro estágio da TWD [21].

De acordo com [21], para se obter a Transformada Wavelet Discreta utiliza-se dois métodos: a aplicação da TWC com parâmetros de escala e translação discretos, e a técnica de multiresolução.

Para o cálculo da Transformada Wavelet Discreta (TWD) a partir do conceito de TWC,  $a$  e  $b$  da TWC serão restritos somente a valores discretos. A discretização do parâmetro de dilatação se mostra natural, uma vez que se pode definir  $a = a_0^m$ , onde  $m \in \mathbb{Z}$ , e o passo de dilatação  $a_0 \neq 1$  é fixado. É assumido também  $a_0 > 1$  para uma maior facilidade [52].

Inicialmente deve ser observado que é necessário se obter uma translação no domínio do tempo de forma que, quando for amostrada a função  $f(x)$  no domínio da TW para os parâmetros  $a$  e  $b$ , pode-se reconstruir a função  $f(x)$  a partir da função  $TWD_{(a,b)}(f)$ , que é a Transformada Wavelet Discreta da função  $f(x)$ , com a menor redundância possível. Como a largura da Wavelet muda com a mudança da escala, precisa-se correlacionar as discretizações dos fatores  $a$  e  $b$ .

Para a correta obtenção da relação entre o fator de escala e a discretização no tempo, observa-se uma importante propriedade das Wavelets que é a invariância sob mudança de escala (fator  $a$ ). Isto significa que ao mudar a escala  $a$  da função  $f$  e ao mesmo tempo, mudar a escala do espaço de variação da função pelo mesmo fator, o formato da Wavelet não sofre alteração.

A expressão (10) define a forma de se implementar a Transformada Wavelet Discreta (TWD).

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (10)$$

Onde,  $\psi$  é a Wavelet mãe  $x(n)$ , já o sinal contínuo e os parâmetros  $a$  e  $b$  relativos a função TWC, são funções dos parâmetros inteiros  $m$ , isto é,  $a = a_0^m$  e  $b = nb_0 a_0^m$

Tais parâmetros são utilizados para gerar a família das funções Wavelets e as Wavelets filhas. A constante  $k$  é uma variável inteira que se refere a um número particular de amostras de um determinado sinal de entrada. O parâmetro de escala  $a$  permite o aumento da escala geométrica, isto é,  $1, 1/a_0, 1/a_0^2, 1/a_0^3$  e sucessivamente.

A saída da TWD pode ser representada em um espaço bidimensional de maneira semelhante à da Transformada Discreta de Fourier Janelada, mas com divisões muito diferentes no tempo e na frequência. A análise da TWD produz bandas de frequência de tempo retangulares, as quais são estreitas nas componentes de alta frequência e largas nas componentes de baixa frequência [52, 75].

#### 4.5- TÉCNICA DE ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO - AMR



Para a execução da técnica de Análise Multiresolução (AMR) de uma forma bastante prática, o processo de filtragem é o mais utilizado. Este processo baseia-se na filtragem de um sinal a ser analisado através de filtros passa alta e passa baixa, fornecendo versões do sinal original relativas aos coeficientes de funções Wavelets e funções escala, respectivamente.

O resultado da mudança de escala de um sinal pode ser melhor interpretado usando-se o conceito de resolução, isto é conseguido utilizando filtros. O cálculo da TWD, através do uso de filtros, é a forma mais eficiente de aplicação da transformada Wavelet [78].

Ainda, de acordo com [78], levando-se em consideração a Transformada Wavelet em suas formas Contínua e Discreta, usualmente se fala em **aproximações e detalhes**. As aproximações são as altas escalas, isto é, as componentes de **baixa frequência do sinal**. Os detalhes são as baixas escalas, ou seja, as componentes de **alta frequência do sinal**. O processo de filtragem é mostrado na figura 55 de uma forma simplificada, considerando-se apenas o primeiro nível de filtro.

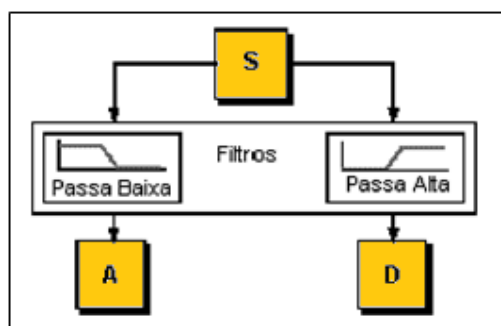


Figura 55: Processo de filtragem de um sinal [78].

Segundo [77], o sinal original  $S$ , passa através de dois filtros complementares que fornecem como saída dois sinais. Um operador “downsampling” é utilizado para diminuir o número de amostras. Desta forma considera-se dados intercalados, ou seja, considera-se o primeiro dado, rejeita-se o segundo, e assim por diante. É necessário o uso deste operador no caso de se utilizar um sinal digital real.

Sem o operador “downsampling” tem-se duas vezes mais a quantidade de dados em relação aos dados iniciais. No caso do sinal original  $S$  possuir 1000 amostras de dados, as versões de aproximação ( $A$ ) e de detalhes ( $D$ ) do sinal original possuirão 1000 amostras cada um, totalizando 2000 amostras. Na figura 56 é apresentado o processo de filtragem com o

operador “downsampling” e sem este estágio de diminuição do número de amostras. Além disso também inclui os coeficientes  $cD$  e  $cA$  referentes a TWD.

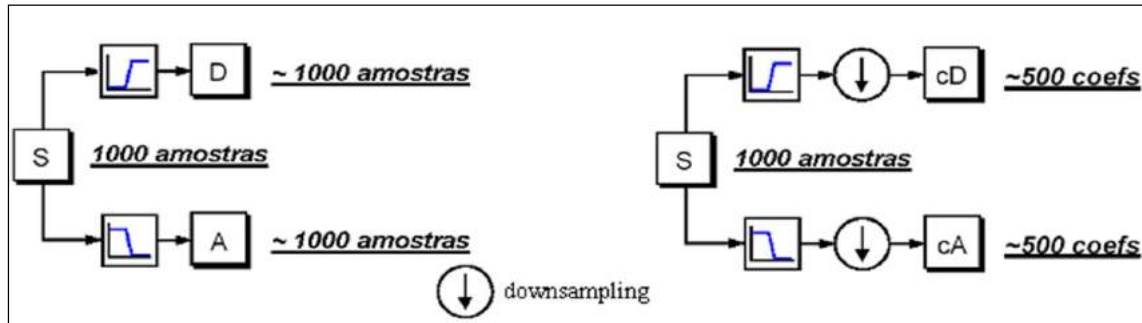


Figura 56: Diminuição do número de amostras do sinal com operador downsampling [77].

Com o intuito de se obter uma melhor verificação deste processo, é apresentado um exemplo com desenvolvimento da TWD de um sinal. O sinal utilizado para esta análise consiste em uma senóide com ruído de alta frequência sendo adicionado, como mostra a figura 57.

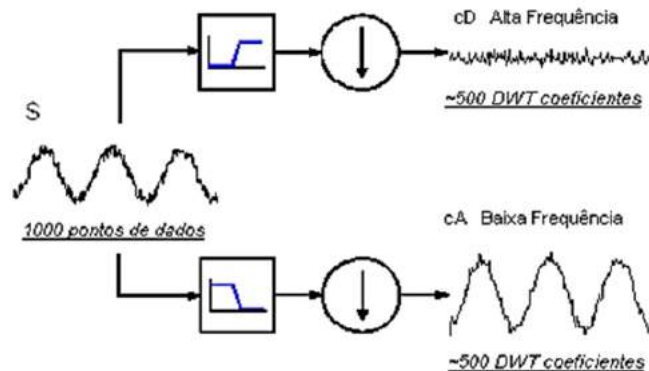


Figura 57: Filtragem de um sinal senoidal ruidoso com operador downsampling [77].

Existindo a presença deste operador surgem os coeficientes  $cD$  e  $cA$ . O coeficiente de detalhe  $cD$ , consiste principalmente do ruído de alta frequência, enquanto que os coeficientes  $cA$  contém muito menos ruído que o sinal original.

O processo de decomposição do sinal em suas sub-bandas (filtragem, passa alta e passa baixa) é um processo iterativo com sucessivas decomposições nos coeficientes de aproximação.

A partir da obtenção da árvore de decomposição da wavelet em sub-bandas que pode ser vista como uma estrutura de banco de filtros (Filtros de Quadratura - *Quadrature Filter* (QF)) [73]. A figura 58 mostra a estrutura.

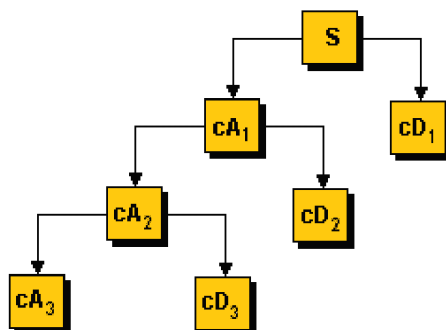


Figura 58: Processo sucessivo de decomposição de um sinal em AMR [77].

Um sinal  $S$  de referência é filtrado, gerando os coeficientes de Amostragens ( $cA$ ) e de Detalhes ( $cD$ ). O primeiro nível de filtragem gera os coeficientes  $cA_1$  e  $cD_1$ . A seguir uma nova filtragem acontece, gerando os coeficientes  $cA_2$  e  $cD_2$ . Desta forma o processo de decomposição do sinal continua acontecendo, de acordo com a necessidade.

Na árvore de decomposição em coeficientes Wavelets, mostrada na figura 59, mostra os níveis da decomposição AMR a respeito da análise de sinais através de filtragem.

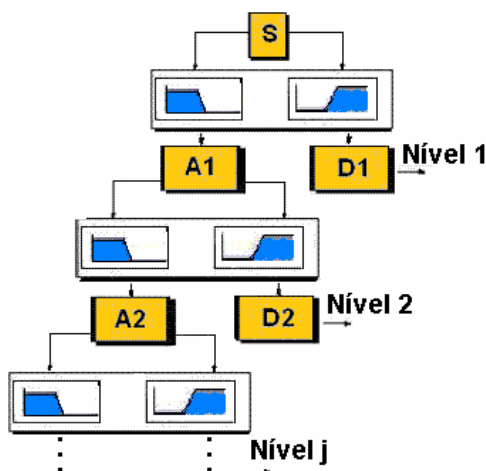


Figura 59: Decomposição sucessiva de um sinal [75].

Teoricamente, em se tratando de um processo iterativo, pode ser decomposto indefinidamente. Na verdade, a decomposição pode proceder somente até que o detalhe

individual consistir em somente uma amostra ou pixel. Na prática, selecionamos 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 [13].

É necessário a aplicação de uma função de escalonamento  $\Phi(t)$  no sinal para que a decomposição em coeficientes Wavelets seja possível. Em [73] é descrita toda a funcionalidade deste escalonamento, baseada em equações.

Tal função de escalonamento deve ser contínua, geralmente real e ainda satisfazer a condição de admissibilidade, de acordo com a equação (11).

$$\int \Phi(t).dt = 1 \quad (11)$$

A função de escalonamento  $\Phi(t)$  é deslocada em valores discretos para construção da base de funções em cada nível de resolução e é dilatada por um fator de escala didática ( $2^n$ ), assim tem-se a expressão (12):

$$\Phi(t) = 2 \cdot \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_d(n) \cdot \Phi(2t - n) \quad (12)$$

Onde  $\Phi(t)$  é a função de escalonamento com os fatores inteiros de escala ( $n$ ) e  $h_d(n)$  representa os coeficientes do filtro passa-baixa que deve satisfazer a equação (13).

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} h_d(n) = 1 \quad (13)$$

Para calcular a wavelet através da AMR, a equação (14) abaixo mostra o processo de cálculo:

$$\psi(t) = 2 \cdot \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_d(n) \cdot \Phi(2t - n) \quad (14)$$

Onde,  $\psi(t)$  é a wavelet mãe,  $g_d(n)$  são os coeficientes do filtro passa- alta,  $\Phi(2t - n)$  é a função de escalonamento e  $n$  indica a quantidade de valores positivos discretos da escala. Com

esta equação, os coeficientes de aproximação e detalhe, gerados pela aplicação dos filtros podem ser calculados como mostram as equações (15) e (16).

$$cA_j(n) = \sum_s f(s) h_d(2k - s) \quad (15)$$

$$cD_j(n) = \sum_s f(s) g_d(2k - s) \quad (16)$$

Sendo,  $f(s)$  o sinal,  $h_d$  e  $g_d$  são os filtros de meia banda,  $j$  é o nível de decomposição,  $cA_j$  e  $cD_j$  são os coeficientes da DWT (aproximação e detalhe) e  $s$  é fator discreto da análise (passo de cada filtro).

Na sequência tem-se uma modificação realizada nas duas equações citadas anteriormente, utilizando algoritmos recursivos para qualquer nível de dilatação é possível obter uma cobertura aproximada do espectro de frequência do sinal de entrada [73].

$$cA_{j-1}(n) = \sum_s cA_j(s) h_d(2k - s) \quad (17)$$

$$cD_{j-1}(n) = \sum_s cD_j(s) g_d(2k - s) \quad (18)$$

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, considerando o propósito desejado.

Geralmente as famílias de wavelets mais utilizadas para processamento de sinais são as wavelets Daubechies (db), Morlets, Coiflets (coif) e Symlets (sym). Estas wavelets exibem diferentes atributos e critérios de performance quando utilizadas em aplicações específicas, tais como: detecção de transitórios, compressão de sinais e filtragem de ruído [73].

A etapa seguinte é saber como os **detalhes e aproximações** obtidos através da TWD, podem ser reagrupadas para montar o sinal original, sem perder informações. Esta manipulação que efetua a reconstrução do sinal é chamada de Transformada Wavelet Discreta Inversa (TWDI). Para reconstruir um sinal, se faz a partir dos coeficientes Wavelets, como ilustrado na figura 60 [75].

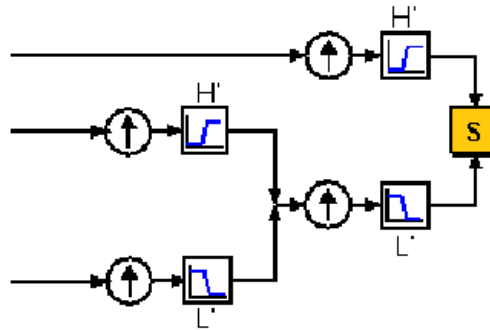


Figura 60: Processo de reconstrução de um sinal filtrado [75].

Aumentar o número de amostras é o processo de elevar o número de componentes do sinal pela inserção de zeros entre as amostras. A filtragem para a reconstrução do sinal também merece algumas considerações, devido ao fato de a escolha do filtro ser crucial para uma perfeita reconstrução do sinal original.

A análise Wavelet envolve filtragem e diminuição do número de amostras, enquanto que a reconstrução Wavelet consiste em aumentar o número de amostras na filtragem. O processo de diminuição do número de amostras do sinal introduz distorções que podem ser canceladas pela escolha correta do filtro de reconstrução. Sendo uma descoberta feita pelo trabalho de Ingrid Daubechies como descrito em [77]. Este processo está sendo mostrado na figura 61.

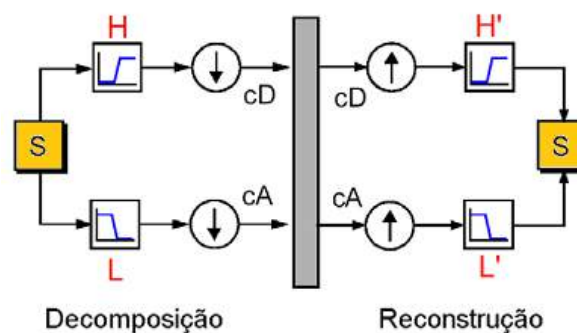


Figura 61: Decomposição e reconstrução de um sinal Ingrid Daubechies [77].

A reconstrução das aproximações e detalhes em si, a partir dos vetores de coeficientes, pode ser observado na figura 62.

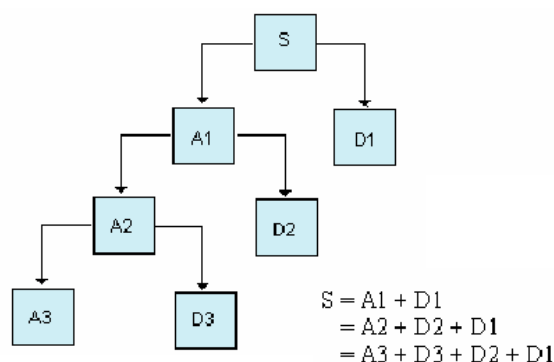


Figura 62: Sinal reconstruído a partir de seus coeficientes [77].

Os vetores dos coeficientes  $cA1$  e  $cD1$ , por serem produzidos pela diminuição do número de amostras, suas dimensões são somente a metade da dimensão do sinal original (distorção *aliasing*). Assim, não podem ser combinados diretamente para reproduzir o sinal original.

A reconstrução do sinal de aproximação  $A1$  através 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 mostrado na figura 62. Os detalhes e aproximações reconstruídos são verdadeiramente constituintes dos sinais originais. Encontram-se isto quando combinamos  $A1 + D1 = S$ . 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 [11,77].

#### 4.6- FAMÍLIAS WAVELETS

Dentre as diversas famílias de wavelets mãe, qualquer dessas funções podem ser eleitas para a análise do sinal. A seguir são apresentadas algumas wavelets com a finalidade de ilustrar a variedade dos formatos de algumas famílias de wavelets, sem mostrar detalhes desta função. O manual do usuário Matlab Wavelet Toolbox foi utilizado como referência para os modelos que serão mostrados [77]. O anexo IV apresenta uma tabela com as famílias Wavelets, conforme manual.

As famílias das funções são geralmente representadas pela abreviação do pesquisador que as desenvolveu (“coif” para Coifman ou “db” para Daubechies) ou de alguma denominação

dada (“sym” para Symlets), seguido por um número que costuma representar o nível de filtragem da função apresentada. Segundo [21] um dos fatores que impulsionou a utilização da teoria de wavelets foram os estudos que introduziram funções ou famílias de funções apropriadas para serem utilizadas como wavelets mãe.

Observa-se que praticamente todas as funções possuem a característica de decair rapidamente para zero. As wavelets Morlet e “chapéu mexicano” não possuem escalonadoras e são simétricas. A wavelet Haar é a única função descontínua, com três pontos de descontinuidade. A wavelet coif2 exibe alguns pontos angulares. As wavelets db6 e sym6 são bastante suaves. Há diferentes tipos de famílias de funções wavelet, cujas características variam de acordo com diversos critérios.

Um dos aspectos relevantes é o comprimento (também chamado de “suporte”) das funções wavelet escalonadora e também a simetria, especialmente em aplicações como processamento de imagens, para as quais é desejável evitar a perda de fase do sinal analisado. O número que costuma acompanhar a designação compacta de uma wavelet (como em “db6” por exemplo) corresponde ao número de momentos nulos “vanishing moments” da função. Esta propriedade é especialmente importante para aplicações de compressão de sinais, bem como de supressão de sinais. Outra propriedade importante é a regularidade, que pode ser inclusive quantificada [21].

Dentre as diversas famílias existentes, são apresentadas as principais e mais utilizadas para análises de sinais:

- **Wavelet de Coiflet**

Estas wavelets foram definidas por I. Daubechies e R. Coifman, pesquisadores na área de Teoria Wavelet, em 1989. As coiflets, figura 63, foram construídas para tentar manter uma semelhança maior entre o sinal original e o sinal transformado. As wavelet mães da família coiflets são denominadas coifN, onde N é a ordem do nível de filtragem do sinal. Porém alguns autores usam 2N no lugar de N.

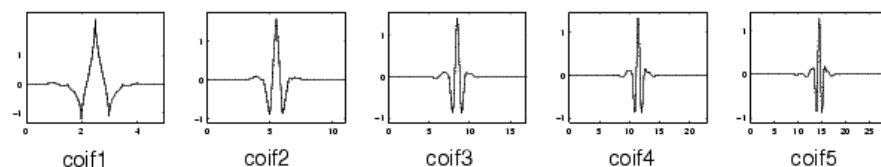


Figura 63: Wavelet mãe Coiflet [21].



- **Wavelet de Haar**

Uma propriedade da Wavelet de Haar é que ela tem suporte compacto, contudo não é continuamente diferenciável, o que de certa forma limita suas aplicações. Possui os mais simples coeficientes no espaço  $L^2(\mathbb{R})$ , mostrada na figura 64.

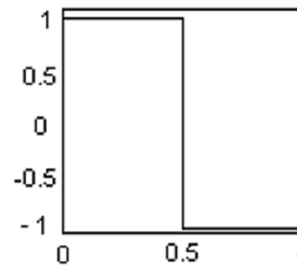


Figura 64: Wavelet mãe Haar [21].

- **Wavelet de Daubechies**

A pesquisadora Ingrid Daubechies, criou o que é chamado de “wavelet ortonormal com suporte compacto”. Os nomes das wavelets da família Daubechies são escritos por dbN, onde N é a ordem da wavelet, e db faz referência ao sobrenome da autora. Na figura 65 é mostrado alguns modelos de funções wavelet da família Daubechies. Pode-se perceber que conforme a ordem da wavelet mãe aumenta, seu suporte compacto também sofre um aumento significativo.

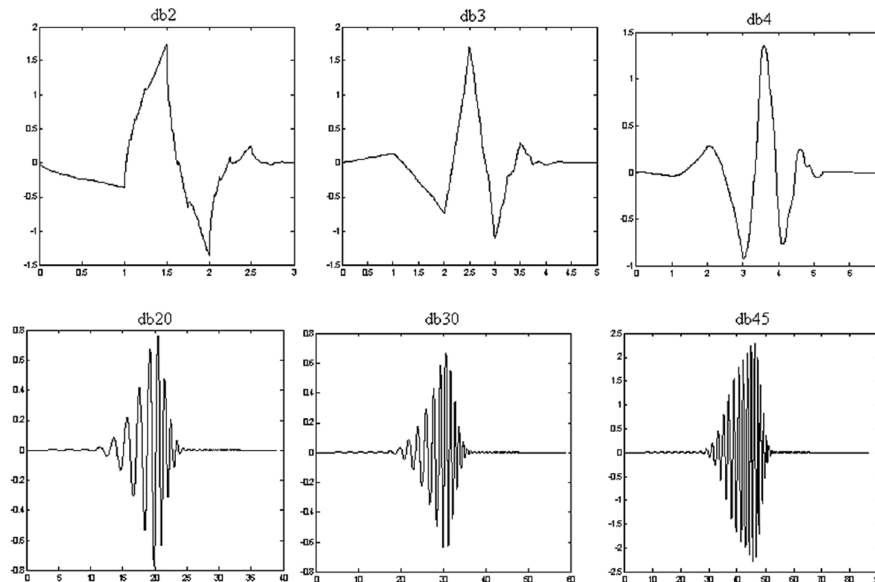


Figura 65: Wavelet mãe Daubechie [74].

- **Wavelet de Symlet**

A wavelet mãe da família Symlet apresenta-se em vários modelos, variando da sym2 à sym45. Na figura 66 apresenta-se alguns destes modelos. Esta família apresenta algumas características gerais, tais como: possuir suporte compacto com menor número de assimetria e maior número de decaimento para uma largura dada em relação à família Daubechie.

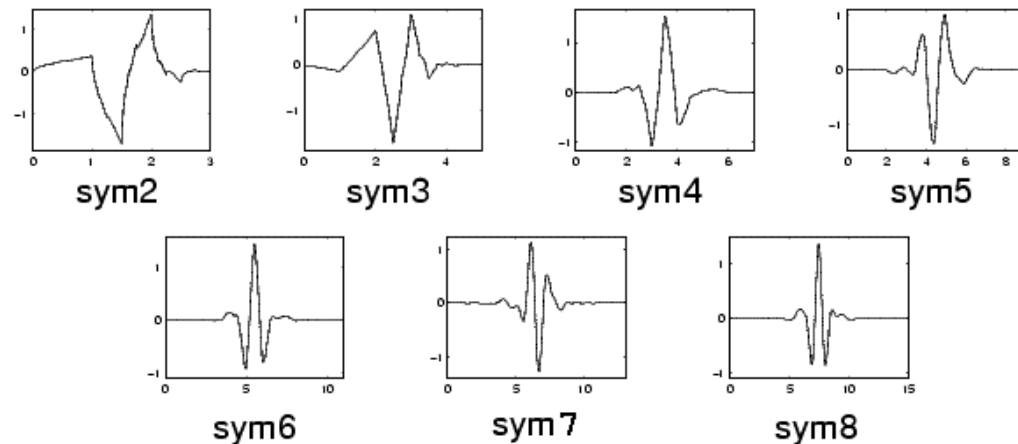


Figura 66: Wavelet mãe Symlet [21].

