

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET  
PARA DETECTAR VARIAÇÕES ANORMAIS DE  
FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA**

**JULIO CESAR FERREIRA**

Uberlândia  
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET  
PARA DETECTAR VARIAÇÕES ANORMAIS DE  
FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA**

Dissertação apresentada por **JULIO CESAR FERREIRA**  
à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada em  
18/ 06/ 2009 pela Banca Examinadora:

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, PhD. - UFU (Orientador)

Prof. Adélio José de Moraes, Dr. - UFU

Prof. Carlos Henrique Salerno, Dr. - UFU

Prof. Antônio C. Paschoarelli Veiga, Dr. - UFU

Prof. David Calhau Jorge, Dr. - UFTM-MG

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

- F383u    Ferreira, Julio Cesar, 1975-  
          Utilização da transformada de Wavelet para detectar variações anormais de frequência em sistemas de geração distribuída / Julio Cesar Ferreira. - 2009.  
          190 f. : il.
- Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
          Inclui bibliografia.
1. Sistemas de energia elétrica - Controle de qualidade - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica - Proteção - Teses. 3. Relés digitais - Teses. I. Guimarães, Geraldo Caixeta. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.316

---

# UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA DETECTAR VARIAÇÕES ANORMAIS DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Dissertação apresentada por **JULIO CESAR FERREIRA** à  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para à obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

---

Prof. PhD.Geraldo Caixeta Guimarães  
Orientador

---

Prof. Dr. Alexandre Cardoso  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho a minha  
querida esposa Roseli, minha linda filha  
Judi Vitória e ao meu valente filho Atos  
Dã, que nos momentos de ausência em  
virtude dos estudos sempre me apoiaram  
com sublime compreensão.*

## Agradecimentos

A Deus, por ter me proporcionado a satisfação e disponibilidade para a realização desta dissertação, pelas bênçãos diárias e por Jesus Cristo em minha Vida.

Aos meus pais, Bárbara de Fátima Ferreira e Iraci Jose Ferreira, pelo incentivo e apoio em meus estudos. Além da educação e ensinamentos dados para que eu chegasse até este momento.

A minha amada esposa Roseli da costa Teixeira e Ferreira, pelo amor, confiança e motivação.

A minha sogra Maria Conceição da Costa Teixeira, por ser uma pessoa simples e fascinante, a qual eu admiro.

A todos meus familiares, que indiretamente contribuíram para esta vitória.

Aos irmãos da Igreja Metodista Wesleyana de Uberaba, pelas orações e incentivo.

Ao meu amigo Leandro Aureliano o qual me incentivou a estudar a transformada de wavelet tema desta dissertação.

A Faculdade Talentos Humanos pela oportunidade de trabalho e aos amigos desta faculdade que indiretamente contribuíram para esta dissertação.

Aos amigos do SENAI que foram flexíveis ao meu horário de trabalho em virtude das aulas do mestrado.

Aos meus companheiros de mestrado, Daniel Dorça, Cezar Aguiar e Marcel Wu pelo apoio em ocasiões específicas deste trabalho.

A Universidade Federal de Uberlândia através do departamento de Pos-Graduação de Engenharia Elétrica, que me proporcionou esta oportunidade.

Em especial aos professores, Carlos Henrique Salerno que me motivou incondicionalmente em todos os momentos, o qual ficarei para sempre grato e ao professor Geraldo Caixeta Guimarães instrumento de Deus em minha vida, depositou em mim vários créditos de confiança e motivação, por me acolher no programa de Mestrado, por todas as oportunidades e facilidades oferecidas, pela liberdade de trabalho e opinião, pelos desafios propostos e pela orientação segura e fecunda.

*Que a palavra de Cristo Habite ricamente em vós, instruindo-vos e aconselhando-vos, mutuamente em toda sabedoria, e assim possais estar sempre louvando a Deus com Salmos e cânticos espirituais, com gratidão em vossos corações. E tudo o que fizerdes, seja em palavra, seja em ação, fazei em nome do Senhor Jesus. Dando por Ele graças a Deus Pai.*

*(Colossenses 3:16,17)*

## **Resumo**

**FERREIRA, J. C. (2009). Utilização da Transformada de Wavelet para Detectar Variações Anormais de Frequência em Sistemas de Geração Distribuída.**  
FEELT-UFU, Uberlândia, 2009.

Esta dissertação foca a importância de registrar as variações eventuais de frequência no Sistema Elétrico de Potência as quais podem ultrapassar os limites estabelecidos para sua operação normal. Isto pode acarretar sérios problemas no funcionamento de equipamentos sensíveis conectados a rede elétrica, tais como os turbo-geradores empregados em usinas termoeletricas. Para a supervisão da frequência do sistema são utilizados relés de frequência, os quais acionam os dispositivos de proteção quando são detectadas condições anormais. Neste contexto, os principais objetivos deste trabalho consistem em propor a implementação de um algoritmo capaz de detectar distúrbios na frequência, caracterizados por situações de sub ou sobrefrequência, e também quantizar o tempo em que o sistema esteve operando nestas condições. Para atingir este alvo foi empregada a técnica de wavelet de análise de multiresolução (AMR) para detecção dos distúrbios gerados. Os dados obtidos podem então ser tratados de modo a serem empregados para uma possível manutenção preditiva nas turbinas a vapor, visto que estas estão sujeitas a danos quando em prolongada operação sob condições anormais de frequência.

**Palava-chave:** *Geração Distribuída, Subfrequência, Sobrefrequência, Relé Digital, Transformada de Wavelet.*



## **Abstract**

**FERREIRA, J. C. (2009). Use of Wavelet Transforms to Detect Abnormal Frequency Variation in Distributed Generation Systems.**

FEELT-UFU, Uberlândia, 2009.

This dissertation focuses the importance of registering eventual frequency variations in Electric Power System which may cross the established limits for normal operation. These can cause serious problems in the operation of sensitive equipments connected to the electric grid, such as the turbo-generators employed in thermoelectric plants. For power system frequency supervision it is used frequency relays which act on protection devices when abnormal conditions are detected. In this context, the major objectives of this work consist of proposing the implementation of an algorithm capable of detecting frequency disturbances characterized by under or over frequency situations and quantifying the time during which the system was operating in such conditions. To achieve this objective the wavelet technique called multi-resolution analysis was used for detection of generated disturbances. The data obtained can then be treated in order to prepare a predictive maintenance, mainly in steam turbines which are equipments more subject to damages when in long lasting operation under abnormal frequency conditions.

**Keywords - Distributed generation, overfrequency, underfrequency, digital relay, Wavelet Transform.**

# Sumário

<b>Capítulo I</b>	<b>17</b>
<b>Introdução Geral</b>	<b>17</b>
1.1 – Considerações iniciais	17
1.2 – Contextualização e Justificativas	17
1.3 – Objetivo Geral	20
1.4 – Objetivos Específicos	20
1.5 – Organização da Dissertação e Metodologia Utilizada	21
1.6 – Revisão Bibliográfica	22
<b>Capítulo II</b>	<b>34</b>
<b>Aspectos Gerais Sobre Geração Distribuída</b>	<b>34</b>
2.1 – Considerações Iniciais	34
2.2 – Conceito e Legislação Vigente para Regulamentação de Sistemas de GD	35