Sendo uma das wavelet referência nos estudos de sinais elétricos, esta wavelet mãe é capaz de detectar e localizar no tempo os diversos distúrbios que afetam a QEE. Outro motivo para escolha desta wavelet mãe, é que geralmente wavelets mais suaves indicam melhor resolução em frequência do que outras que possuem variações mais bruscas, ou com muita descontinuidade, como a wavelet de Haar.

- **Wavelet Biortogonal**

Uma característica da família de wavelet biortogonal é apresentar a propriedade de fase linear, a qual é necessária para a reconstrução do sinal. Utiliza duas wavelets, uma para a decomposição e outra para a reconstrução, em lugar de uma só. Esta wavelet tem suporte compacto e é simétrica. As wavelets biortogonais são definidas como pares de bases mutuamente ortogonais, mais nenhum desses pares é ortogonal, como apresentado na figura 67.

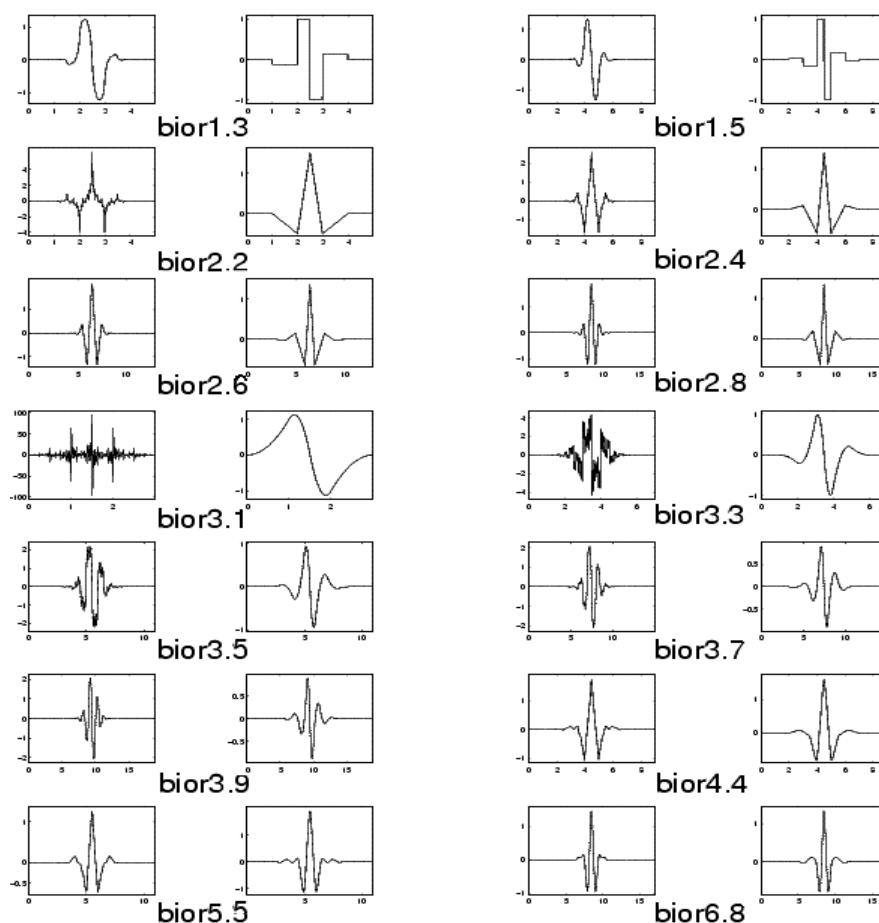


Figura 67: Wavelet mãe Biortogonal [21].

#### 4.7- CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo de análise de sinais, a transformada wavelet tem seu destaque, quando comparada com a transformada de Fourier, por realizar a decomposição do sinal em níveis de frequência e tempo, característica que faz da transformada de wavelet uma ferramenta inovadora e bastante utilizada nos dias de hoje.

A TW é uma ferramenta matemática com possibilidades de aplicação muito ampla, sendo esta utilizada desde estudos com imagens, compressão de dados, decomposição de sinais elétricos e outros. Neste capítulo tratou-se de forma sucinta a sua definição e aplicação na análise de detecção de distúrbios no sistema elétrico. Realizando um levantamento bibliográfico verifica-se que a técnica de multiresolução é bastante utilizada em análise de sinais elétricos e comprova ser uma ferramenta muito eficiente na obtenção de informações detalhadas dos sinais

analisados. Para a análise de sinais no sistema elétrico, as famílias de wavelets mais utilizadas são as Daubechies, Symlet, Coiflets e Haar por se tratar de wavelets mais suaves, com melhor resolução e precisão para os sinais de tensão e frequência.

Nos estudos de casos propostos, no capítulo posterior, será apresentada a aplicação da técnica de AMR, onde a descrição do algoritmo será implementada como ferramenta para detecção de distúrbios relacionados a variações de tensão e frequência do sistema elétrico de potência.

# CAPÍTULO V

## ESTUDOS DE CASOS: DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ILHAMENTO

### 5.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo apresenta a ferramenta computacional utilizada para realizar as simulações de casos de transitórios causados por ilhamentos apresentadas nesta dissertação, a definição do sistema industrial utilizado bem como os modelos computacionais empregados para representar os principais componentes da rede elétrica.

Foi utilizada uma modelagem de um sistema de distribuição ou modelo IEEE do software PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) [79], para que o estudo pudesse atender situações reais usualmente encontradas na área industrial. Nenhuma pesquisa em campo foi realizada para aquisição de dados reais, medidos junto às concessionárias de energia, indústrias ou usinas sucroenergéticas da região. Os softwares PSAT e MATLAB, específicos para esta finalidade, foram utilizados para a realização das diversas simulações computacionais.

Será apresentado também a descrição do algoritmo proposto para obtenção dos resultados, uma vez que o algoritmo é o objetivo principal desta dissertação que será utilizado para obtenção de dados referentes a identificação dos casos de ilhamentos devido a variações de tensão e frequência do sistema elétrico, os quais podem provocar danos principalmente nos geradores das unidades de GD e das concessionárias.

Em seguida, para finalizar, serão apresentadas as conclusões e considerações finais referentes aos resultados encontrados.

### 5.2- SISTEMA ELÉTRICO PROPOSTO

Nos sistemas de GD existe a necessidade de monitoramento dos níveis de tensão e frequência, para evitar graves problemas como os ilhamentos. Com a finalidade de simular um sistema para representar esta realidade do sistema elétrico nacional e também mostrar a real necessidade de monitoramento da tensão e frequência da rede elétrica para fins de manutenção preditiva e preventiva, simulou-se um sistema elétrico de 9 barras com um modelo geralmente utilizado em artigos do IEEE, já existente na biblioteca do software PSAT.

No sistema da figura 68 é representado as usinas sucroenergéticas como geradoras de energia em modelo de cogeração (GD), as linhas de transmissão responsáveis pelo transporte da energia elétrica e os consumidores finais de energia elétrica que são as residências, o comércio e as indústrias.

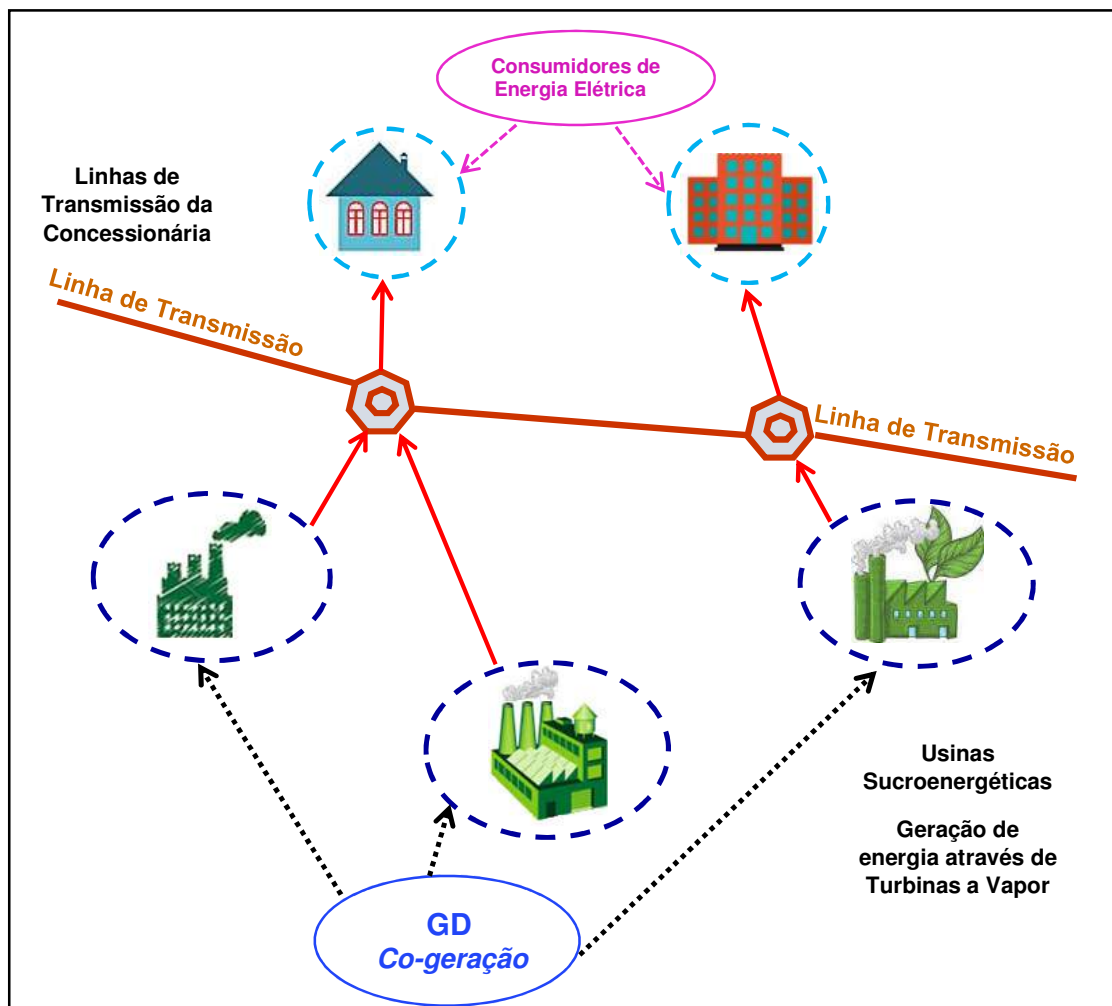


Figura 68: Representação de um sistema de GD com Usinas Sucroenergéticas [26].

Representado em forma de diagrama, a figura 69 apresenta o sistema de GD das unidades sucroenergéticas.

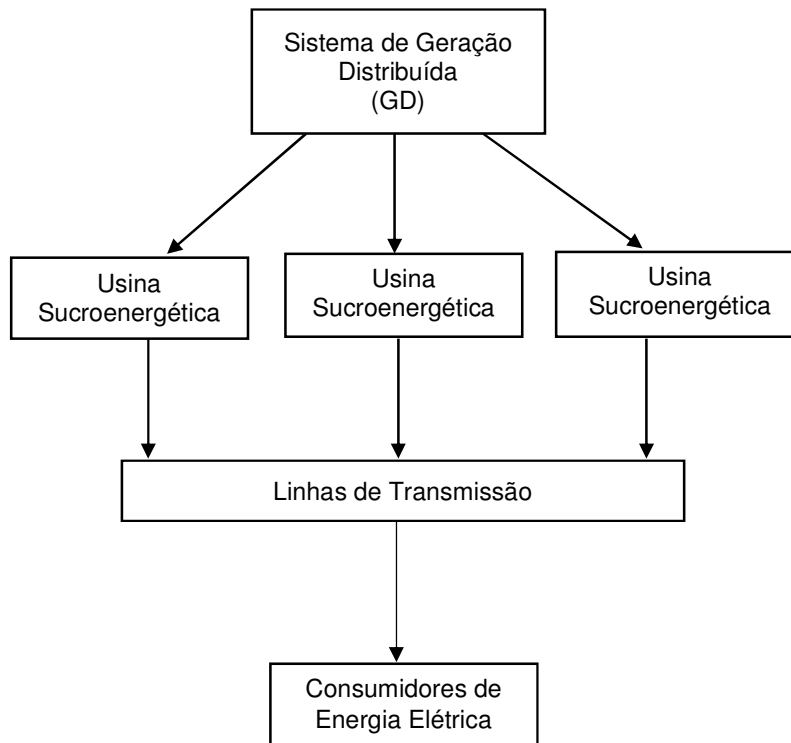


Figura 69: Diagrama de um sistema de GD com Usinas Sucroenergéticas.  
Fonte: Autor.

O sistema foi escolhido com a finalidade de investigar as oscilações de tensão e frequência em virtude de perturbações decorrentes de transitórios que podem acontecer nas unidades de GD no sistema elétrico, e os danos que estas variações podem causar na rede de distribuição.

Para se manter o sistema elétrico operando em equilíbrio, desde a geração até a carga à qual está conectada por meio de sistemas de transmissão e distribuição, deve-se manter os valores, tanto de tensão como de frequência, constantes, dentro dos níveis pré-estabelecidos, ao longo de toda a rede elétrica.

No Brasil o Sistema Interligado Nacional (SIN), é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, com predomínio de usinas hidrelétricas. Este sistema é praticamente quase todo interligado, e o equilíbrio deve ser mantido, pois caso aconteçam falhas em uma das áreas, todo o sistema poderá ser afetado [9].

Para acontecer a interligação da GD (cogeradores) ao sistema elétrico, uma das principais decisões a serem tomadas é a escolha do nível de tensão na qual o cogerador irá se conectar com a distribuidora de energia. Deve-se observar os parâmetros técnicos do equipamento para inserir um montante de energia na rede de distribuição, pois o gerador deverá estar em paralelismo e sincronismo com a concessionária local [4].

Usualmente, os níveis de tensão da rede básica de distribuição são de 13,8 kV, 34,5 kV, 69 kV ou 138 kV, dependendo da região em questão. Em função das características dos geradores utilizados nas GD das usinas sucroenergéticas, a maior parte usa a tensão de 13,8 kV. No entanto, apesar de ser gerada em 13,8 kV, essa energia pode ser distribuída em outro nível de tensão. O transporte de energia em níveis de tensões mais elevados, permite o transporte de grandes quantidades de energia, acima de 5 MW de potência, por longas distâncias. Para pequenas distâncias e geração com potência inferior a 5 MW, a tensão de 13,8 kV é a melhor opção [4].

Duas das principais variáveis do sistema elétrico, tensão e frequência, possuem relação direta com dois controles dos geradores e dos sistemas: o controle de carga e frequência e o controle de tensão. As cargas precisam consumir potência ativa para realizar trabalho ou produzir calor e os elementos geradores do sistema elétrico que alimentam estas cargas, quando em operação normal, trabalham com um mesmo valor de frequência. Desta forma, qualquer alteração nas cargas irá refletir na frequência de trabalho do sistema. Caso aconteça um acréscimo de carga, tende-se a ter uma diminuição da frequência, pois a carga irá buscar a energia necessária nos geradores do sistema. Com isso, a velocidade dos geradores precisa ser aumentada, o que é conseguido pela atuação dos controladores de velocidade, que operam para que sua velocidade aumente de forma a manter a frequência do sistema. O caso oposto também pode acontecer, ou seja, quando ocorre uma diminuição da carga, os geradores terão sua velocidade reduzida pela atuação dos controladores de velocidade.

Relata [4] que o sistema elétrico brasileiro trabalha com frequência de 60 Hz, porém devido as constantes variações de cargas acontecem variações em torno desse valor de referência. Em um sistema todo interligado e de tamanha proporção, estas variações de carga



são assimiladas pelo sistema, e acabam não sendo percebidas pelo consumidor final. No entanto, em caso de sistemas isolados e de pequeno porte, como as usinas sucroenergéticas que possuem geração própria, uma pequena variação de carga pode provocar alteração na tensão e frequência, podendo causar subtensão ou sobretensão no sistema, levando a um ilhamento da unidade do restante sistema elétrico.

O software PSAT é um programa computacional utilizado para realizar análises estáticas, dinâmicas, e de controle de sistemas elétricos de potência. Com ele é feito o cálculo de fluxo de potência, fluxo de potência continuado e fluxo de potência ótimo, assim como análise de estabilidade transitória e de pequenas perturbações [79]. Trata-se de um toolbox (caixa de ferramenta) para instalação no software Matlab.

Para a solução das equações de fluxo de potência do sistema teste em estudo no PSAT, o Método de Newton-Raphson foi escolhido. Para a análise no domínio do tempo em estudos de estabilidade, a simulação do comportamento dinâmico do sistema no tempo consiste na resolução de um sistema de equações algébricas e diferenciais não-lineares para as quais não é possível se obter uma solução analítica explícita. Por isso da necessidade de métodos de integração numérica, que nos fornecem a obtenção de soluções aproximadas para tais equações.

No PSAT existem dois métodos de análise implícitos que são: O Método de Euler Implícito e o Método Trapezoidal Implícito. Tais métodos são fundamentados em algoritmos que utilizam a matriz Jacobiana completa [79]. Neste trabalho, para a realização das simulações foi escolhido o Método Trapezoidal Implícito, que mesmo sendo classificado como um método de implementação mais simples, demonstrou ser mais robusto e confiável para diversos casos testados. Os detalhes do software PSAT são apresentados no anexo II.

A seguir, é apresentada a descrição dos modelos dos elementos utilizados na constituição do sistema estudado.

### **1- Máquina Síncrona (G):**

Geradores síncronos são classificados de acordo com sua velocidade de acionamento, podendo ser de polos salientes ou polos lisos. Na figura 70 é apresentada a configuração básica de um gerador síncrono de polos salientes, que é constituído basicamente por dois enrolamentos: enrolamento de campo e enrolamento de armadura.

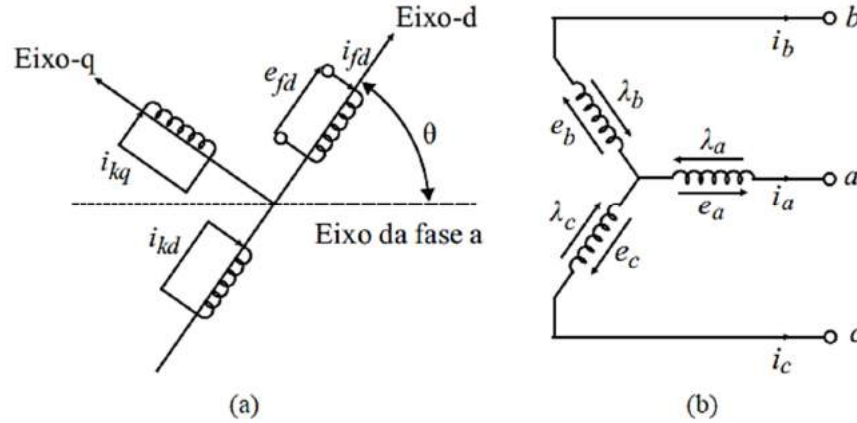


Figura 70: Representação básica de uma máquina síncrona: (a) Rotor, (b) Estator [21].

O PSAT utiliza o modelo de Park-Concordia para representar as equações da máquina síncrona, sendo possível escolher desde modelo clássico (2ª ordem) até um modelo de 8ª ordem, no qual considera-se os efeitos da saturação magnética. Utilizou-se nas simulações um modelo de 6ª ordem, onde os efeitos de histerese e saturação magnética foram desprezados. O modelo de 6ª ordem é obtido assumindo a presença do circuito de campo e um circuito adicional ao longo do eixo “d” com mais dois circuitos adicionais ao longo do eixo “q” [79]. Os detalhes do modelo da máquina síncrona são apresentados no anexo II.

Para [21] a utilização do recurso da transformada de *Park* tem como principal vantagem deixar mais simples o modelo trifásico de uma máquina síncrona para um modelo simplificado de dois eixos, onde as indutâncias próprias e mútuas são mostradas de maneira constante, diferentemente do modelo trifásico em que indutâncias próprias e mútuas variam com o tempo, uma vez que no novo referencial os dois eixos giram à mesma velocidade  $\omega$ . Os eixos  $a, b, c$  são fixos, enquanto que os eixos  $d$  e  $q$  giram a uma velocidade  $\omega$  e são defasados em  $90^\circ$ .

Para realizar a decomposição das variáveis dos eixos  $(a, b, c)$  nos eixos  $(0, d, q)$ , tem-se a *Matriz de Transformação de Park*, como mostrado na expressão (19). As correntes  $i_0, i_d, i_q$  se relacionam-se com as correntes  $i_a, i_b, i_c$  através da matriz de transformação de Park, conforme mostra a expressão (20). No anexo II são apresentadas as equações de Transformação de Park.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

## 2- Regulador Automático de Tensão (AVR):

Em sua biblioteca o PSAT possui três diferentes modelos de regulador automático de tensão, tipo I é um regulador padrão de modelo italiano e o tipo II é o modelo padrão do IEEE, o tipo III é um modelo mais simples comparado com os anteriores, porém muito utilizado nos estudos de estabilidade. Para todas as simulações apresentadas utilizou-se o modelo de regulador tipo II [79]. O modelo matemático e os parâmetros do regulador de tensão são apresentados no anexo II.

Os dispositivos AVRs possuem a tarefa de realizar o controle das tensões terminais produzidas pelos geradores síncronos, garantindo a manutenção dos níveis de tensões terminais do gerador, dentro de uma faixa de tolerância pré-estabelecida em norma. Desta forma, a ação do AVR é desenvolvida por meio de variações na corrente do enrolamento de campo suprida pelo sistema de excitação [21].

De uma forma geral, as principais funções dos dispositivos AVRs são [27]:

- Controle das tensões nos terminais do gerador síncrono, mantendo-as dentro de níveis pré-estabelecidos em norma;
- Regular a divisão de potência reativa entre as máquinas que operam em paralelo;
- Efetuar o controle de corrente de campo, mantendo os geradores síncronos em sincronismo com o sistema;

- Aumentar a excitação sob condições de curto-circuito, mantendo o gerador em sincronismo com os demais geradores do sistema.

O AVR, mostrado na figura 71, controla a saída da excitatriz de modo que a corrente gerada por ela e a potência reativa do gerador síncrono sejam ajustadas da maneira desejada. Um erro de entrada é aplicado no regulador AVR que ajusta o sinal e envia à excitatriz do gerador síncrono, gerando um sinal de saída já ajustado.

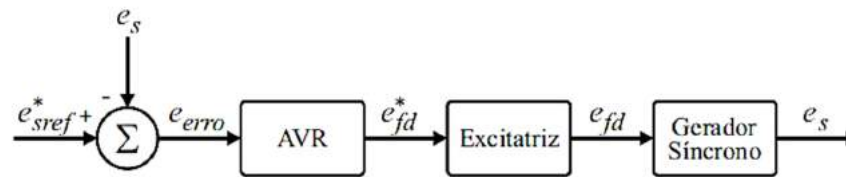


Figura 71: Estrutura clássica de um AVR conectado ao gerador [27].

### 3- Linha de Transmissão ( $\pi$ ):

A linha de transmissão é representada com seus parâmetros fixos, resistência, reatância e capacitância, por meio de um modelo equivalente  $\pi$  [79]. O modelo da linha de transmissão está apresentado no anexo II.

### 4- Cargas:

O modelo do tipo impedância constante foi empregado para representar as cargas do sistema. Deve-se observar que este tipo de carga (impedância constante), quando presente numa rede, facilita a convergência de programas de simulação de comportamento de sistemas, tal como o programa de análise de estabilidade transitória. No anexo II é mostrado o modelamento das cargas (ZIP).

### 5- Estabilizadores (PSS):

O PSAT dispõe de uma biblioteca que reúne vários tipos de controladores. Nessa biblioteca encontra-se o estabilizador de Sistemas de Potência ou “Power System Stabilizer”

PSS, o qual deve ser conectado aos geradores síncronos, para amortecer oscilações, estabilizando as variáveis do sistema [79]. No anexo II encontram-se os valores dos parâmetros do estabilizador.

Os dispositivos PSS quando em operação conjunta com os AVR têm como função básica interagir com os limites de estabilidade dos geradores síncronos por meio do controle de sistema de excitação, proporcionando amortecimento às oscilações eletromecânicas. A falta de amortecimento das oscilações eletromecânicas pode limitar a capacidade de transmissão de potência ativa para as cargas. Os sinais de entrada geralmente utilizados nos dispositivos PSS são: a variação de velocidade do rotor ( $\Delta\omega$ ), variação do ângulo de potência do gerador ( $\Delta\delta$ ), a variação da potência ativa ( $\Delta p$ ) e a tensão da barra que está conectada [27].

Para proporcionar amortecimento, o dispositivo PSS deve produzir um componente de conjugado elétrico sobre o rotor que esteja em fase com as variações de velocidade.

Na figura 72, é mostrado o diagrama de blocos da estrutura convencional de um dispositivo PSS, sendo composto por: filtro *washout* (passa-alta), compensador dinâmico (controlador), filtro torsional (passa-baixa) e um limitador [27].

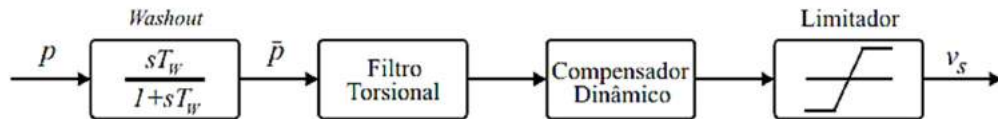
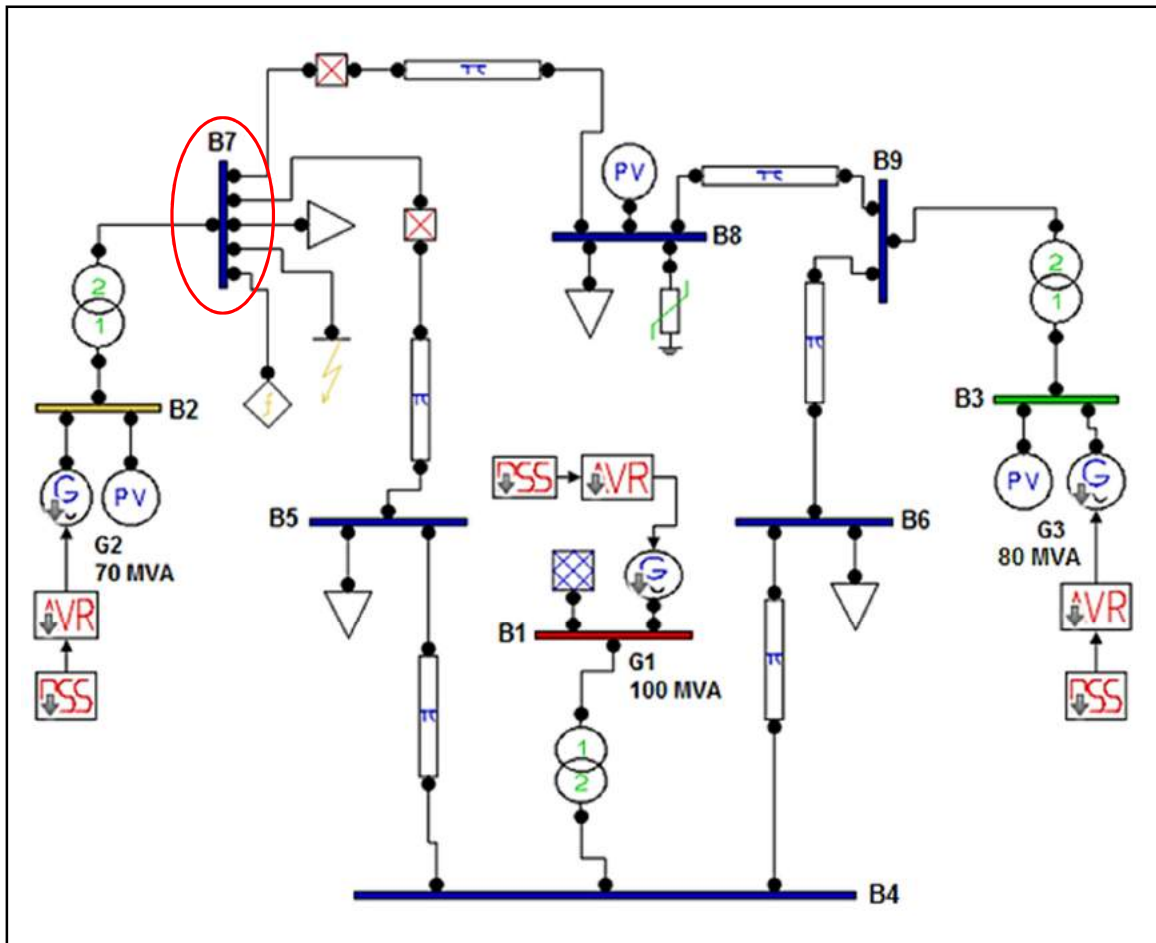


Figura 72: Estrutura de um PSS convencional [27].

### 5.2.1- Descrição do Sistema Utilizado

De acordo com a figura 73, observa-se que no sistema proposto encontra-se ligado ao barramento B1 um gerador síncrono de 100 MVA o qual representa uma unidade geradora hidráulica. Este gerador possui um Regulador de Tensão (AVR) e um Estabilizador (PSS). Neste barramento possui também a representação de um barramento infinito (*stack*) simbolizando um equivalente de todo o sistema elétrico. Nos barramentos B2 e B3 existem duas unidades geradoras G2 e G3 com potência de 70 e 80 MVA, respectivamente, simbolizando sistemas de GD de usinas sucroenergéticas que utilizam turbinas a vapor.



Fonte: Biblioteca PSAT.

ilhamento de parte do sistema, criou-se três situações hipotéticas:

- Caso 1 - Simulação de Ilhamento devido a Curto Circuito trifásico localizado na barra 7;
- Caso 2 – Simulação de Ilhamento devido a Rejeição de Carga localizado entre as barras 7 e 8;
- Caso 3 – Simulação de Ilhamento Intencional localizado entre as barras 7 e 5.

Vale salientar que existe uma diferença característica entre o ilhamento por Rejeição de Carga e o Ilhamento Intencional. O ilhamento por Rejeição de Carga pode ser um distúrbio ocorrido no sistema elétrico de distribuição em que a unidade sucroenergética está conectada, fazendo com que os elementos de proteção desta unidade atuem e façam a isolação de determinadas cargas desta unidade, para evitar colapsos de tensão nos equipamentos.

Esquemas de rejeição de carga são uma potencial solução para manter a ilha energizada quando a carga é superior à capacidade de geração dos geradores distribuídos presentes no subsistema isolado [69].

Já o ilhamento Intencional acontece de forma proposital, por parte da operação, realizando a desconexão de determinadas cargas da unidade.

Para cada um dos estudos propostos temos uma situação de análise da dinâmica da tensão e frequência do sistema.

Quanto ao comportamento do sistema nos casos simulados, pode-se dizer que no caso 1, em virtude do curto-circuito, tem-se um súbito afundamento de tensão momentâneo. No caso 2, tem-se uma elevação de tensão devido a rejeição de carga, e no caso 3, também ocorre uma elevação de tensão menos acentuada, configurando um caso especial onde a unidade geradora G2 ficará desconectada (ilhada) do sistema e trabalhando somente para suprir a necessidade de energia local.

Cada um dos casos será descrito nos tópicos seguintes com os comentários e resultados obtidos através da aplicação do algoritmo de verificação e análise de tensão e frequência.

Uma observação a ser feita é que as características das cargas do sistema proposto são do tipo resistivas e indutivas.

### **5.2.2- Lógica Computacional Proposta**

Neste momento serão mostradas as etapas de detecção e estimação dos valores de sub/sobretensão e sub/sobrefrequência, bem como o tempo em que o sistema permanece nestas duas condições. Para a detecção destes valores utilizou-se a técnica de Wavelet AMR descrita no capítulo 4. A lógica computacional proposta é apresenta, de forma generalizada, na figura 74.

É proposta uma lógica computacional para o módulo deste relé de tensão e frequência, disponibilizando os dados referentes aos valores destas grandezas. O algoritmo proposto é apresentado no anexo I.

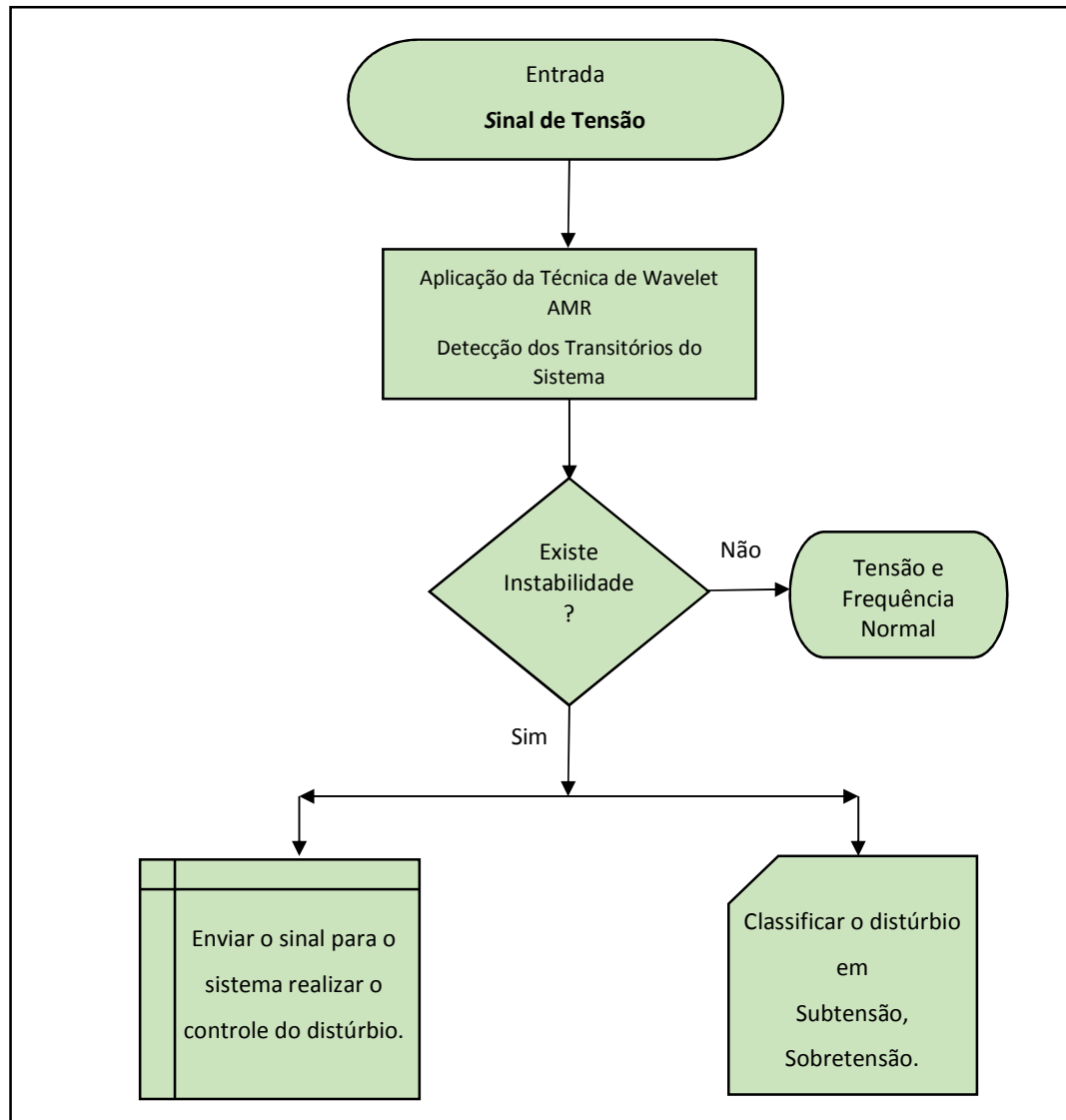


Figura 74: Fluxograma do Algoritmo Proposto.  
Fonte: Autor.

Em seguida, na figura 75 é apresentada, de forma simples, a estrutura interna e as funcionalidades do relé digital de tensão e frequência, com o módulo proposto de análise de tempo de sub/sobretensão.



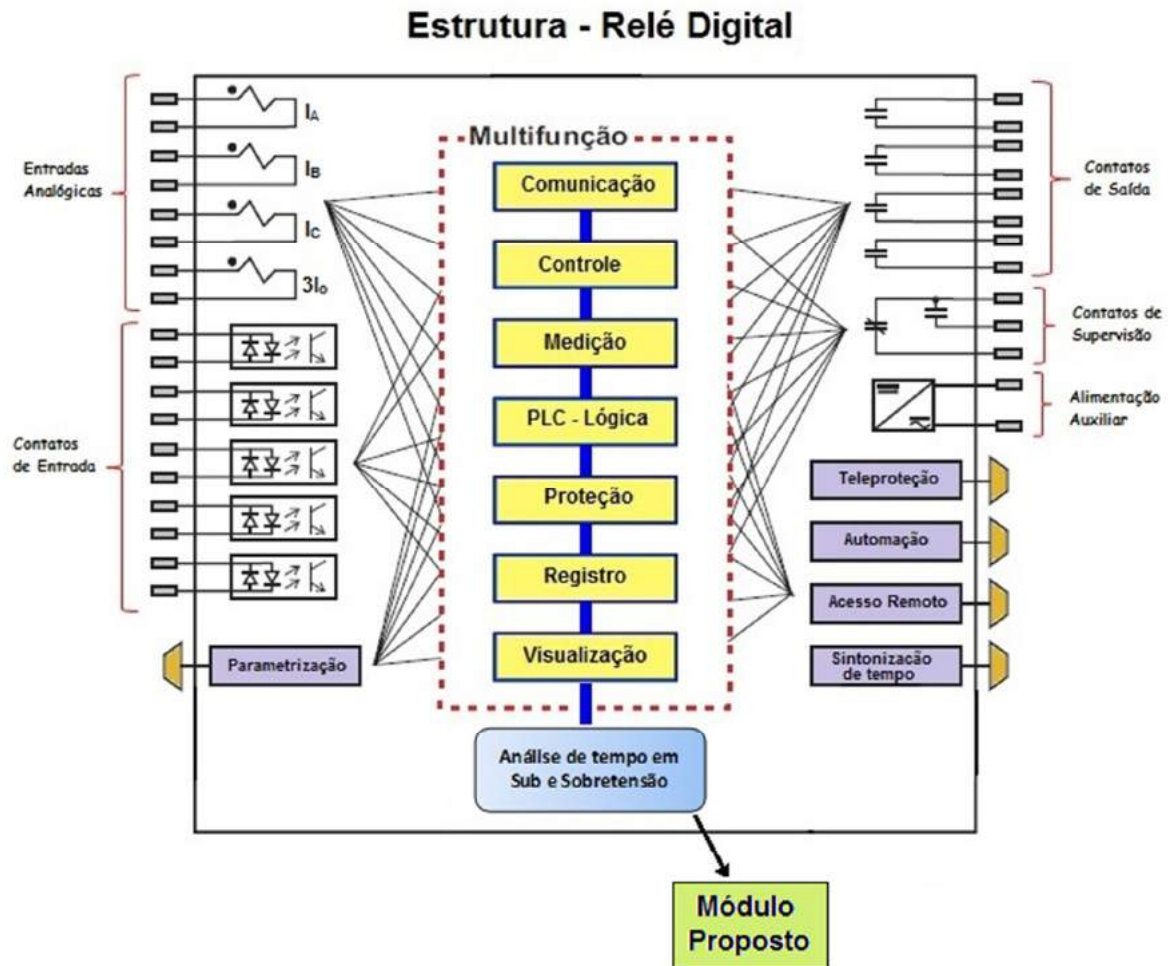


Figura 75: Módulo proposto para um relé de proteção digital [9].

A nível de exemplo do emprego da TW utilizando relés digitais, na detecção, classificação e monitoramento têm-se o trabalho de [80]. A transformada pode ser implementada através de lógica com o uso de uma linguagem de programação, como por exemplo, C, C++ e também através da utilização de pacotes computacionais, como é o caso do “Toolbox” existente no software Matlab.

Foi utilizado o ambiente de linguagem de programação do software Matlab para implementação do algoritmo proposto, uma vez que também foi utilizada esta plataforma para a simulação do sistema elétrico. O algoritmo proposto foi dividido em duas etapas:

### 1ª Etapa: Condicionamento do Sinal e Análise Wavelet AMR

1- Recepção do sinal, em forma de vetor, com os valores referentes a tensão correspondente ao valor de frequência do sistema (sinal disponibilizado pelo módulo de medição do relé digital ou outro equipamento de medição de tensão).

2- Dimensionamento do vetor conforme os valores de frequência de amostragem que deu origem ao sinal. Quanto maior a frequência de amostragem da medição da tensão, maior será o detalhe referente à resolução da frequência de medida. Nesta etapa também é feita a padronização do tempo em que o sinal de tensão será analisado. Este tempo de análise é referente a frequência de amostragem do sinal medido.

Na figura 76, mostra-se um determinado sinal de entrada (s) com os detalhes (d1, d2) e a atenuação (a2), provenientes da aplicação da técnica AMR.

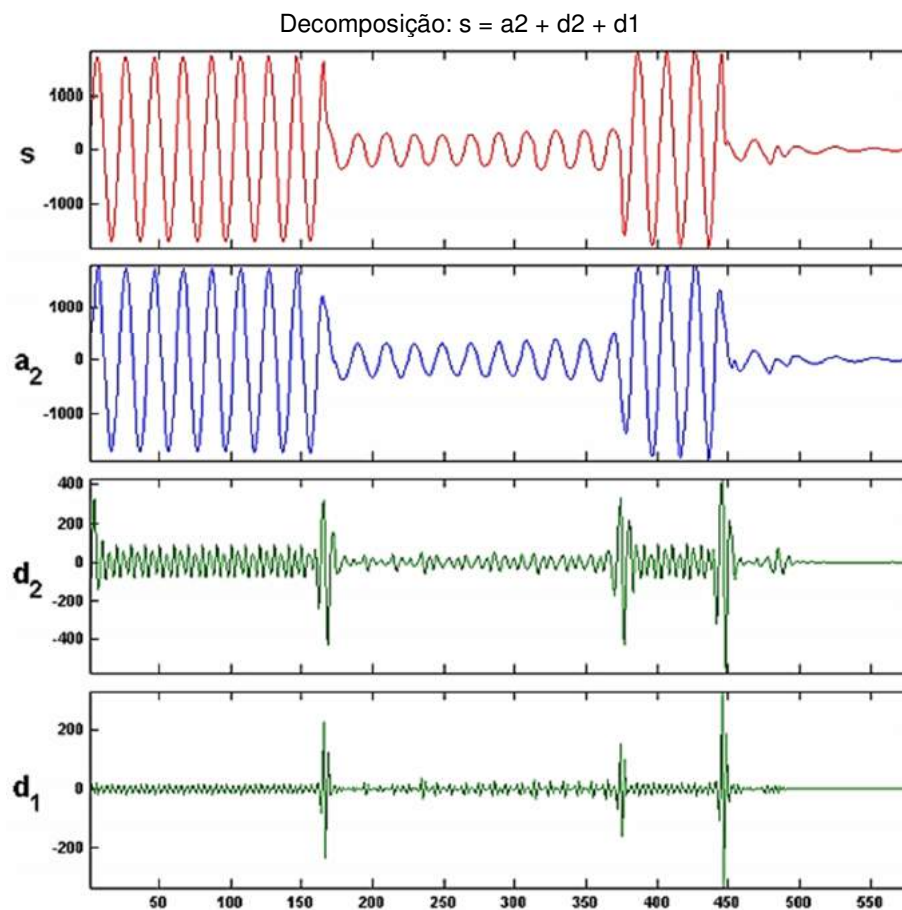


Figura 76: Decomposição sucessiva de um sinal [52].

**3-** Aplicação da técnica de wavelet AMR, para detecção de um distúrbio. A escolha de uma base wavelet para a análise de fenômenos relacionados com sistemas elétricos de potência deve considerar sua capacidade de distinção entre o nível de tensão do sinal original e o nível de frequência dos distúrbios. Em trabalho descrito por [52], com o aumento da ordem das Wavelets mães ortogonais, seus comportamentos em suavidade oferecem melhores resoluções em frequência. Sendo assim, as wavelets de Daubechies e Symlet de ordem igual ou superior a três e Coiflets de ordem superior a dois oferecem melhores resultados em relação às outras bases. No trabalho foi utilizado a Wavelet mãe Symlet.

Conforme apresenta a figura 76, através de filtros passa alta e passa baixa respectivamente. Como o sinal atenuado (proveniente do filtro passa baixa) é novamente decomposto resultando em dois outros novos sinais, detalhado e atenuado, em níveis de frequência diferentes, estes fornecem informações diretas no domínio da frequência e do tempo. Estes novos sinais decompostos indicarão, diretamente, a existência de algum distúrbio e a sua localização no tempo.

## **2ª Etapa: Realização de análise de sub e sobretensão do sinal**

Através de um algoritmo lógico if else (*se se\_não*) optou-se por dividir em intervalos as subfrequências e as sobrefrequências, de acordo com o sinal de tensão. Para isso, nesta etapa verifica-se, no sinal de entrada em análise, os valores de subfrequência e sobrefrequência e o tempo exato de ocorrência deste distúrbio. Sabe-se que os sistemas elétricos de potência são dotados de relés de frequência de proteção, que possuem limites de mínimo máximo para a variação de frequência do sistema. Caso a frequência do sistema esteja fora deste padrão pré-determinado, o relé atua e o sistema é desligado.

## **5.3- ESTUDO DE CASOS**

### **5.3.1- Ilhamento devido a Curto-Circuito**

Na figura 77, aos 2,0s é aplicado um distúrbio de curto-circuito na barra 7, com duração de 100ms. Pode-se observar que acontece um súbito afundamento do sinal de tensão em função

do curto. Após o tempo de curto, o sistema de controle, formado pelos reguladores de tensão (AVR) e estabilizadores do sistema (PSS) atuam e fazem com que a tensão se estabilize após, aproximadamente, o período de 5,0s.

Como se pode observar, ainda na figura 77, detalhe d1, com a aplicação da técnica wavelet AMR acontece a detecção do momento exato em que acontece o distúrbio, sendo representado pelo pico superior do sinal. No momento exato de término do curto-circuito o pico inferior do sinal indica o fim do distúrbio. Utilizando esta técnica, fica comprovada a leitura do tempo exato de duração do distúrbio, que neste caso foi de 100ms.

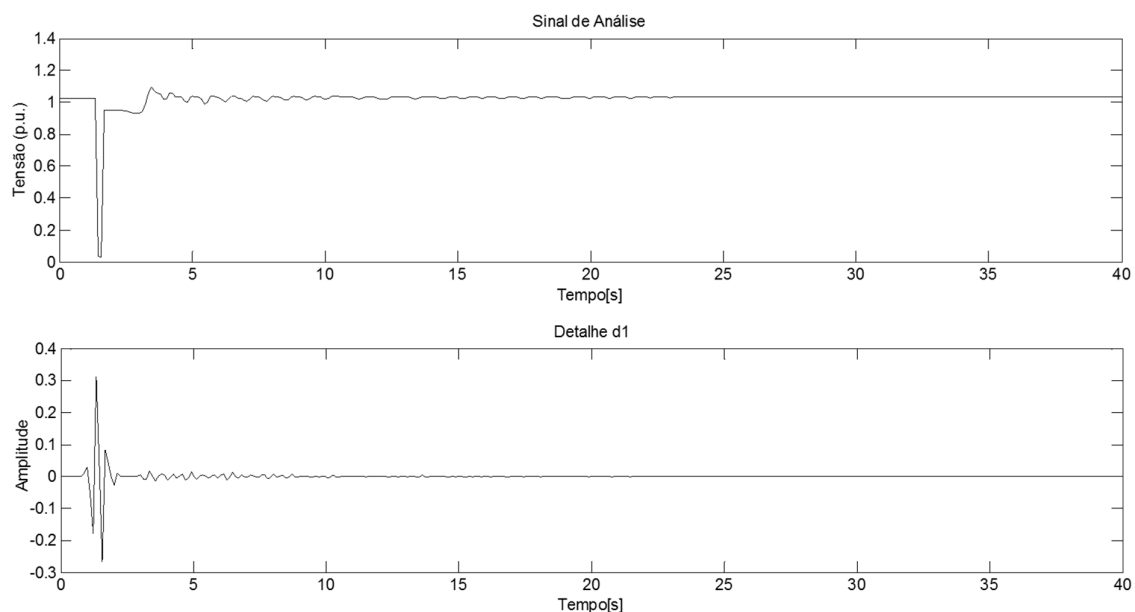


Figura 77: Curto-circuito na barra 7 e aplicação da técnica AMR.  
Fonte: Autor.

Para este caso, a wavelet mãe que melhor identificou o distúrbio de curto-circuito foi a família Symlet, nível 3, detalhe d1 (Sym3 d1).

Observa-se, na figura 78, a oscilação do sinal de frequência em função do curto-circuito na barra 7. O sinal de frequência primeiramente tem uma elevação no momento do distúrbio, chegando a um valor bem acima do valor nominal de trabalho. Em seguida, o sinal chega a um valor próximo de zero. Após o término do tempo de curto, o sinal de frequência também se estabiliza em função da atuação dos elementos do sistema de controle, voltando ao valor de 60 Hz após, aproximadamente, 3,0s.

Utilizou-se a técnica wavelet AMR também para a detecção do momento exato da variação da frequência do sinal, como se pode observar no detalhe d1 da figura 78. O pico superior do detalhe d1 indica o momento exato em que a frequência alcançou o valor máximo.

A wavelet da família Symlet, nível 3, detalhe d1 (Sym3 d1) também foi a que obteve o melhor desempenho para a análise da frequência no distúrbio de curto.

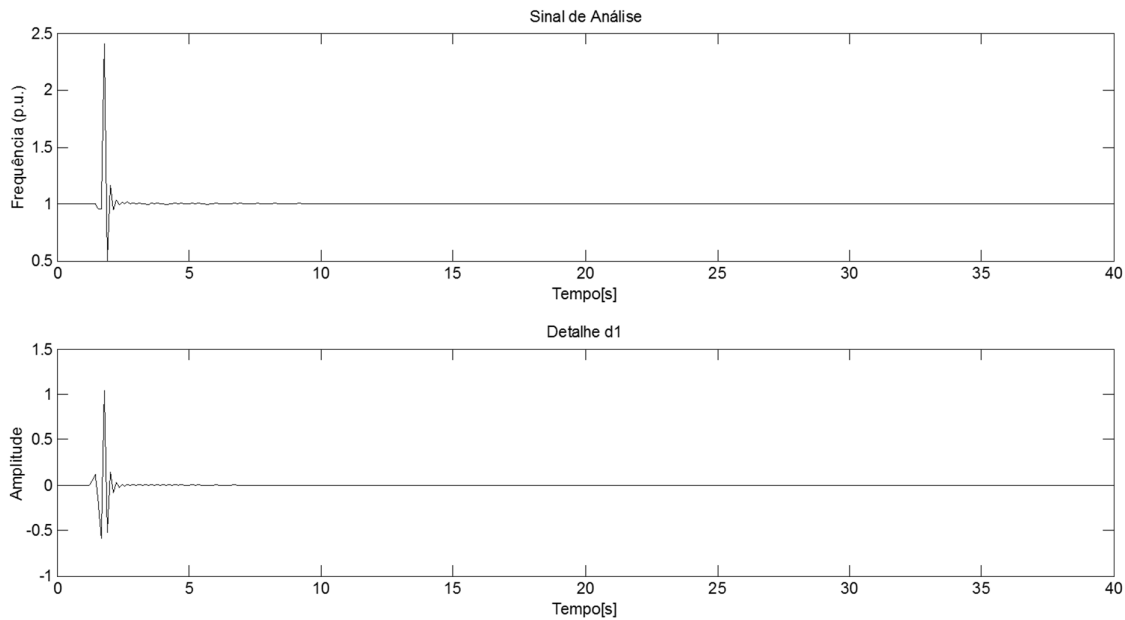


Figura 78: Frequência do curto-circuito na barra 7 e aplicação da técnica AMR.  
Fonte: Autor.

A análise de eventos de sub/sobrefrequência é de suma importância para a manutenção da integridade dos motores e geradores síncronos existentes nas usinas sucroenergéticas.

### 5.3.2- Ilhamento devido a Rejeição de Carga

Na figura 79, aos 3,0s é aplicado um distúrbio de Rejeição de Carga no ponto de conexão entre as barras 7 e 8. Pode-se observar que acontece um afundamento temporário da tensão na barra 7 e, em seguida, uma elevação da tensão que caracteriza o distúrbio de rejeição de carga. Após a elevação da tensão, percorrido um determinado tempo, acontece uma estabilização do sinal de tensão, caracterizando também a rejeição.

Verifica-se na mesma figura 79, o detalhe d3, com a aplicação da técnica AMR onde a transformada realiza a detecção do momento exato da rejeição. Neste sinal, o pico superior mais elevado do sinal identifica o exato momento em que acontece o distúrbio. Durante o período de afundamento existe uma oscilação do sinal de tensão que também é percebido pela análise AMR, no detalhe d3. No momento em que a tensão inicia a estabilização e o sinal começa a se elevar, o detalhe d3 de análise AMR também se estabiliza, indicando a elevação da tensão e estabilização do sinal. O sistema permanece instável por aproximadamente 5,0s, iniciando a estabilização sinal após os 8,0s.

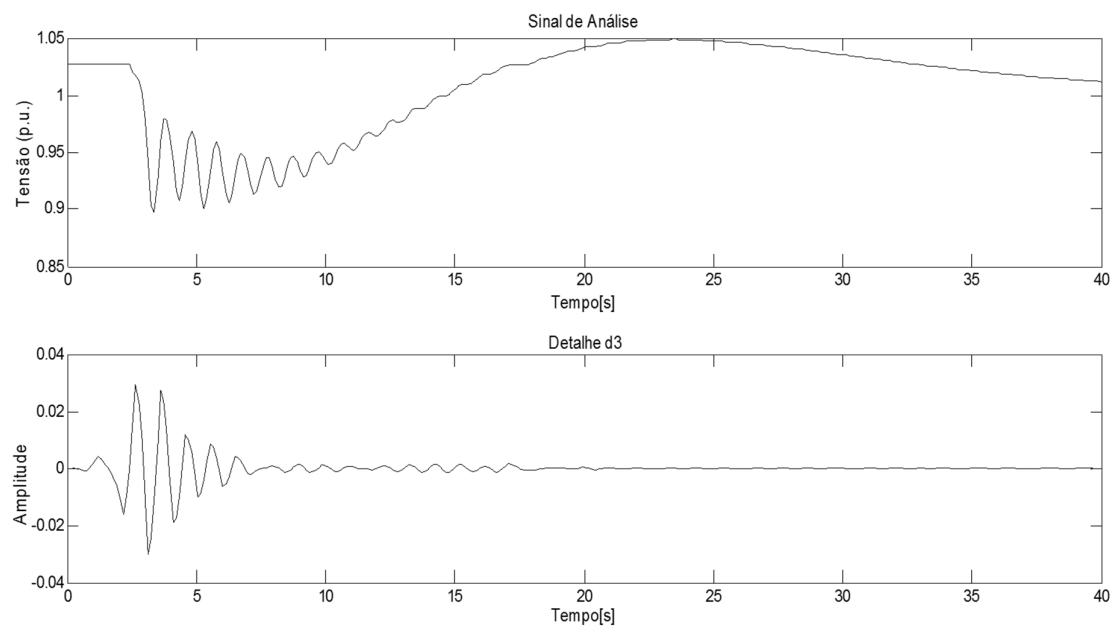


Figura 79: Rejeição de carga (barras 7-8) com aplicação da técnica AMR, detalhe d3.  
Fonte: Autor.

Para a rejeição de carga foi utilizado na análise AMR, a wavelet Symlet, nível 4, detalhe 3 (Sym4 d3). Foi a que apresentou melhor análise de detalhe para este distúrbio.

A oscilação de frequência na barra 7 em função da rejeição de carga com a abertura entre as barras 7 e 8 é observada na figura 80. O sinal de frequência inicia um aumento de oscilação da frequência no instante 3,0s. Após este momento inicia-se uma variação entre um valor de máximo e de mínimo que culmina entre 67,8 e 52,2 Hz, no instante 6,0s. Posteriormente este intervalo de variação diminui até um momento de estabilização em 60 Hz.

No detalhe d3 da figura 80 é mostrada a aplicação da técnica wavelet AMR identificando o momento exato da ocorrência do distúrbio, que fica evidenciado com o pico superior mais elevado do sinal.

A wavelet da família Symlet, nível 4, detalhe d3 (Sym4 d3) também foi a que obteve o melhor desempenho para a análise da variação de frequência.

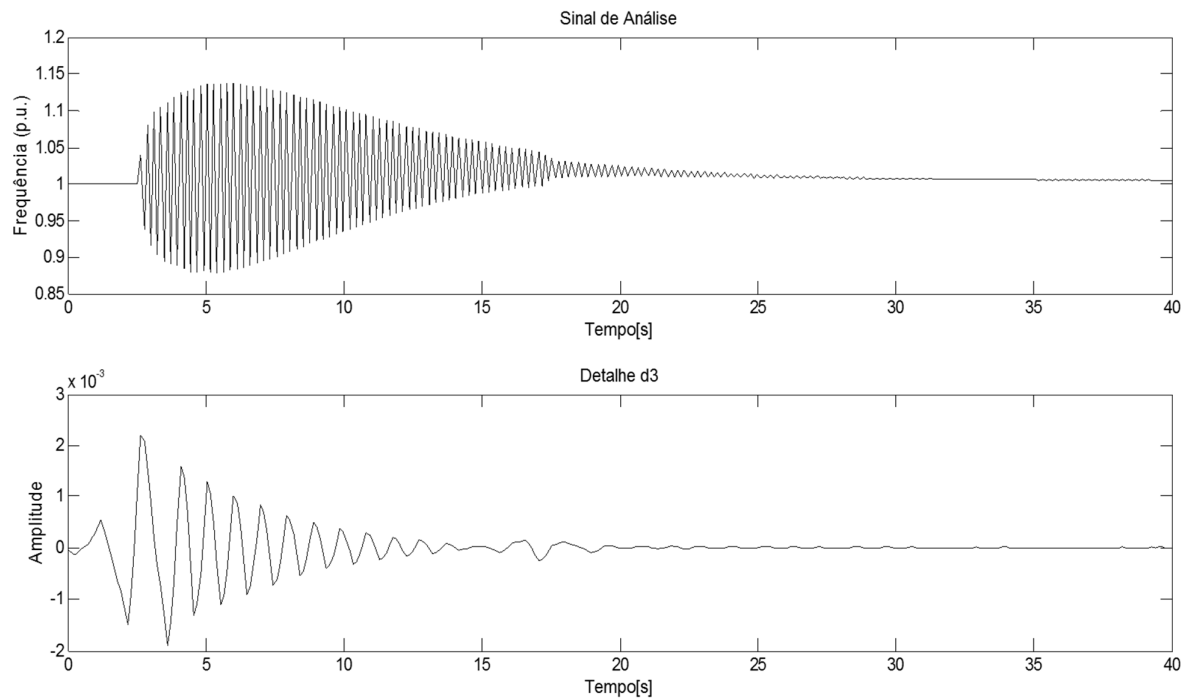


Figura 80: Frequência na rejeição de carga (barra 7-8) com aplicação da técnica AMR, detalhe d3.  
Fonte: Autor.

### 5.3.3- Ilhamento Intencional

Na figura 81, aos 3,0s é aplicado um distúrbio de Ilhamento Intencional, que significa desenergizar a linha propositalmente no ponto de conexão entre as barras 7 e 5. Pode-se observar que acontece um pequeno afundamento de tensão e, em seguida, uma leve elevação do sinal que apresenta um período mais longo de instabilidade. A elevação da tensão também é característica do distúrbio de ilhamento intencional, porém com comportamento distinto da

rejeição. O período de instabilidade do ilhamento intencional dura aproximadamente 25s após o distúrbio, quando se inicia a retomada da estabilidade.

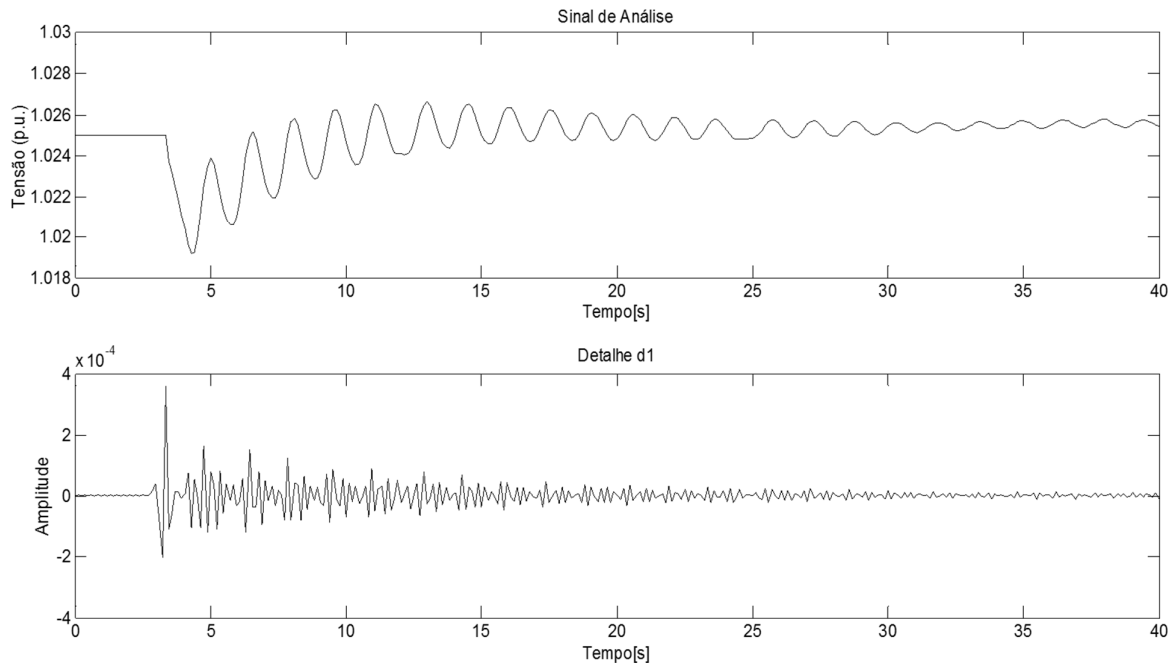


Figura 81: Ilhamento Intencional (barras 7 e 5) e aplicação da técnica AMR, detalhe d1.  
Fonte: Autor.

Verifica-se na figura 82, a oscilação do sinal de frequência em função do distúrbio. No detalhe d1, acontece a aplicação da técnica AMR onde a transformada realiza a detecção do momento exato do ilhamento intencional. O pico superior do sinal identifica, de forma precisa, o momento exato da ocorrência do distúrbio.

Neste caso, deve-se ressaltar que a instabilidade provocada pelo ilhamento intencional leva a frequência a assumir uma estabilidade, porém com pequena ascendência, após o período de oscilação. Este valor está um pouco acima do valor nominal de trabalho. Aproximadamente 5% acima do valor de referência, ou seja, próximo de 60,3 Hz.



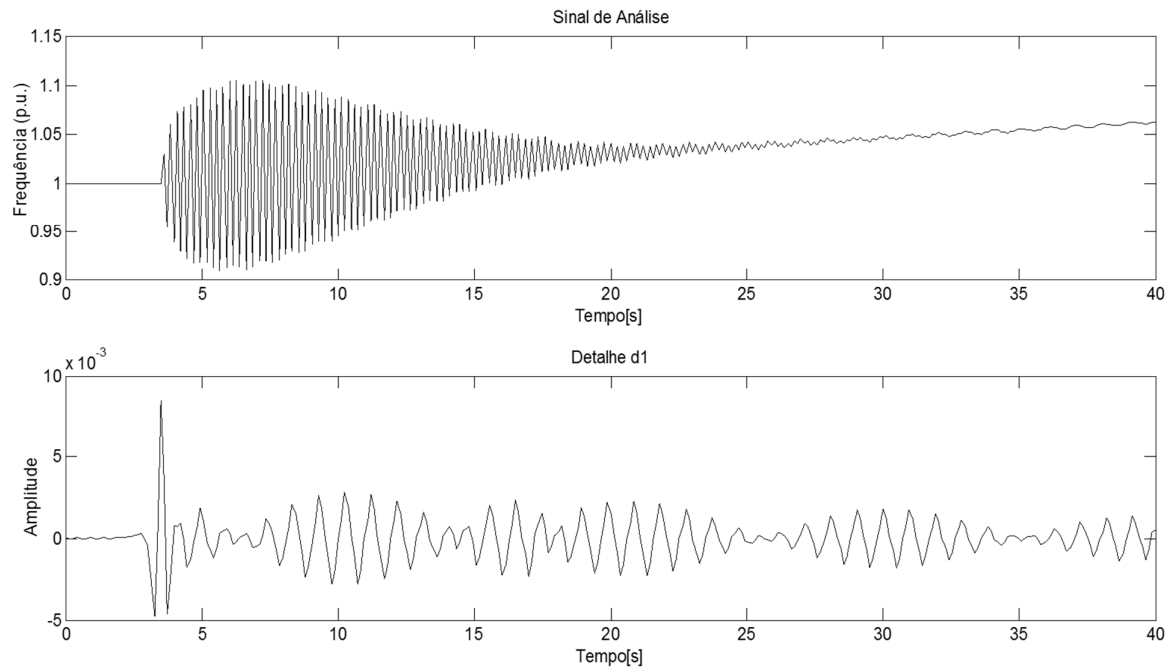


Figura 82: Frequência de ilhamento intencional (barras 7 e 5) e a técnica AMR, detalhe d1.  
Fonte: Autor.

Para o ilhamento intencional, tanto para a análise do sinal de tensão, quanto para o sinal de frequência, a wavelet mãe da família Symlet, nível 3, detalhe d1 (Sym3 d1) foi a que obteve os melhores desempenhos para a análise da detecção do início da instabilidade de tensão e frequência.

#### 5.4- FAMÍLIAS WAVELETS NÃO SATISFATÓRIAS

Diversas famílias de wavelets mãe foram testadas para se definir qual seria a melhor para a identificação dos distúrbios nos casos apresentados.

Foram realizados testes com as famílias de wavelets mais usuais nos estudos de distúrbios de sinais, considerando as famílias que melhores resultados apresentam, de acordo com a literatura.

Neste tópico será apresentado apenas os sinais de decomposição das wavelets que não foram satisfatórias. No total, foram realizados 150 testes com a família Symlet, 150 testes com a família Coiflet, 150 testes com a família Daubechie e 150 testes com a família Haar.

### 5.4.1- Tensão no Ilhamento por Curto-Circuito

Nas figuras 83 e 84 são mostrados os sinais de tensão e frequência em caso de ilhamento devido a Curto-Circuito, com aplicação da técnica AMR.

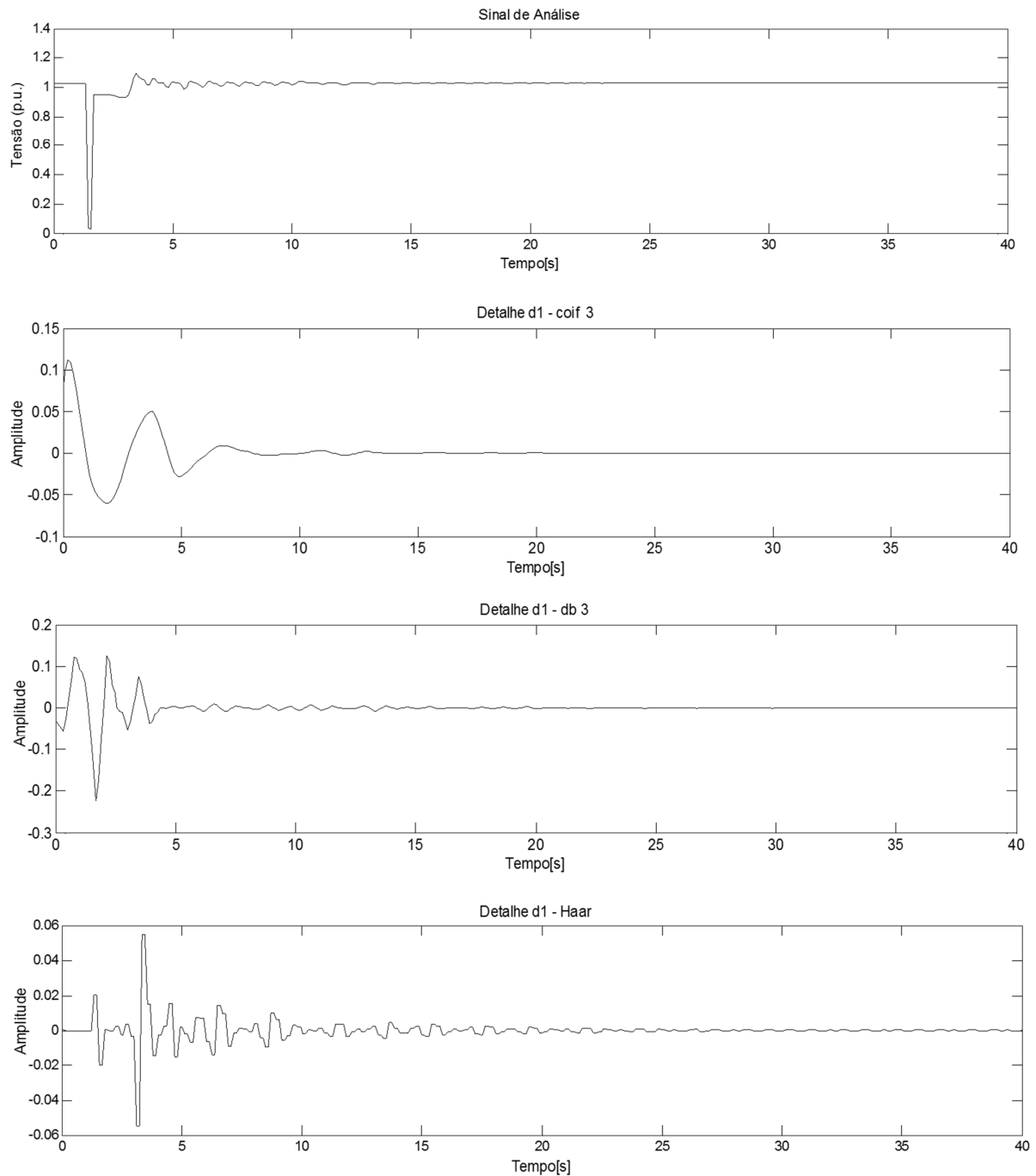


Figura 83: Técnica AMR na tensão do ilhamento por Curto-Circuito.  
Fonte: Autor.

Diante dos resultados apresentados, após os diversos testes, fica definido que algumas famílias wavelets não são tão satisfatórias para a análise de detecção dos distúrbios de ilhamentos em estudo.

Cada detalhe mostra a decomposição do sinal realizada por uma determinada wavelet. No caso do sinal de tensão, os detalhes apresentados são coif3 d1, db3 d1 e haar d1. Para o sinal de frequência, os detalhes são coif3 d1 e haar d1.

#### 5.4.2- Frequência no Ilhamento por Curto-Circuito

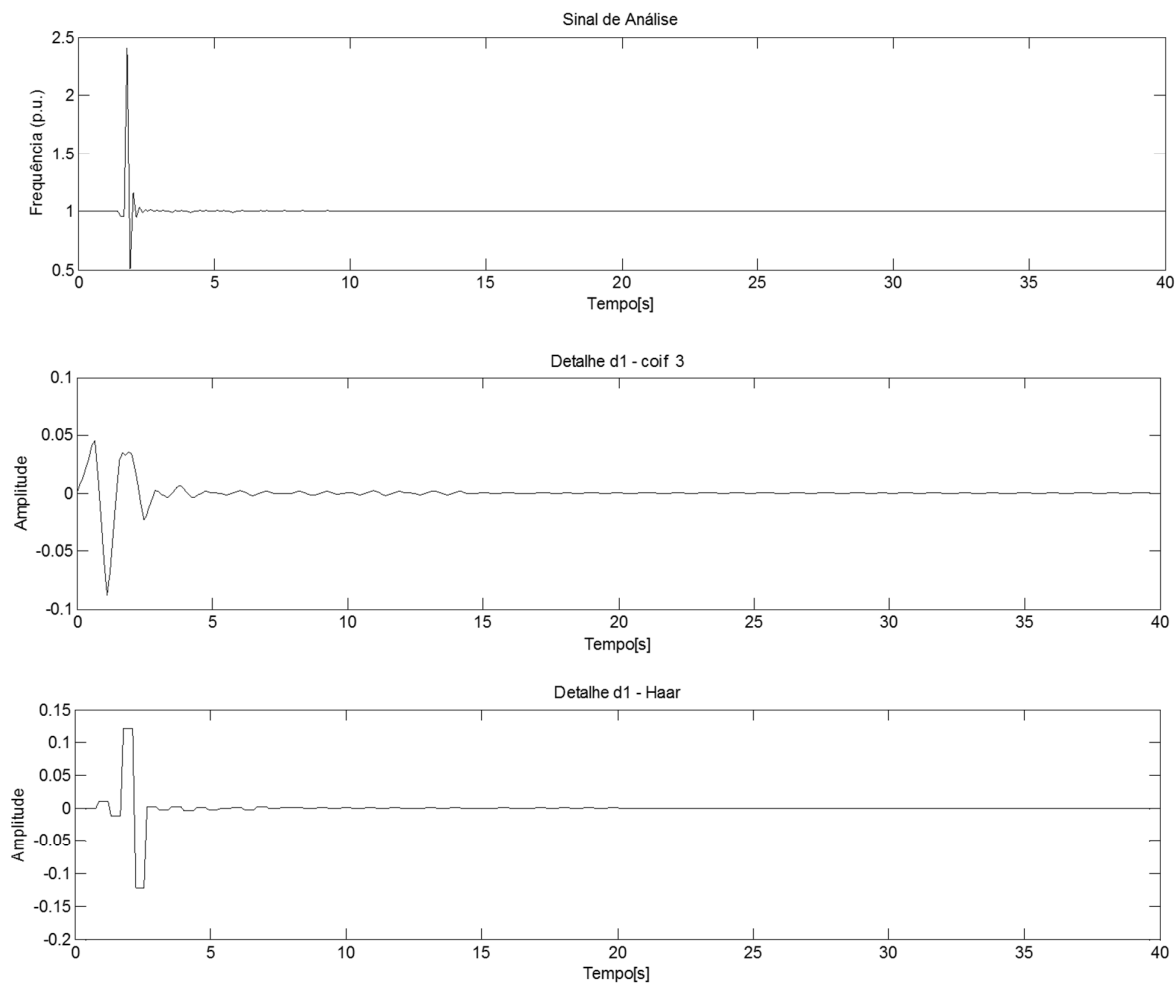


Figura 84: Técnica AMR na frequência do ilhamento por Curto-Circuito.  
Fonte: Autor.

### 5.4.3- Tensão no Ilhamento por Rejeição de Carga

Nas figuras 85 e 86 são mostrados os sinais de tensão e frequência no caso de ilhamento por Rejeição de Carga com aplicação da técnica AMR.

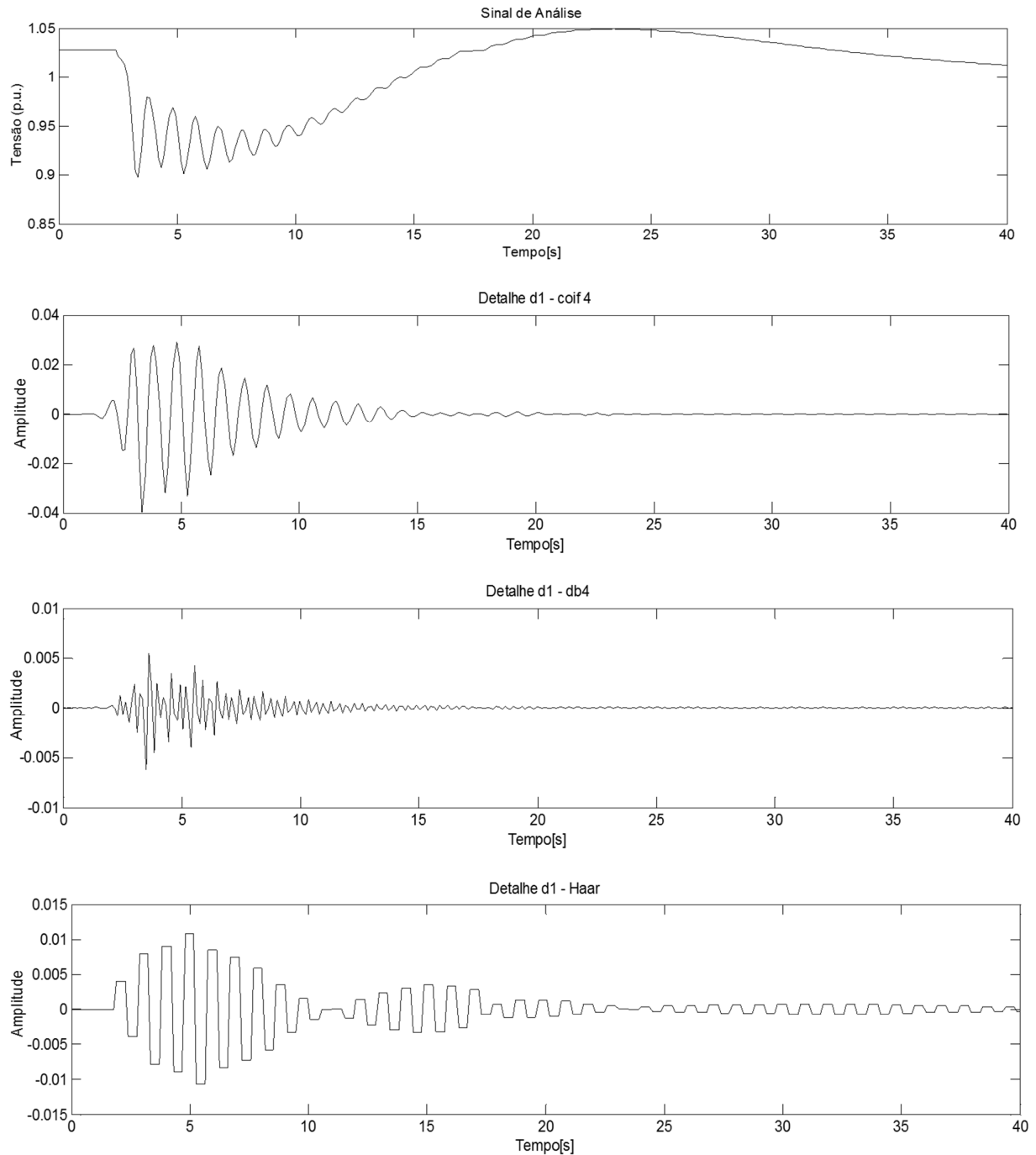


Figura 85: Técnica AMR na tensão do ilhamento por Rejeição de Carga.  
Fonte: Autor.

#### 5.4.4- Frequência no Ilhamento por Rejeição de Carga

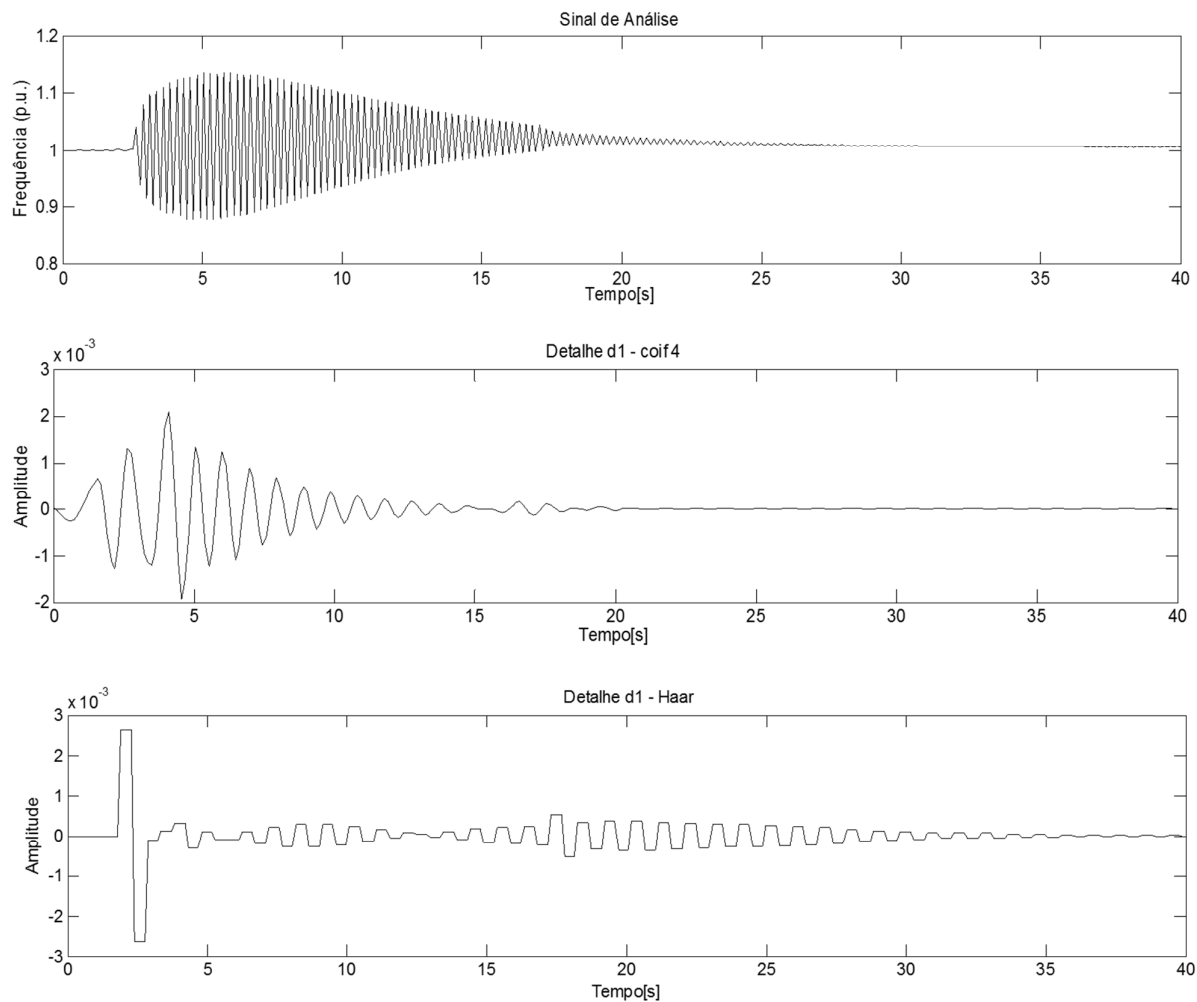


Figura 86: Técnica AMR na frequência do ilhamento por Rejeição de Carga.  
Fonte: Autor.

Os detalhes apresentam a decomposição do sinal realizada por uma determinada wavelet. Os detalhes apresentados para a tensão são coif4 d1, db4 d1 e haar d1. Para o sinal de frequência, os detalhes são coif4 d1 e haar d1.

### 5.4.5- Tensão no Ilhamento Intencional

Nas figuras 87 e 88 são mostrados os sinais de tensão e frequência no caso de Ilhamento Intencional com aplicação da técnica AMR.

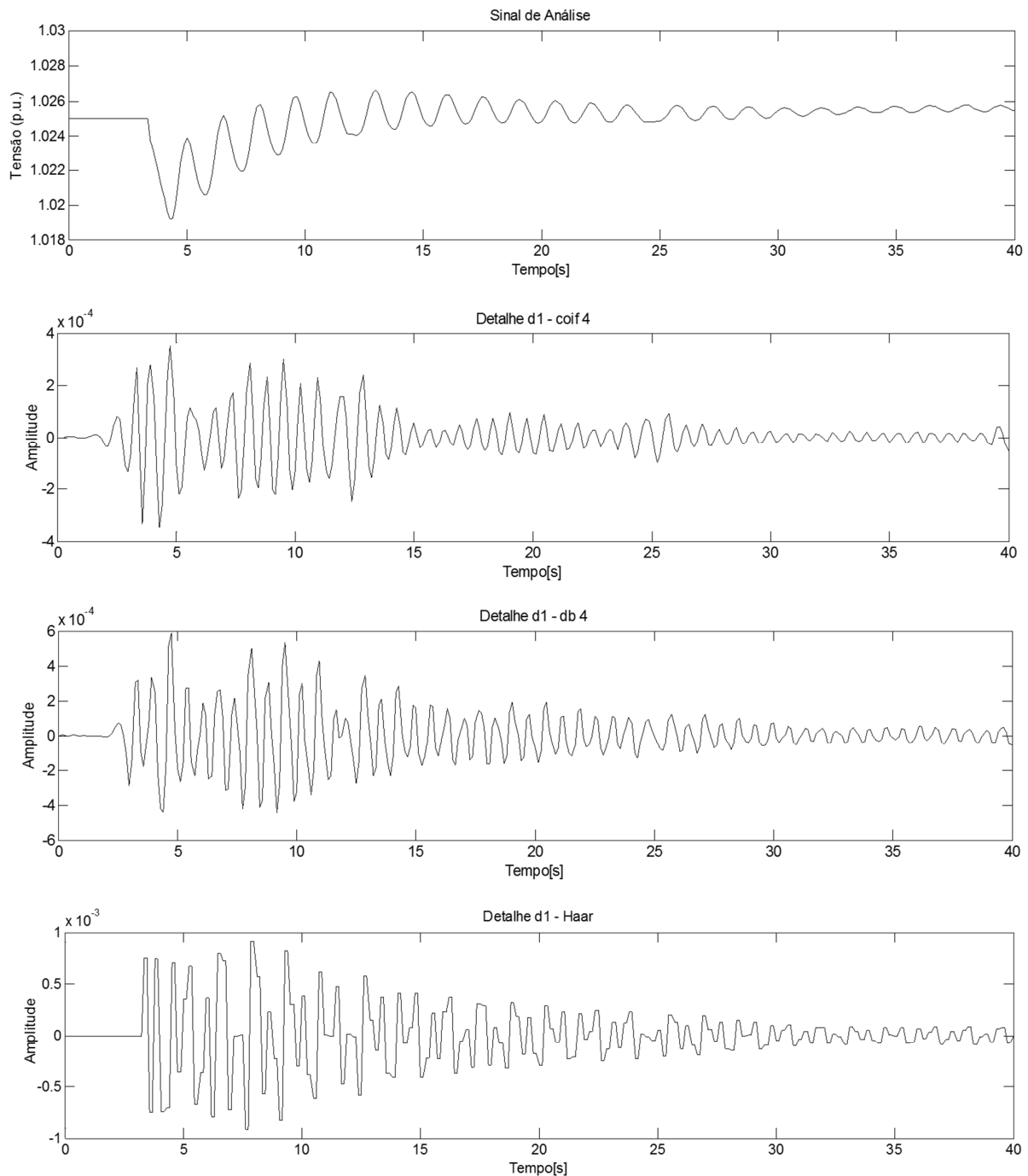


Figura 87: Técnica AMR na tensão do Ilhamento Intencional.  
Fonte: Autor.

#### 5.4.6- Frequência no Ilhamento Intencional

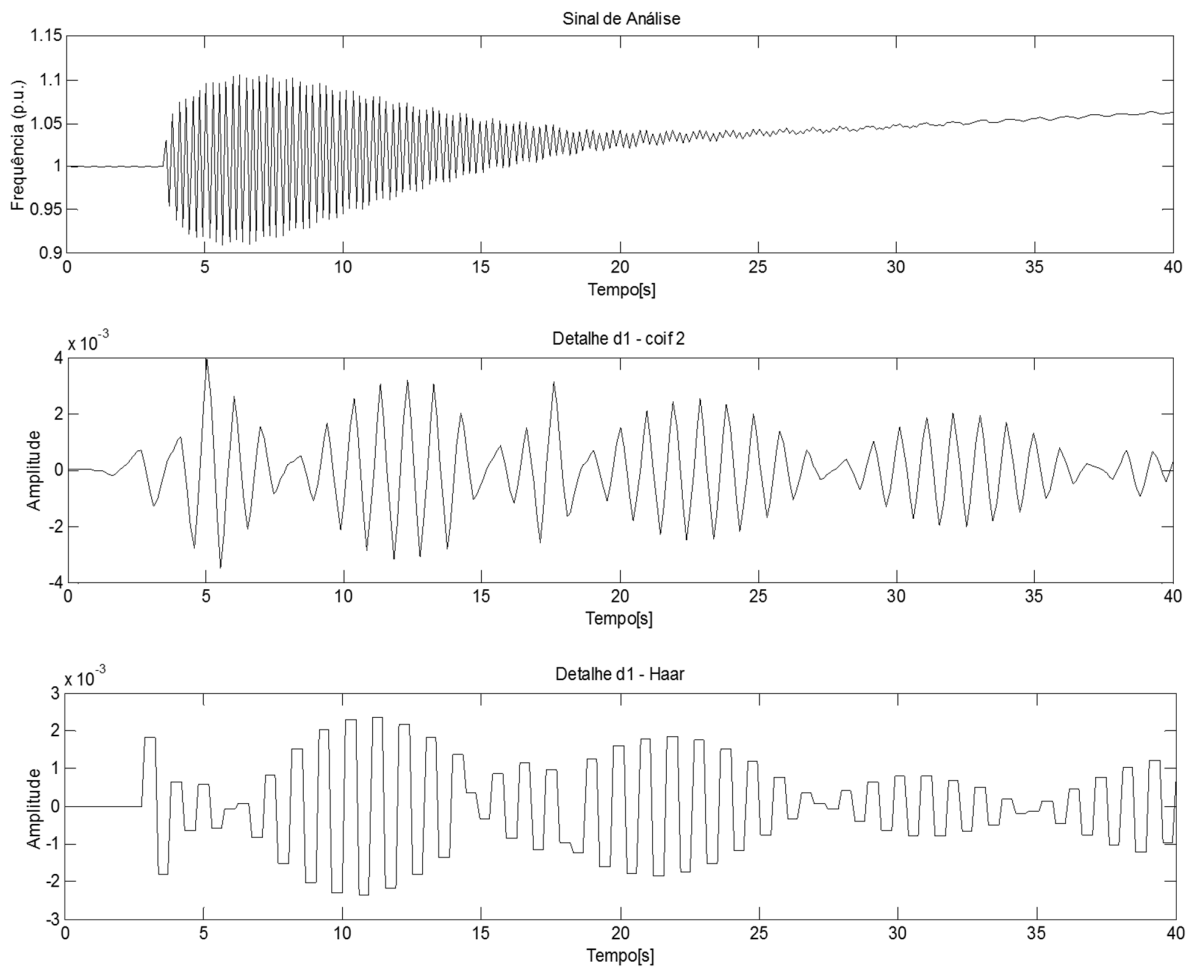


Figura 88: Técnica AMR na frequência do Ilhamento Intencional.  
Fonte: Autor.

Cada detalhe mostra a decomposição do sinal realizada por uma determinada wavelet. No caso do sinal de tensão, os detalhes são coif4 d1, db4 d1 e haar d1. Para o sinal de frequência, os detalhes são coif2 d1 e haar d1.

Pode-se observar que, em todos os casos apresentados anteriormente, com a aplicação da técnica AMR, de acordo com as famílias wavelets analisadas, nenhuma delas consegue detectar os distúrbios dos sinais de análise (tensão e frequência) no momento exato de sua ocorrência. Algumas famílias detectam o distúrbio com um adiantamento ou atraso no sinal, ou também não apresentam de forma clara o distúrbio aplicado. A precisão de detecção deste grupo

de famílias testadas não foi satisfatória. Sendo assim, não são totalmente adequadas para esta análise.

## 5.5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado nos estudos de casos e testes realizados com os diversos tipos de Wavelet Mães, concluímos que a família que melhor atendeu foi a família Symlet com os níveis e detalhes apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Família Wavelet mãe adequada para cada distúrbio.

DISTÚRBIO	FAMÍLIA WAVELET	NÍVEL	DETALHE
Curto-Circuito	Symlet	3	d1
Rejeição de Carga	Symlet	4	d3
Ilhamento Intencional	Symlet	3	d1

Fonte: Autor.

Quando a unidade industrial se isola do sistema supridor confirma-se que os elementos de controle elevam a tensão a valores demasiadamente altos, fazendo com que as turbinas a vapor aumentem sua velocidade, podendo atingir valores perigosos, com consequente disparo da frequência.

É de extrema importância para uma unidade sucroenergética, produtora de energia elétrica, preservar a integridade de seus equipamentos, como motores e geradores, uma vez que são dispositivos de extrema importância para a continuidade do processo da usina. A TW é mais uma ferramenta para auxiliar numa eficiente detecção de distúrbios que possam levar a um ilhamento dessa unidade do restante do sistema elétrico.

O ilhamento de uma unidade de cogeração pode acarretar problemas de instabilidade transitória da dinâmica dos sistemas de potência. Desta forma, é importante a unidade possuir sistemas de proteção anti-ilhamentos eficientes para minimizar os possíveis danos ao sistema elétrico da unidade e também ao sistema em que está interligada.



# CAPÍTULO VI

## CONCLUSÕES FINAIS

### 6.1- CONCLUSÃO

Através de uma revisão bibliográfica, verificou-se que a conexão das unidades de Geração Distribuída no sistema elétrico pode interferir na operação do sistema de forma positiva ou negativa. Uma dessas formas negativas seria a não manutenção da QEE com os ilhamentos do sistema elétrico principal, pois geradores de pequeno porte normalmente não têm recursos suficientes para manter as tensões e frequência em níveis adequados aos consumidores. Porém, é muito importante além de conhecer profundamente os fenômenos e seus efeitos, identificar o local da ocorrência do mesmo e o tempo que ocorreu.

Com esse intuito, o presente trabalho apresentou uma ferramenta computacional, com os programas MATLAB e PSAT, para identificação de distúrbios na rede elétrica, oriundos de geradores síncronos das unidades de GD ou da própria rede de distribuição. Foi desenvolvido um algoritmo para análise de tensão e frequência, com a finalidade de identificar antecipadamente os distúrbios de ilhamento e evitar colapsos de tensão e frequência nos sistemas de GD e danos aos equipamentos.

Nos sistemas de cogeração das unidades sucroenergéticas podem acontecer sobretensões que venham a danificar os equipamentos elétricos do sistema. A presença do gerador do produtor independente com os seus controles possui uma influência significativa no comportamento do sistema perante a perturbação aplicada, no sentido de interferir na QEE. Desta forma, é indispensável a necessidade de analisar o impacto trazido pela inclusão de geradores distribuídos no sistema elétrico, de modo que este possa atender consumidores com um padrão adequado de QEE.

Utilizada em larga escala nos dias de hoje, a Transformada Wavelet tem grande aplicação, principalmente na área de SEP. Este foi um dos fatores para a utilização desta ferramenta e também pela possibilidade de obter informações tanto no domínio do tempo como no da frequência. Outro fator importante é que a Transformada Wavelet possui uma gama de funções base, as chamadas wavelets mães, diferentemente da Transformada de Fourier que

possui somente funções seno e cosseno como funções base. Diante desta possibilidade de escolha de diferentes wavelets mães, foi realizado um estudo, no decorrer da pesquisa, sobre quais seriam as mais adequadas para utilização neste trabalho.

A Transformada Wavelet, foi explorada através da técnica AMR, sendo utilizada com sucesso, uma vez que oferece, diretamente, resultados satisfatórios na análise de distúrbios no sistema de potência. A técnica AMR foi explorada também na sua capacidade de extrair características únicas para os diferentes distúrbios (diferenciando o conteúdo de frequência existente em cada distúrbio analisado), possibilitando o desenvolvimento do algoritmo de detecção dos diferentes distúrbios de ilhamentos.

De acordo com os resultados apresentados nas simulações apresentadas no capítulo 5, 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.

É importante lembrar que todos os equipamentos nos sistemas de potência são protegidos ao menos por um relé de proteção. Verifica-se que para o caso de ilhamento intencional (caso 3), o sistema ilhado deve ter um sistema de proteção que possa identificar rapidamente esta ocorrência, pois a tensão e frequência do sistema neste caso não se estabilizam em tempo satisfatório, do ponto de vista de operação de geradores e turbinas da unidade cogeradora.

Com o grande aumento da geração de energia de unidades distribuídas procedente de fontes limpas e renováveis, como as usinas sucroenergéticas, torna-se de suma importância a análise do impacto da conexão dessas novas fontes de energia ao sistema elétrico de distribuição. Isto para que se forneça uma energia de boa qualidade ao consumidor final. Fica comprovado que a ferramenta Wavelet é mais uma ferramenta de grande eficiência para colaborar nesse tipo de controle.

## 6.2- TRABALHOS FUTUROS:

Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de temas de pesquisa que irão contribuir para o avanço dos assuntos discutidos nesta dissertação, conforme apresentados a seguir:

- Considerar a aplicação de dispositivos de controle de tensão tais como reguladores automáticos e banco de capacitores ao longo do sistema de distribuição como controle para complementar o sistema de GD;
- Análises comparativas entre geradores síncronos e geradores de indução para aplicação em sistemas de geração distribuída, utilizando as técnicas Wavelet;
- Analisar situações de vários geradores distribuídos presentes no ilhamento, em caso de operação em micro-redes;
- Utilização da TW para análise transitória de dinâmica de sistemas elétricos de potência.
- Montagem de banco de dados para mensurar o tempo de ilhamento na geração distribuída, com a utilização da técnica AMR da TW.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GONÇALVES, L. F. **Contribuições para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída**, 156 p. Dissertação de Mestrado Engenharia Elétrica. UFRS, 2004.
- [2] PERES, L. M. **Estudos do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de Geração Distribuída via ATPDraw**. Dissertação de Mestrado. FEELT/UFU. 2013.
- [3] DIAS, M. V. X., **Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005.
- [4] BRIGHENTI, C. R. F. **Integração do Cogenerador de Energia e do Setor Sucroalcooleiro com o Sistema Elétrico**, 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2003.
- [5] BRITO M. P. **Geração Distribuída: Critérios e Impactos na Rede Elétrica**, 2007. UFES - Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2007.
- [6] BRUNO, S.; BENEDICTIS, M. de; SCALA Scala, M. la. **Taking the pulse of Power Systems: Monitoring Oscillations by Wavelet Analysis and Wide Area Measurement System**. IEEE Power Systems Conference and Exposition - PSCE '06. Pag. 436-443. 29 de Outubro. 2006.
- [7] BRUSTOLIN, G. **Deteção e Análise de Eventos de Ilhamento Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados e a Transformada Wavelet Discreta**. Dissertação Engenharia Elétrica – UFSC, Florianópolis, 2013.
- [8] MARQUES, F. A. S; MORÁN, J. A; ABREU, L; FREITAS, W. **Impactos da Expansão da Geração Distribuída nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Artigo técnico apresentado na AGRENER 2004, UNICAMP, Campinas, 2004.
- [9] FERREIRA, J. C; GUIMARÃES, G. C. **Utilização da Transformada de Wavelet para Detectar Variações Anormais de Frequência em Sistemas de Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado. FEELT/UFU. 2009.
- [10] KIM, J. E.; HWANG, J. S. **Islanding Detection Method of Distributed Generation Units Connected to Power Distribution Systems**. IEEE Power system Technology Conference. Pag. 643 a 647. 2000.
- [11] TOLEDO, L. F. R. B.; LAZAZARETTI, A. E.; CAMPANELLI, L. V. A.; ROCHA, J. E. **Classificação de Problemas de Qualidade de energia Utilizando a Transformada Wavelet Discreta**. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE). Santos/SP. 2007.
- [12] OLIVEIRA, M. O. **Proteção Diferencial de Transformadores Trifásicos Utilizando a Transformada Wavelet**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

- [13] ARAÚJO, L. C. **Banco de Filtros Wavelets com Fator de Escala Maior que Dois**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG. Belo Horizonte, 2011.
- [14] ROBERTSON, D. C. et al. **Wavelets and Eletromagnetic Power System Transients**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.11, n.2, p.1050-1058, Apr. 1996.
- [15] HUANG, S. J.; HSIEH, C. T.; HUANG, C. L. **Application of wavelets to classify power system disturbances**. Electric Power Systems Research, v.47, p.87-93, Mar. 1998.
- [16] SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. **Electric Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform Analysis**. IEEE International Symposium, p.166-169, Oct. 1996.
- [17] ABDEL-GALIL, T. K.; EL-SASDANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. **Power Quality Assessment in Deregulated Power Systems**. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, v.2, p.952-958. 2002.
- [18] MAGNAGO, F.; ABUR, A. **Fault location using wavelet**. Transactions on Power Delivery, IEEE. Vol. 13. Pag. 1475-1480. Out. 1998.
- [19] MEGAHED, A.; MOUSSA, A. M.; ELREFAIE, H. B.; MARGHANY, Y. **Selection of a Suitable Mother Wavelet for Analyzing Power System Fault Transients**. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 2008.
- [20] REN, J.; KEZUNIC, M. **Real-Time Power System Frequency and Phasors Estimation Using Recursive Wavelet Transform**. Transactions on Power Delivery, IEEE, Vol. 26, Nº 3, Pag. 1392-1402. July 2011.
- [21] SOUSA NETO, C. M. **Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet**. Dissertação de Mestrado Engenharia Elétrica. UFRN, 2013.
- [22] MAMEDE FILHO, J & MAMEDE RIBEIRO, D. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [23] SEVERINO, M. M, **Avaliação Técnica - Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia**, 2008, 355p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD- 027/08, Universidade de Brasília, 2008.
- [24] CRUZ, J. L. C. Setor Elétrico - Artigo: **Geração Distribuída**. Edição 93, out. 2013. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-artigos-e-materias/1121-geracao-distribuida.html>> Acessado em: 25 nov. 2015.
- [25] BRASIL, **Decreto n.º 5.163**, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autoriza de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov/legislacao>>. Acessado em: 21 nov. 2015.

- [26] ANDRADE, M. **Uma variável já estratégica para o desenvolvimento da economia**. Canal Energia, Set/2008, Mercado livre. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublicher/materias/Busca.asp?id=66898>>. Acessado em: 20 nov. 2015.
- [27] KUIAVA, R. **Projeto de Controladores para o Amortecimento de Oscilações em Sistemas Elétricos com Geração Distribuída**, 2010. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, USP-EESC, São Carlos, 2010.
- [28] ANEEL – Legislação: **Comercialização de Energia Elétrica**. Lei 10848/2004. Disponível em: <<http://biblioteca.aneel.gov.br/index.html>>. Acessado em: 05 dez. 2015.
- [29] HERNÁNDEZ, T. K. V. **Uma proposta de integração da geração distribuída, por meio das usinas virtuais, ao sistema elétrico do estado de São Paulo**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia, IEA da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2015.
- [30] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. 2ªed. *Electrical power systems quality*. New York, McGraw-Hill. 1996.
- [31] INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Geração distribuída e sua conexão à rede elétrica**. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd)>. Acessado em 13 jan. 2016.
- [32] MOURA, F. A. M. **Geração Distribuída – Impactos e Contribuições para a Qualidade de Energia Elétrica Dinâmica dos Sistemas Elétricos – Uma Análise Através do ATP-EMTP**. Tese de Doutorado. FEELT/UFU. 2011.
- [33] NASTARI, P. M. Agroanalysis (FGV) - Artigo: **A Importância do Setor Sucroenergético no Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://www.agroanalysis.com.br/3/2012/mercado-negocios/producao-sustentavel-a-importancia-do-setor-sucroenergetico-no-brasil>>. Acessado em: 06 dez. 2015.
- [34] BIODIESELBR. Biodieselbr Online Ltda. **PróAlcool - Programa Brasileiro de Alcool**. 2013. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/htm>. Acessado em 16 dez. 2015.
- [35] TÁVORA, Fernando Lagares. **História e Economia dos Biocombustíveis no Brasil**. Textos para discussão 89. Centro de Estudos da Consultoria do Senado, Brasília, abr. 2011. Disponível em: <[www.senado.gov.br/senado/conleg/textos\\_discussao/TD89-Fernando\\_Lagares.pdf](http://www.senado.gov.br/senado/conleg/textos_discussao/TD89-Fernando_Lagares.pdf)>. Acessado em 18 dez. 2015.
- [36] UNICA - União das Indústrias de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/documentos/documentos/>>. Acessado em: 28 nov. 2015.
- [37] DENNY, F. I., DISMUKES, D. E. **Power System Operations and Electricity Markets**. Boca Raton: CRC Press, 152 p. 2002.
- [38] CIGRÉ WORKING GROUP 37.23. **Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system**. CIGRÉ Technical Report. Paris, 50 p. 1999.
- [39] CIRED WORKING GROUP 04. **Dispersed generation**. CIRED Preliminary Report for Discussion at CIRED Nice, 42 p. 1999.

- [40] VIEIRA JR, J. C. M. **Detecção de ilhamento de geradores distribuídos: uma revisão bibliográfica sobre o tema.** Artigo: Revista Eletrônica de Energia, Unifacs, Universidade de Salvador, 2011. Disponível em: <<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/viewFile/1301/1249>>. Acessado em: 22 dez. 2015.
- [41] KUMPULAINEN, L.K.; KAUHANIEMI, K.T. **Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing.** Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES. Pág 603 a 608. Vol. 1. 10 a 13 de Outubro. 2004.
- [42] NAISANI, P.; THOLOMIER, D.; YIP, T.; LLOYD, G.J. **Protection of Distributed Generation (DG) interconnection.** 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers. Pág. 1-17. 29 de Março a 01 de Abril. 2010.
- [43] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE), **IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems.** IEEE Std 929-2000, 2000.
- [44] NASCIMENTO, K. V. **Metodologia de Análise de Variações de Tensão causadas pela Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos.** Dissertação de Mestrado Engenharia Elétrica, EESC/USP da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- [45] PERSSON, D. **Islanding Detection in Power Electronic Converter Based Distributed Generation.** Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University Malmo, Sweden, 2007.
- [46] CAMPITELLI, E. M. **Análises e estudos para alocação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração distribuída.** Dissertação Mestrado, UNESP. São Paulo, 2007.
- [47] WALLING, R. A.; MILLER, N. W. **Distributed Generation Islanding – implications on power system dynamic performance.** In: 2002 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1-2002, Chicago. Proceedings...[S. l.: s. n.]. p. 92-96.
- [48] LONDERO, R. R.; AFFONSO, C. M.; NUNES, M. V. A.; FREITAS, W. **Planned islanding for Brazilian system reliability.** In: Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES. Vol. 19-22, p. 1-6, April, 2010.
- [49] MULHAUSEN, J.; SCHAEFER, J.; MYNAM, M.; GUZMAN, A.; DONOLO, M. **Anti-islanding today, successful islanding in the future.** In: Protective Relay Engineers, 2010 63rd Annual Conference for. p.1-8, March/April, 2010.
- [50] MOTA, W. S. **Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência.** Campina Grande, PB. EPGRAF. 2006.
- [51] IEEE. **Committee 22 on Power Quality Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality.** IEEE Std 1159 - 1995, USA, 1995.
- [52] ARRUDA, E. F. **Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet.** Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

- [53] GÜLER, T.; GROSS, G. **Detection of Island Formation and Identification of Causal Factors Under Multiple Line Outages**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.22, Nº. 2. Pag. 505 a 513. Maio, 2007.
- [54] ANEEL. **Resolução Nº 505**. de setembro de 2003. Autoriza a empresa Winimport S.A. a estabelecer-se como Produtor Independente de Energia Elétrica, mediante a implantação da central geradora termelétrica Winimport, no Município de Imbituva, Estado do Paraná. 11 p. Novembro de 2001.
- [55] THEODORO, E. A. R.; BENEDITO, R. A. de S.; ALBERTO, L. F. C. **Método Rápido Para Identificação de Ilhamento em Sistemas Elétricos de Potência**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2010. Bonito / MS. 12 a 16 de setembro. 2010.
- [56] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE), **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. IEEE Std. 1547. 2-2008, p.1-207, April, 2009.
- [57] UL - Underwriters Laboratories Inc. **Inverters, Converters, and controllers for Use in Independent Power Systems**. UL standard 1741, 2007. Disponível em: <<http://www.inc.com/encyclopedia/underwriters-laboratories-ul.html>>. Acessado em: 10 jan. 2016.
- [58] MENON, V. V. **A New Islanding Detection Technique for Distributed Generation**. Department of Electrical and Computer Engineering. Montana State University. Bozeman, Montana, 2006.
- [59] PUJHARI, T. **Islanding detection in distributed generation**. Dissertação. Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology. 2009.
- [60] MOZINA, C. J. **Interconnection protection of IPP generators at commercial/industrial facilities**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37. Nº 3. Pág. 681 a 688. Maio e Junho. 2001.
- [61] ROCKWELL. Flexible Solutions for Your Supervisory Control and Data Acquisition Needs. Rockwell Automation Publication. 2011. Disponível em: <[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/agsg001\\_-emp.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/agsg001_-emp.pdf)>. Acessado em: 15 dez. 2015.
- [62] YIN, J.; CHANG, L.; DIDUCH, C. **Recent Developments in Islanding Detection for Distributed Power Generation**. In proceedings, 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, July 2004.
- [63] VIEIRA JR, J. C. M. **Metodologias para ajuste e avaliação do desempenho de relés de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos**. Tese de Doutorado. Departamento de Sistemas de Energia Elétrica. Unicamp. Campinas, 2006.
- [64] KANE, P. O.; FOX, B. **Loss of Mains Detection for Embedded Generation by System Impedance Monitoring**. IEEE International Conference on Developments in Power System Protection. Pag. 95 a 98. Nottingham. Junho. 1997.
- [65] KIM, S. K., JEON, J. H., CHOI, H. K., & KIM, J. Y. **Voltage Shift Acceleration Control for Anti-Islanding of Distributed Generation Inverters**. IEEE Trans. Power Del., 26(4), 2223-2234. 2011.



- [66] IEC, *Power System Protection*. Vocabulary, Chapter 448, IEC, 1995.
- [67] GIGUER, S. **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Porto Alegre: Sagra, 1988.
- [68] CHEMIN, N. U. **Aplicações de Controle e Supervisão Distribuídas em Subestações de Energia Elétrica Através do Uso de Relés Digitais de Proteção**. 2008. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.
- [69] GUIMARÃES, G. C. **Modelagem de um Sistema Elétrico Para Estudo de Estabilidade e Rejeição de Carga**. Apostila Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos II. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2009.
- [70] SGUAÇABIA, R. R. **Avaliação do Impacto da Geração Distribuída sobre o Sistema de Proteção de Sobrecorrente de uma Rede de Distribuição Operando em Ilhamento Intencional**. Dissertação Mestrado Engenharia Elétrica. EESC-USP. São Carlos, 2015.
- [71] ABB. Disponível em: <<http://www.abb.com.br>>. Acessado em: 28 dez. 2015.
- [72] DELMAR LTDA. Disponível em: <<http://www.delmar.com.br>>. Acessado em 06 jan. 2016.
- [73] RICCIOTTI, A. C. D. **Utilização de Wavelets no Processamento de Sinais EMG**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006.
- [74] DAUBECHIES, I. **Where Do Wavelets Come From? – A Personal Point of View**. Proceedings of the IEEE, 1996.
- [75] KIM, C. H.; AGGARWAL, R. **Wavelet tranforms in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet tranforms**. Power Engineering Journal, 2000.
- [76] CHUI, C. K. **An introduction to wavelets**. Academic Press. 1992.
- [77] MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. **MATLAB - Wavelet Toolbox, User's Guide**. R2014b. Natick, MA. United States, 2014.
- [78] MALLAT, S. **A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation**. IEEE Transactions on FAMI, 1989.
- [79] MILANO F. PSAT **Power System Analysis Toolbox Manual for PSAT**, version 2.1.2, 26 de junho de 2008, Universidad de Castilla-La Mancha, Espanha, 2008.
- [80] VALINS, T. F. **Relé Digital de Distância Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

# ANEXO I

## Algoritmo para detecção de variações nos sinais de tensão e frequência

%DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS DE ILHAMENTOS = Nome do algoritmo para detectar o distúrbio (Wavelet)

```
y2=input('Entre com o Vetor Sinal');
ts=input('Entre com o Tempo de Simulação do Vetor Sinal');
sinal=y2;
```

```
Amosty1 = length(y1);
Amosty2 = length(y2);
%ts; % Tempo de simulação do sinal no simulink
ty1=0:(ts/(Amosty1 - 1)):ts;
ty2=0:(ts/(Amosty2 - 1)):ts;
ty1=ty1';
ty2=ty2';
Amostragem = length(sinal);
figure(1)
subplot(2,1,1);plot(ty1,y1);title('Sinal de
Referência');ylabel('Amplitude');
subplot(2,1,1);plot(ty2,y2);title('Sinal de
análise');xlabel('Tempo[s]');ylabel('Amplitude');
```

```
%wavemae='sym3';
wavemae='sym3';
[c,l] = wavedec(sinal,4,wavemae);
```

```
ca3 = appcoef(c,l,wavemae,3);
cd3 = detcoef(c,l,3);
cd2 = detcoef(c,l,4);
cd1 = detcoef(c,l,2);
```

```
Amost = length(y1);
```

```
Amostcd3 = length(cd3);
Amostcd2 = length(cd2);
Amostcd1 = length(cd1);
```

```
tcd3 = 0:(ts/(Amostcd3 - 1)):ts;
tcd2 = 0:(ts/(Amostcd2 - 1)):ts;
tcd1 = 0:(ts/(Amostcd1 - 1)):ts;
```

```
a3 = wrcoef('a',c,l,wavemae,3);
d3 = wrcoef('d',c,l,wavemae,3);
d2 = wrcoef('d',c,l,wavemae,2);
d1 = wrcoef('d',c,l,wavemae,2);
Amosta3 = length(a3);
Amostd3 = length(d3);
Amostd2 = length(d2);
Amostd1 = length(d1);
```

```

ta3 = 0:(ts/(Amosta3 - 1)):ts;
td3 = 0:(ts/(Amostd3 - 1)):ts;
td2 = 0:(ts/(Amostd2 - 1)):ts;
td1 = 0:(ts/(Amostd1 - 1)):ts;

figure(1)
plot(ty2,y2);title('Sinal de
análise');xlabel('Tempo[s]');ylabel('Amplitude');
figure(2)
subplot(2,1,1);plot(ta3,a3);title('Aproximação a3');ylabel('Amplitude');
subplot(2,1,2);plot(td3,d3);title('Detalhe d3');xlabel('Tempo[s]');ylabel
('Amplitude');
figure(3)
subplot(2,1,1);plot(td2,d2);title('Detalhe d2');ylabel('Amplitude');
subplot(2,1,2);plot(td1,d1);title('Detalhe
d1');xlabel('Tempo[s]');ylabel('Amplitude');

figure(2)
subplot(2,1,1);plot(ty2,y2);title('Sinal de Analise');ylabel('Amplitude');
subplot(2,1,2);plot(td1,d1);title('Detalhe
d1');xlabel('Tempo[s]');ylabel('Amplitude');

% d1 vetor frequência a ser analisado
absd1=abs(d1); % valores absolutos para referência
absd1=(d1);
meand1=mean(absd1);

tmad1 = length(d1);
%ts=40; % Tempo de simulação do sinal no simulink
td1=0:(ts/(tmad1 - 1)):ts;
td1=td1';

if meand1>0

    disp('***** Disturbio Detectado *****')

end

tamanho = size(absd1);

for i=1:tamanho
    [M,I] = max(absd1);
    if M~=0
        variacao(i)=M;
        posicao(i)=I;
        d1(I)=0 ;
        for p=I:(I+5)
            I=I+1;
            d1(I)=0 ;
        end
    end
end;
variacao=variacao';
variacao=sort(variacao);
%plot(variacao);
posicao=posicao';
disp('Tempos de PICO ')
tempodomaxpico=td1(posicao(1))
%tempodomaxpico2=td1(posicao(2))

```

## ANEXO II

### Dados do Software PSAT (Manual do software)

O manual contendo todos os dados do software PSAT está disponível em: <http://power.uwaterloo.ca/~fmilano/psat.htm>

### MODELOS DOS EQUIPAMENTOS

#### Máquina Síncrona

O PSAT utiliza o modelo de Park-Concordia para representar as equações das máquinas síncronas, como mostrado no esquema da figura 1. É possível escolher desde modelo clássico (2ª ordem) até um modelo de 8ª ordem, no qual considera-se os efeitos da saturação magnética. A figura 2 representa o diagrama de blocos dos eixos d e q dos fluxos do estator (6ª ordem).

A relação entre os fasores da rede e a tensão da máquina são dadas por:

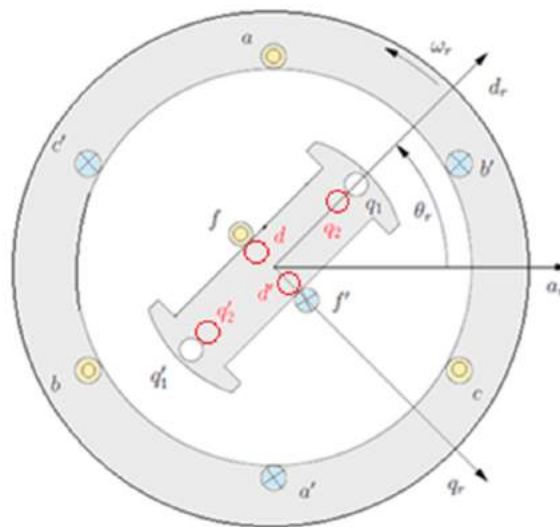
$$v_d = v_h \sin(\delta - \theta_h)$$

$$v_q = v_h \cos(\delta - \theta_h)$$

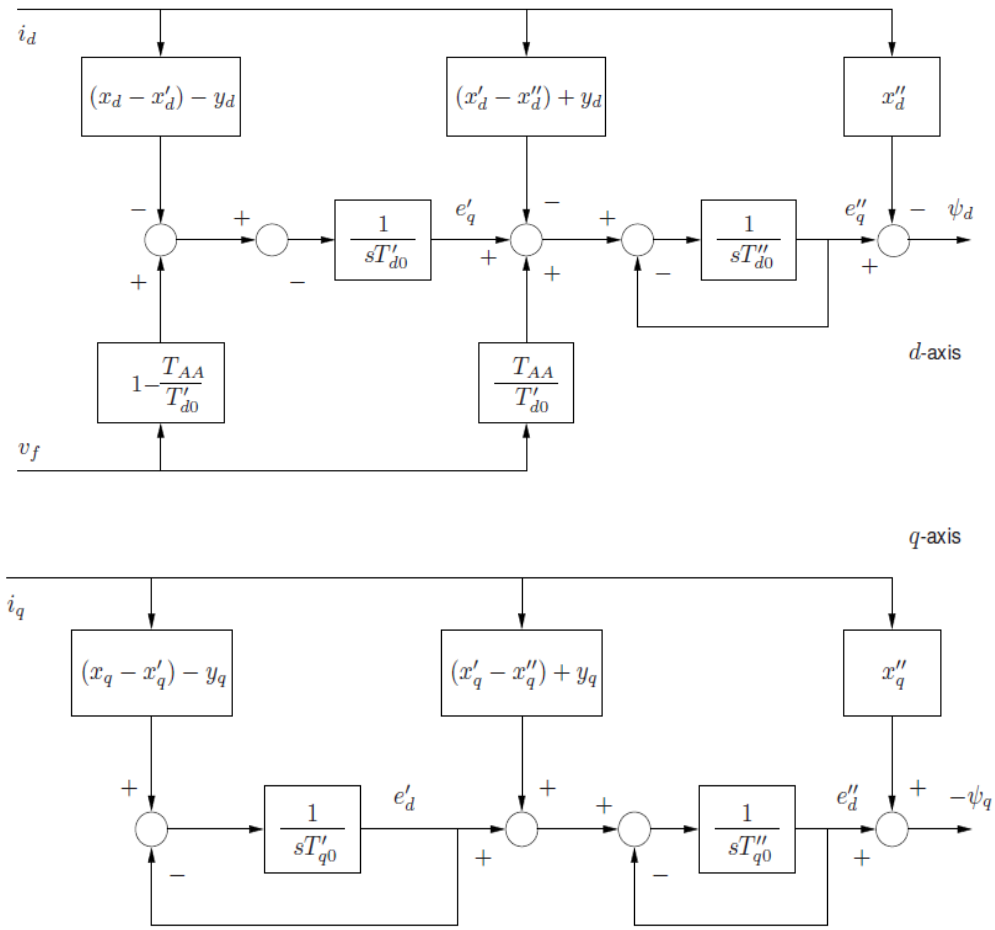
As potências injetadas são expressas por:

$$P = v_d i_d + v_q i_q$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q$$



**Figura 1:** Esquema de uma máquina síncrona trifásica.



**Figura 2:** Diagrama de blocos dos eixos **d** e **q** dos fluxos do estator.

Potência Elétrica:

$$p_e = (v_q + r_a i_q) i_q + (v_d + r_a i_d) i_d$$

Relações entre as tensões e correntes da máquina:

Assumindo:

$$x_q = x'_d$$

Temos:

$$0 = v_q + r_a i_q - e'_q + x'_d i_d$$

$$0 = v_d + r_a i_d - x'_d i_q$$

Equações de Transformação de Park do eixo **abc** para **dq**:

$$V_d = \frac{2}{3} (V_a \sin(\omega t) + V_b \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}))$$

$$V_q = \frac{2}{3} (V_a \cos(\omega t) + V_b \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}))$$

Equações de Transformação de Park do eixo **dq** para **abc**:

$$V_a = V_d \sin(\omega t) + V_q \cos(\omega t) + V_0$$

$$V_b = V_d \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_q \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_0$$

$$V_c = V_d \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_q \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_0$$

### Parâmetros da Máquina Síncrona

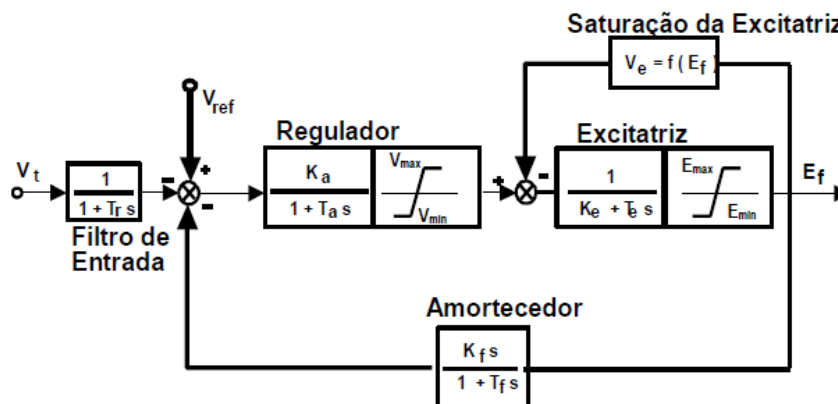
Na tabela abaixo são apresentados os parâmetros do modelo utilizado nas simulações desta dissertação.

Variável	Descrição	Unidade
$r_a$	Resistência de armadura	p.u.
$x_d$	Reatância síncrona de eixo direto	p.u.
$x'_d$	Reatância transitória de eixo direto	p.u.
$x_q$	Reatância síncrona de eixo em quadratura	p.u.
$x''_d$	Reatância subtransitória de eixo direto	p.u.
$x''_q$	Reatância subtransitória de eixo quadratura	p.u.
$T'_d$	Constante de tempo transitória de eixo direto em curto-circuito	s
$T'_{do}$	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto	s
$T'_q$	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em curto-circuito	s
$T'_{qo}$	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto	s
$T''_d$	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em curto-circuito	s
$T''_{do}$	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto	s
$T''_q$	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura curto-circuito	s
$T''_{qo}$	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura circuito aberto	s
$M=2H$	Coefficiente de inércia (2X Constante de Inércia H)	kWs/kVA

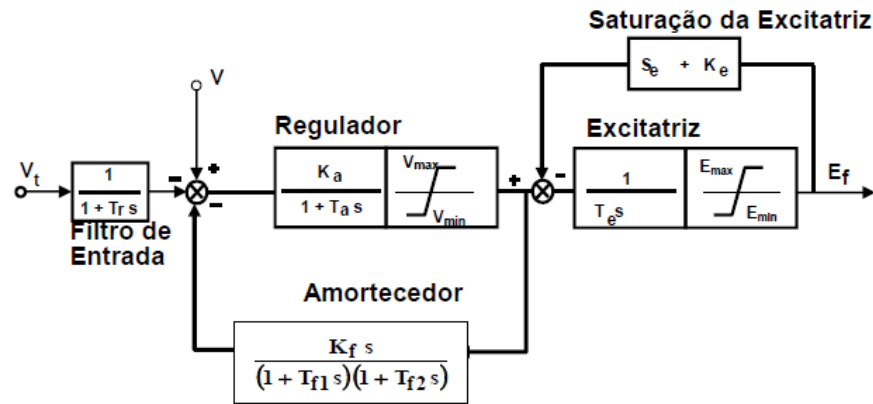
D	Coeficiente de amortecimento do Gerador Síncrono	p.u.
$K_{\omega}$	Ganho de realimentação de velocidade	-
$K_p$	Ganho de realimentação de potência ativa	-
$T_{AA}$	Constante de tempo de dispersão adicional ao eixo d	s

## Regulador Automático de Tensão (AVR)

Reguladores Automáticos de Tensão determinam a regulação primária de tensão das máquinas síncronas. Os modelos originados pelas recomendações do IEEE são apresentados na figura 3 e 4. São referenciados como IEEE tipo I e IEEE tipo II, respectivamente. Em todas as simulações apresentadas neste trabalho foi utilizado o modelo AVR tipo II.



**Figura 3:** Modelo de Regulador de Tensão tipo I do IEEE.



**Figura 4:** Modelo de Regulador de Tensão tipo II do IEEE.

### Parâmetros do Regulador Automático de Tensão (AVR)

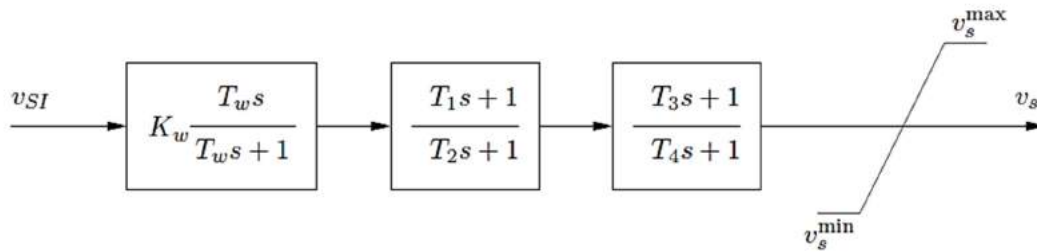
Variável	Descrição	Unidade
$V_t$	Tensão na barra de geração independente	p.u.
$V_{ref}$	Tensão de referência	p.u.
$V_{max}$	Limite máximo da tensão de saída	p.u.
$V_{min}$	Limite mínimo da tensão de saída	p.u.
$T_a$	Constante de tempo amplificada	s
$T_f$	Constante de tempo do circuito estabilizador	s
$T_r$	Constante de tempo do filtro de entrada	s
$T_e$	Constante de tempo da excitatriz	s
$E_{max}$	Máxima tensão de saída da excitatriz (aplicada ao campo do gerador)	p.u.
$E_{min}$	Mínima tensão de saída da excitatriz (aplicada ao campo do gerador)	p.u.
$K_a$	Ganho do regulador	-
$K_f$	Ganho de tempo do circuito estabilizante	-
$T_a$	Zero do regulador	s
$T_e$	Polo do regulador	s
$E_f$	Referência da tensão de campo	p.u.



## Estabilizador do Sistema de Potência (PSS)

Geralmente os PSS são usados para amortecimento de oscilações de sistemas de potência e diversos modelos têm sido propostos na literatura.

Todos os modelos aceitam como sinal de entrada a velocidade do rotor, a potência ativa e a magnitude de tensão da barra ao qual o estabilizador está conectado através do regulador de tensão. Em todas simulações, neste trabalho, foi utilizado o modelo de PSS tipo II da figura 5.



**Figura 5:** Estabilizador de Sistema de Potência tipo II.

$$\dot{v}_1 = \frac{-(K_\omega v_{s1} + v_1)}{T_\omega} \quad \dot{v}_2 = \frac{\left( \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_\omega v_{s1} + v_1) - v_2 \right)}{T_2}$$

$$\dot{v}_3 = \frac{\left( \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left( v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega v_{s1} + v_1) \right) - v_3 \right)}{T_4}$$

$$\dot{v}_s = \frac{\left( v_3 + \frac{T_3}{T_4} \left( v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega v_{s1} + v_1) \right) - v_s \right)}{T_e}$$

### Parâmetros do Estabilizador de Sistema de Potência (PSS)

Variável	Descrição	Unidade
$V_{S \max}$	Máximo sinal de saída do estabilizador	p.u.
$V_{S \min}$	Mínimo sinal de saída do estabilizador	p.u.
$K_W$	Ganho do regulador	-
$T_W$	Constante de tempo washout	s
$T_1$	Constante de tempo do bloco avanço-atraso	s
$T_2$	Constante de tempo do bloco avanço-atraso	s
$T_3$	Constante de tempo do bloco avanço-atraso	s
$T_4$	Constante de tempo do bloco avanço-atraso	s

### Carga

Neste trabalho utilizou-se o modelo convencional, conhecido como ZIP, utilizado para estudos de estabilidade. É um modelo constituído pelos seguintes elementos: impedância constante ( $Z$ ), corrente constante ( $I$ ), potência ativa constante ( $P$ ) e potência reativa constante ( $Q$ ).

Nesse modelo, os parâmetros são os coeficientes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  para a potência ativa e  $D$ ,  $E$ ,  $F$  para a potência reativa, que determinam a proporção de cada componente. Este modelo representa a dependência que a carga tem da magnitude da tensão. Observar as equações de potência a seguir:

$$P = P_0 \left( A + B\bar{V} + C\bar{V}^2 \right) \quad \text{onde} \quad \bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad \text{Potência ativa da carga à tensão 1,0 pu.}$$

$$A + B + C = 1$$

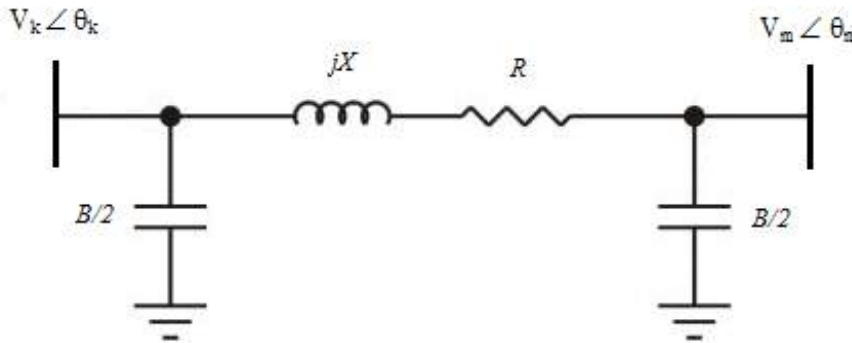
$$Q = Q_0 \left( D + E\bar{V} + F\bar{V}^2 \right) \quad \text{onde} \quad \bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad \text{Potência reativa da carga à tensão 1,0 pu.}$$

$$D + E + F = 1$$

**Obs:**  $V_0$  e  $P_0$  são grandezas medidas.

## Linha de Transmissão

O modelo de linha de transmissão utilizado, para as simulações, é o modelo equivalente  $n$ , que possui seus parâmetros fixos (resistência, reatância e capacitância). Neste modelo a reatância indutiva é dada por  $jX$ , a resistência representada por  $R$  e a reatância capacitiva por  $jB/2$ , como mostrado na figura 6.



**Figura 6:** Modelo equivalente  $n$ , representando a linha de transmissão.

### 9.14 Static Tap Changer / Phase Regulator

The Static Tap Changers / Phase Regulators (STC/SPR) are connected between a pair of AC buses, individually or as a section of a sectional branch. In the Bus Tree and diagrams, they are represented by two windings and a converter symbol in the middle.

The model of a St. TC/PR consists of two ideal transformers, each with a variable turns ratio and phase shift, on the From and To sides, a series impedance between them, as well as magnetizing admittances at the From and To buses and shunt (charging) admittance.

The off-nominal turns ratio and phase shift angle of the two transformers are determined from the tap-changer and phase-regulator parameters as:

$$\begin{aligned} T_f \angle \Phi_f &= 1 + A_T (1 - X_T) R_T + j A_P (1 - X_P) R_P \\ T_t \angle \Phi_t &= 1 - A_T X_T R_T - j A_P X_P R_P \end{aligned}$$

where

- $T_f$  : Off-nominal turns ratio of From-side transformer
- $\Phi_f$  : Phase shift angle of From-side transformer
- $T_t$  : Off-nominal turns ratio of To-side transformer
- $\Phi_t$  : Phase shift angle of To-side transformer

- $A_T$  : Tap-changer range
- $X_T$  : Tap-changer winding position
- $R_T$  : Tap-changer variable ratio
- $A_P$  : Phase-regulator range
- $X_P$  : Phase-regulator winding position
- $R_P$  : Phase-regulator variable ratio

## 11 Solving Powerflow

To solve the powerflow for the current (opened) case, use the **Solution** menu or the Solve button on the Toolbar.

Before, solution, select **Parameters...** of the **Solution** menu to open the Solution Parameters Dialog where you can examine and, if needed, modify the solution options.

Choose the Solution Algorithm from the list of:

<b>Auto:</b>	Solution starts with the Fast Decoupled method and switches to Newton-Raphson for convergence to smaller than 1 MW/MVAr tolerance.
<b>Newton-Raphson:</b>	Standard Newton-Raphson method.
<b>Fast Decoupled (XB):</b>	Standard Fast Decoupled method.
<b>Fast Decoupled (BX):</b>	Modified Fast Decoupled method that convergences better when there are AC lines with high resistance relative to their reactance.

Specify the Solution Parameters, which include:

<b>Maximum Iterations:</b>	Solution process stops if it does not converge in the specified maximum number of iterations.
<b>Blow Up:</b>	Solution is considered "diverged" if voltage changes become larger than the specified blow up value.
<b>Solution Tolerance:</b>	Solution is reached (converged) when the largest MW and MVAr mismatches of all buses becomes less than the specified tolerance, and all enabled control actions are completed.
<b>Voltage Tolerance:</b>	Voltage controls are considered completed when the voltages reach within the specified tolerance of their desired value.
<b>Zero Impedance Threshold:</b>	Lines with impedance smaller than the specified threshold are considered as "Zero Impedance Line" (their terminal buses are joined together). If you set this threshold to smaller than 0.0001, the solution may not converge because of rounding errors caused by very small impedances.
<b>Control Threshold:</b>	During the solution iterations, enabled controls are adjusted when the voltage corrections become smaller than the specified threshold. If you set this threshold too high, solution may diverge quickly. If you set it too low, switchable shunts and other controls may not switch in time to help reaching the solution (e.g., in cases where it is needed to switch in capacitors for the case to have a solution).
<b>Acceleration Factor:</b>	Factor used to correct controlled voltages. You may leave its value at 1.

## ANEXO III

### Dados do Sistema Utilizado – Modelo IEEE 09 Barras (PSAT)

POWER FLOW REPORT  
P S A T 2.1.9

Author: Federico Milano, (c) 2002-2013  
e-mail: federico.milano@ucd.ie  
website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Users\User\Documents\MATLAB\psat\tests\d\_009\_svc.mdl  
Date: 17-Jan-2016 18:02:52

#### NETWORK STATISTICS

Buses:	9
Lines:	6
Transformers:	3
Generators:	3
Loads:	4

#### SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations:	4
Maximum P mismatch [p.u.]	1,629999977
Maximum Q mismatch [p.u.]	0,500000001
Power rate [MVA]	100

#### POWER FLOW RESULTS

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 1	1,04	3,51615E-10	1,22194474	0,230279125	0	0
Bus 2	1,025000001	0,116970154	1,63	0,083487754	0	0
Bus 3	1,025000001	-0,034829569	0,51	-0,166861604	0	0
Bus 4	1,029473015	-0,065786843	4,93693E-17	1,46582E-14	0	0
Bus 5	1,001088788	-0,116423788	0	4,05231E-15	1,25	0,5
Bus 6	1,017513039	-0,115625631	-1,11022E-16	-2,77556E-16	0,9	0,3
Bus 7	1,027583867	-0,021648067	1,52656E-15	5,98133E-15	0,18	0,06
Bus 8	1,025000001	-0,078752114	4,44089E-16	0,167176915	1	0,35
Bus 9	1,034950395	-0,063005734	4,58698E-16	-2,89389E-17	0	0

**STATE VARIABLES**

delta_Syn_1	1,167341295
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	0,752739053
e1d_Syn_1	0,68674999
delta_Syn_2	0,616931074
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0,846147113
e1d_Syn_2	0,498172539
delta_Syn_3	0,106852043
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	1,05507296
e1d_Syn_3	-1,03248E-65
vm_Exc_1	1,025000001
vr1_Exc_1	0,244056132
vr2_Exc_1	-5,817857472
vf_Exc_1	2,327143009
vm_Exc_2	1,04
vr1_Exc_2	0,110177615
vr2_Exc_2	-0,813380005
vf_Exc_2	1,084506673
vm_Exc_3	1,025000001
vr1_Exc_3	0,105718594
vr2_Exc_3	-0,780867534
vf_Exc_3	1,041156675
v1_Pss_1	-50
v2_Pss_1	-4,95738E-11
v3_Pss_1	-1,31785E-09
v1_Pss_2	-50,00000002
v2_Pss_2	4,11518E-10
v3_Pss_2	4,89206E-08
v1_Pss_3	-499,9999999
v2_Pss_3	-2,04812E-09
v3_Pss_3	-1,72336E-07
bcv_Svc_1	0,159121396
x_Busfreq_1	1,89194E-09
w_Busfreq_1	1

**OTHER ALGEBRAIC VARIABLES**

vf_Syn_1	2,327143009
pm_Syn_1	1,63
p_Syn_1	1,629999977
q_Syn_1	0,083487748
vf_Syn_2	1,041156675
pm_Syn_2	0,51
p_Syn_2	0,51000004
q_Syn_2	-0,166861605
vf_Syn_3	1,084506673
pm_Syn_3	1,22194474
p_Syn_3	1,221944729
q_Syn_3	0,230279121
vref_Exc_1	1,025244105
vref_Exc_2	1,051017763
vref_Exc_3	1,025132123
vss_Pss_1	1,03685E-09
vss_Pss_2	-1,48357E-08
vss_Pss_3	5,13273E-08
vref_Svc_1	1,026591214
q_Svc_1	0,167176916

**LINE FLOWS**

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 9	Bus 8	1	0,17547826	-0,02917945	0,000418182	-0,21818035
Bus 7	Bus 8	2	0,830503364	-0,115990448	0,00556344	-0,109812632
Bus 9	Bus 6	3	0,33452178	-0,153742548	0,004127045	-0,359065783
Bus 7	Bus 5	4	0,619496612	-0,086906795	0,011799244	-0,255525482
Bus 5	Bus 4	5	-0,642302633	-0,331381314	0,004706684	-0,141448612
Bus 6	Bus 4	6	-0,569605265	-0,094676765	0,005330146	-0,136671152
Bus 2	Bus 7	7	1,629999977	0,083487748	0	0,226384992
Bus 3	Bus 9	8	0,51000004	-0,166861605	-1,11022E-16	0,016060393
Bus 1	Bus 4	9	1,221944729	0,230279121	0	0,082340807

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 8	Bus 9	1	-0,175060078	-0,1890009	0,000418182	-0,21818035
Bus 8	Bus 7	2	-0,824939924	0,006177816	0,00556344	-0,109812632
Bus 6	Bus 9	3	-0,330394736	-0,205323235	0,004127045	-0,359065783
Bus 5	Bus 7	4	-0,607697368	-0,168618687	0,011799244	-0,255525482
Bus 4	Bus 5	5	0,647009317	0,189932702	0,004706684	-0,141448612
Bus 4	Bus 6	6	0,574935412	-0,041994387	0,005330146	-0,136671152
Bus 7	Bus 2	7	-1,629999977	0,142897243	0	0,226384992
Bus 9	Bus 3	8	-0,51000004	0,182921998	-1,11022E-16	0,016060393
Bus 4	Bus 1	9	-1,221944729	-0,147938315	0	0,082340807

**GLOBAL SUMMARY REPORT****TOTAL GENERATION**

REAL POWER [p.u.]	3,36194474
REACTIVE POWER [p.u.]	0,31408219

**TOTAL LOAD**

REAL POWER [p.u.]	3,33
REACTIVE POWER [p.u.]	1,21

**TOTAL LOSSES**

REAL POWER [p.u.]	0,03194474
REACTIVE POWER [p.u.]	-0,89591781



## ANEXO IV

### Famílias Wavelets (Manual MATLAB)

#### Wavelet Families

The Wavelet Toolbox software includes a large number of wavelets that you can use for both continuous and discrete analysis. For discrete analysis, examples include orthogonal wavelets (Daubechies' extremal phase and least asymmetric wavelets) and B-spline biorthogonal wavelets. For continuous analysis, the Wavelet Toolbox software includes Morlet, Meyer, derivative of Gaussian, and Paul wavelets.

The choice of wavelet is dictated by the signal or image characteristics and the nature of the application. If you understand the properties of the analysis and synthesis wavelet, you can choose a wavelet that is optimized for your application.

Wavelet families vary in terms of several important properties. Examples include:

- Support of the wavelet in time and frequency and rate of decay.
- Symmetry or antisymmetry of the wavelet. The accompanying perfect reconstruction filters have linear phase.
- Number of vanishing moments. Wavelets with increasing numbers of vanishing moments result in sparse representations for a large class of signals and images.
- Regularity of the wavelet. Smoother wavelets provide sharper frequency resolution. Additionally, iterative algorithms for wavelet construction converge faster.
- Existence of a scaling function,  $\phi$ .

For continuous analysis, the Wavelet Toolbox software provides a Fourier-transform based analysis for select analysis and synthesis wavelets. See `cwtft` and `icwtft` for details.

For wavelets whose Fourier transforms satisfy certain constraints, you can define a single integral inverse. This allows you to reconstruct a time and scale-localized approximation to your input signal. See "Inverse Continuous Wavelet Transform" for a basic theoretical motivation. Signal Reconstruction from Continuous Wavelet Transform Coefficients illustrates the use of the inverse continuous wavelet transform (CWT) for simulated and real-world signals. Also, see the function reference pages for `icwtft` and `icwtlin`.

Entering `waveinfo` at the command line displays a survey of the main properties of available wavelet families. For a specific wavelet family, use `waveinfo` with the wavelet family short name. You can find the wavelet family short names listed in the following table and on the reference page for `waveinfo`.

Wavelet Family Short Name	Wavelet Family Name
'haar'	Haar wavelet
'db'	Daubechies wavelets
'sym'	Symlets
'coif'	Coiflets
'bior'	Biorthogonal wavelets
'rbio'	Reverse biorthogonal wavelets
'meyr'	Meyer wavelet
'dmey'	Discrete approximation of Meyer wavelet
'gaus'	Gaussian wavelets
'mexh'	Mexican hat wavelet
'morl'	Morlet wavelet
'cgau'	Complex Gaussian wavelets
'shan'	Shannon wavelets
'fbsp'	Frequency B-Spline wavelets
'cmor'	Complex Morlet wavelets

To display detailed information about the Daubechies' least asymmetric orthogonal wavelets, enter:

```
waveinfo('sym')
```

To compute the wavelet and scaling function (if available), use `wavefun`.

The Morlet wavelet is suitable for continuous analysis. There is no scaling function associated with the Morlet wavelet. To compute the Morlet wavelet, you can enter:

```
[psi,xval] = wavefun('morl',10);
plot(xval,psi); title('Morlet Wavelet');
```

# ANEXO V

## Relatórios de Ilhamentos - ONS



### Dados do Sistemas Especiais de Proteção - SEP

Emissão: 18/01/2015

Número do SEP 5.83.01	Nome do SEP Esquema de Corte de Geração da UTE TERMOPERNAMBUCO em caso de Ilhamento com a SE Pirapama II - CHESF	
Número da IO IO-EE.NE.5LE	Tipo do Esquema Esquema de Controle de Emergência	
Agente Principal TERMOPERNAMBUCO - Termopernambuco S/A		Região Principal NE - Nordeste
Demais Agentes CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco		Demais Regiões
Status Ligado		Tecnologia empregada Eletromecânica
Finalidade  Impedir que em caso de desconexão entre as SE's de Recife II (RCD) e Pirapama II (PRD) da CHESF a UTE TERMOPERNAMBUCO continue em operação atendendo às cargas de Pirapama II de forma isolada (desconectada do sistema). O corte de geração poderá chegar a 520MW.		
Entrada em operação 01/06/2004		Última revisão 01/04/2006
Motivo  Energização do consumidor M&G Polímeros		
Relatório / Ata Referência		
Outras informações		

## Descrição da lógica do funcionamento

A conexão da usina termelétrica TERMOVERNAMBUCO ao sistema elétrico Norte-Nordeste é realizada através das LT's 04S2 e 04S3 interligando a UTE a SE Pirapama II da CHESF.

O estudo de inserção da UTE Termopernambuco no sistema elétrico interligado determinou que a UTE não poderá alimentar isoladamente as cargas derivadas da SE Pirapama II. Desta maneira o esquema implementado supervisiona a posição dos disjuntores das LT's 04C1 e 04C2 na SE Recife II da CHESF, assim como o disjuntor de Transferência, caso esteja sendo utilizado, para enviar Transfer-Trip a SE Pirapama II no caso de abertura de ambas LT's e/ou atuação de esquema de falha de disjuntor. De maneira análoga o esquema supervisiona a posição dos disjuntores das LT's e disjuntor de transferência na SE Pirapama II, para no caso de abertura de ambas as LT's por qualquer motivo, transferir Trip para Termopernambuco desconectando as LT's 04S2 e 04S3. ( Vide diagrama )

O Transfer-Trip enviado a Termopernambuco irá iniciar um processo de controle para operação isolada da usina, onde a carga do consumidor M&G Polímeros será desligada, uma turbina a gás irá alimentar as cargas próprias, a segunda turbina a gás permanecerá girando em vazio e a turbina a vapor será desligada. Isto possibilitará um retorno imediato da usina ao sistema elétrico interligado tão logo as condições do mesmo estejam recompostas.

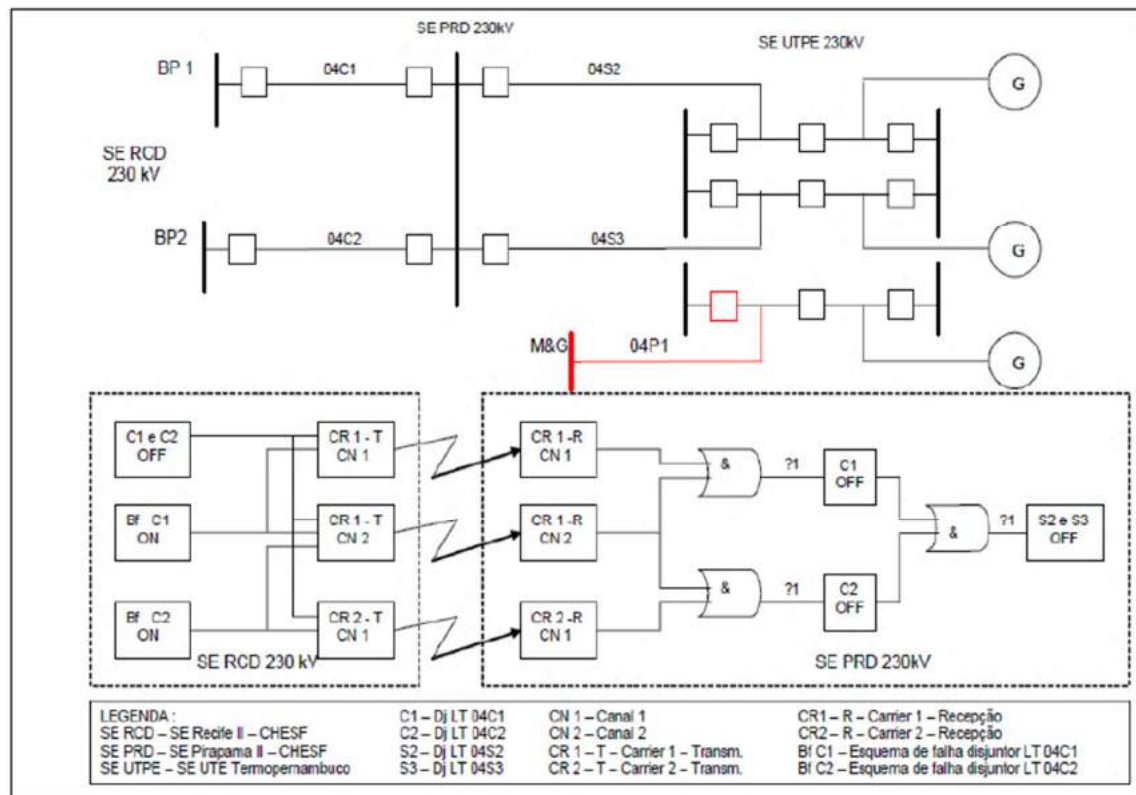
## Ajuste dos Sensores

As características básicas dos esquemas são supervisão por contato, além destes os temporizadores possuem faixas e ajustes conforme abaixo:

\* Temporizadores para Reset, utilizados no esquema de Recife II e Pirapama II  
- Faixa 0 à 5s ( Ajuste 3s );

\* Temporizador para corte do sinal permanente de atuação do esquema sobre o canal 2, do Carrier da LT 04C1, Faixa 0 à 5s ( Ajuste 3s ).

## Diagrama





Operador Nacional  
do Sistema Elétrico**Dados do Sistemas Especiais de Proteção - SEP**

Emissão: 18/01/2015

Número do SEP <b>1.08.16</b>	Nome do SEP Esquema de Ilhamento da UHE Sá Carvalho	
Número da IO <b>IO-EE.SE.5MG</b>	Tipo do Esquema Esquema de Controle de Emergência	
Agente Principal <b>CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais</b>		Região Principal <b>SE - Sudeste</b>
Demais Agentes		Demais Regiões
Status <b>Ligado</b>		Tecnologia empregada <b>Digital</b>
Finalidade  O esquema prevê o ilhamento a UHE Sá Carvalho com cargas prioritárias do consumidor Acesita, quando de perturbações no Sistema que acarretem perda da alimentação de 230 kV da Acesita, para evitar a perda total da usina.		
Entrada em operação <b>01/05/1999</b>		Última revisão
Motivo		
Relatório / Ata Referência		
Outras informações		

### Descrição da lógica do funcionamento

O esquema atua quando da perda da alimentação de 230 kV da SE Acesita, que é identificada pela ocorrência de subtensão ou subfrequência no 230 kV da SE Acesita e verificação do fluxo no transformador 230-69 kV no sentido da Acesita para a CEMIG. Sendo atendidas essas condições, é comandada a abertura do disjuntor do transformador, abrindo a interligação da Acesita com a CEMIG. Ver diagrama anexo.

### Ajuste dos Sensores

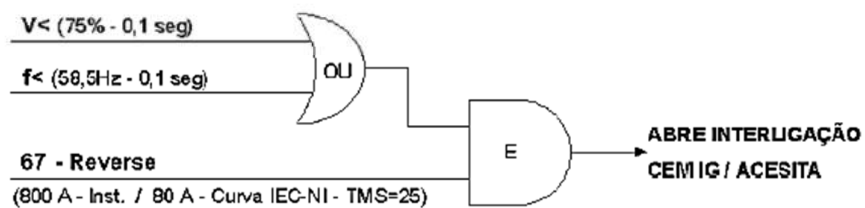
Relé SR750 – GE MULTILIN  
TC = 800 – 5 A  
TP = 230.000/Ö3 – 115/Ö3 V

- Unidade de Subtensão ( $V <$ )  
Ajuste = 75% de  $V_n$   
Temporização = 0,1 seg

- Unidade de Subfrequência ( $f <$ )  
Ajuste = 58,5 Hz  
Temporização = 0,1 seg

- Unidade de Sobrecorrente Direcional (67)  
Temporizada: Pick-up = 80 A  
Curva = IEC-NI  
TMS = 25  
Instantânea: Pick-up = 800 A

## Diagrama







**ACOMPANHAMENTO DO  
ESQUEMA REGIONAL DE  
ALÍVIO DE CARGA - ERAC  
LEITURAS DE 20/04/2011,  
17/08/2011 E 21/12/2011**

Operador Nacional do Sistema Elétrico  
Diretoria de Planejamento Programação de Operação  
Rua de Quitanda 156/23º andar, Centro  
20091-005 Rio de Janeiro RJ  
tel (+21) 2203-9594 fax (+21) 2203-9444

## 12 Consumidores Livres e Autoprodutores

A reestruturação do setor elétrico gerou novas situações que não estão sendo contempladas na concepção do ERAC e que precisam ser avalladas em face da sua dimensão crescente e da sua influência no desempenho deste esquema. São os casos dos Consumidores Livres e Autoprodutores.

### 12.1 Legislação Vigente

A Resolução Normativa nº 376, de 25 de agosto de 2009 estabelece, em seu Art. 20 que a unidade consumidora conectada à Rede Básica, às Redes de Distribuição ou às Demais Instalações de Transmissão – DIT deve participar de medidas operativas para gerenciamento de cargas e de Sistemas Especiais de Proteção - SEP, incluindo o Esquema Regional de Alívio de Carga por Subfrequência – ERAC, segundo critérios a serem detalhados nos Procedimentos de Rede e nos Procedimentos de Distribuição.

Com base nas diretrizes estabelecidas nos Procedimentos de Rede, o ONS está trabalhando no sentido de identificar todos os Consumidores Livres, buscando incluir no ERAC aqueles diretamente conectados à Rede Básica, assim como aqueles conectados na Rede de Distribuição que ainda não participam do mesmo, da seguinte forma:

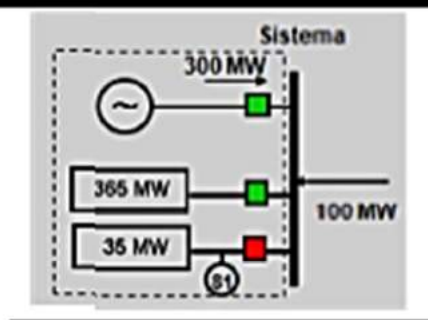
- ✓ Executar as ações necessárias para que todos os Consumidores Livres participem do ERAC na mesma proporção que todos os demais Agentes detentores de carga;
- ✓ Apoiar esses agentes com os esclarecimentos e informações técnicas e econômicas necessárias à implantação do ERAC próprio;

### 12.2 Como considerar no ERAC o Autoprodutor que importa ou exporta energia dependendo do seu processo

#### 12.2.1 Importador

Caso o ajuste da proteção de subfrequência do gerador atenda os Procedimentos de Rede, este Autoprodutor deverá disponibilizar um montante de sua carga para corte pelo ERAC, correspondente a 35 % de sua importação, ou então efetuar o ilhamento da planta. A figura a seguir ilustra a situação.

Figura 1 : Representação do Autoprodutor Importador



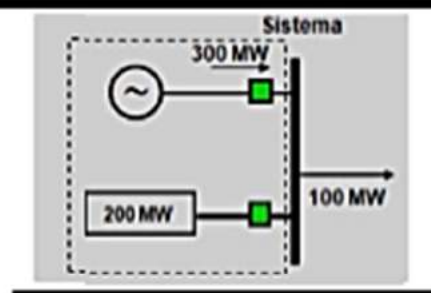
Caso o ajuste da proteção de subfrequência do gerador não atenda os Procedimentos de Rede, este Autoprodutor deverá efetuar o ilhamento da planta com sua carga própria.

No caso de Indisponibilidade da Geração Própria deverá prever ERAC cortando 35% da carga global do AP (140 MW).

### 12.2.2 Exportador

Caso o ajuste da proteção de subfrequência do gerador não atenda os Procedimentos de Rede, este Autoprodutor deverá efetuar o ilhamento da planta com sua carga própria. Caso contrário, nenhuma ação de ERAC é necessária;

Figura 2 : Representação do Autoprodutor Exportador



No caso de Indisponibilidade da Geração Própria deverá prever ERAC cortando 35% da carga global do Autoprodutor (70 MW).

## ANEXO VI

### Relé Digital - (Manual do Fabricante)



SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMERCIAL LTDA.

### RELÉ DE PROTEÇÃO DE GERADOR SEL-700G



Rodovia Campinas Mogi-Mirim (SP-340), Km 118,50 Prédio 11 – Campinas-SP CEP 13066-902  
home-page: [www.selinc.com.br](http://www.selinc.com.br)  
CNPJ: 03.837.858/0001-01

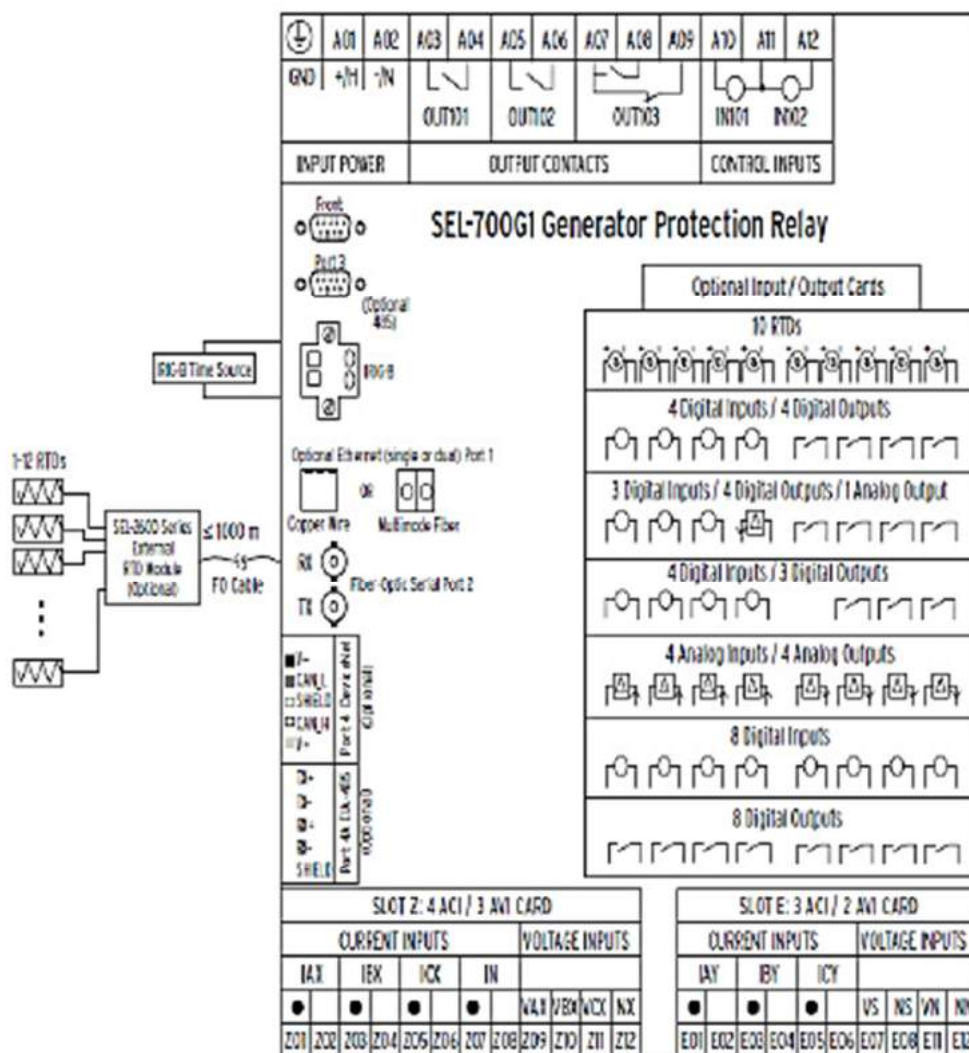
Tel: (19) 3515 2000  
Fax: (19) 3515 2011  
Insc. Estadual: 244.668.694.116



SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMERCIAL LTDA.

### Diagrama de Entradas, Saídas e Sinalização

O diagrama apresentado na *Figura 2* ilustra as entradas, as saídas e sinalização do relé SEL-700G.



**Figura 2 – Diagrama Típico de Entradas, Saídas e Sinalização**



## Funções e Características

---

### CARACTERÍSTICAS DO RELÉ SEL-700G

O Relé de Proteção de Geradores SEL-700G é um relé multifunção, completo, projetado para proteção primária e/ou de retaguarda de máquinas síncronas de pequeno ou grande porte.

#### 2.1. Funções de Proteção

- 64G – Falta a terra no estator e diferencial de tensão de 3a harmônica (100%);
- 24 – Volts/Hertz;
- 21 – Relé de distância ou 51V/C – sobrecorrente temporizada com restrição/controle de tensão;
- 50/51 - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 50/51N – Sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro;
- 50/51Q (46) - Sobrecorrente instantânea e temporizada de seqüência negativa;
- 27/59 - Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G - Sobretensão residual;
- 59Q (47) - Sobretensão de seqüência negativa/ reversão de fases;
- 50/62BF - Falha de disjuntor;
- 50/27 – Energização inadvertida;
- REF (67G) - Proteção restrita de falta a terra (opcional);
- 67G - Sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente ou tensão);
- 60 - Perda de potencial;
- 81 – Sub / Sobre freqüência e taxa de variação de freqüência;
- 78 – Disparo por oscilação de potência;
- 32P – Potência ativa reversa;
- 32Q/40 – Direcional de potência reativa;
- 40 – Perda de excitação;
- 87N – Diferencial de Neutro (presente quando a função 87 não está inclusa) (**opcional**);

- 87 SP – Diferencial de fase dividida (quando a função 87 acima não está sendo aplicada no mesmo relé) **(opcional)**;
- 25G – Sincronizador automático com verificação de sincronismo **(opcional)**;
- 49T – Elemento térmico por modelo térmico;
- 49R – Elemento térmico **(opcional através de RTD's)**;
- 64R – Elemento de proteção do rotor à terra **(opcional através do módulo SEL 2664)**;

## 2.2. Funções de Medição

- Correntes de fase (IA, IB, IC), de neutro (IN) e residual (IG), correntes de seqüência (I1, 3I2, 3I0);
- Corrente diferencial;
- Tensões de fase (VA, VB, VC) e de sincronismo (VS), tensões de seqüência (V1, V2, 3V0);
- Potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Fator de potência por fase e trifásico;
- Demanda de corrente de fase, de neutro e de seqüência negativa;
- Demanda de potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Energia ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Frequência;
- Excitação (Volts/Hertz);
- Medição de temperatura com até 12 RTD's (através do módulo externo SEL-2600) ou 10 RTD's com cartão interno. Tipo do RTD configurável: Pt100, Ni100, Ni120 ou Cu10 **(opcional)**;
- Medição sincronizada de fasores (IEEE C37.118);

## 2.3. Funções de Monitoramento

- Oscilografia de 15 (até 23 relatórios) ou 64 ciclos (até 5 relatórios). Resolução de 16 amostras/ciclo;
- Seqüência de eventos, armazena os últimos 1024 eventos;

- Relatório de Curva de Carga (load-profile), com coleta de até 17 grandezas analógicas com intervalos programáveis (5, 10, 15, 30 ou 60 minutos);
- Relatório de sincronização automática;
- Monitoramento de desgaste dos contatos do disjuntor;
- Contador de operações;
- Monitoramento das bobinas do disjuntor (através de programação lógica);
- Estatísticas de operação (tempo de parada,  $I^2 \times t$  acumulado, potência média, tempo de operação por faixa de frequência, etc.);
- Monitoramento dos RTD's;

#### 2.4. Funções de Controle

- Número de entradas e saídas binárias:
  - Standard: 2 Entradas e 3 Saídas Digitais;
- Placas adicionais (até 2 placas):
  - 10 RTD's internos;
  - 4 Entradas e 4 Saídas Digitais;
  - 4 Entradas Digitais e 4 Saídas Digitais de Estado Sólido;
  - 8 Entradas Digitais;
  - 8 Saídas Digitais;
  - 3 Entradas e 4 Saídas Digitais e 1 Saída Analógica (4-20mA);
  - 8 Entradas Analógicas (até  $\pm 10V$  ou  $\pm 20mA$ );
  - 4 Entradas e 4 Saídas Analógicas (até  $\pm 10V$  ou  $\pm 20mA$ );
  - Porta serial EIA-232/485;
  - Comunicação DeviceNet – EIA-485;
- 86 – Retenção de sinal de disparo;
- Pushbuttons frontais personalizáveis para controle local;

Programação por equações lógicas e matemáticas SELogic® para controle local e remoto, possuindo os seguintes elementos:

- 32 chaves locais;
- 32 chaves remotas;



- 32 temporizadores;
- 32 contadores;
- 32 biestáveis;
- Operações: AND, OR, NOT, comparadores ( $=$ ,  $<$ ,  $>$ ,  $<=$ ,  $>=$ ), adição (+), subtração (-), multiplicação (\*), divisão (/), detecção de borda de subida (R\_TRIG) e detecção de borda de descida (F\_TRIG);
  - Lógicas de disparo independentes para turbina, gerador e campo;
  - Seletividade lógica;
  - grupos de ajustes;
- Controle de torque das funções de sobrecorrente;
- 30 – Anunciador;
- 69 – Inibição de fechamento;
- 86 – Retenção de sinal de disparo;

## 2.5. Lógicas Adicionais

- Sincronização automática de geradores através da comparação dos sinais de frequência e tensão do gerador com o sistema e envio de pulsos proporcionais (F+, F-, V+, V-) para o ajuste dos sistemas de regulação de velocidade e tensão, fechando automaticamente o disjuntor da unidade dentro de parâmetros estabelecidos;
- Compensação do tempo de fechamento do disjuntor na lógica de sincronismo;
- Proteção de fase dividida (Split Phase) configurável;
- Filtragem adaptativa em situação de saturação de TC's;

## 2.6. Integração

- 1 porta serial EIA-232 frontal;
- 1 porta serial EIA-232 ou EIA-485 traseira;
- 1 porta de fibra óptica serial;
- 1 ou 2 portas Ethernet; (**opcional**);
- 1 placa com porta serial EIA-485 ou EIA-232 traseira; (**opcional**);
- 1 placa para comunicação DeviceNet; (**opcional**);

- Sincronização horária por IRIG-B;
- Protocolos:
  - Serial: ASCII, Modbus® RTU, DNP3.0 Serial (**opcional**), DeviceNet (**opcional**), SEL Fast Meter, SEL Fast Operate, SEL Fast SER, SEL Fast Message, Mirrored Bits;
  - Ethernet: Modbus® TCP (**opcional**), DNP3.0 LAN/WAN (**opcional**), Telnet (**opcional**), FTP (**opcional**), IEC 61850 (**opcional**);

## 2.7. Outras Características

- Painel frontal com LED's e rótulos (Labels) configuráveis, display LCD com 2 x 16 caracteres e teclado de fácil navegação;
- Alimentação Auxiliar: 24-48Vdc / 110-250Vdc / 110-230Vac;
- Software amigável para parametrização (AcSELeRator®);
- Contatos Standard: capacidade de condução contínua 6A @ 70° C, capacidade de estabelecimento de condução 30A, capacidade de interrupção 0,3A (125Vcc, L/R = 40ms);
- Possibilidade de aumento da capacidade de interrupção para 10A (125Vcc, L/R = 40ms), utilizando SEL-9501/SEL-9502;
- Painel frontal atende os requisitos do NEMA12/IP65;
- Proteção Conformal Coating dos circuitos impressos contra agentes químicos (**opcional**);
- Temperatura de operação – 40 ° a + 85 ° C;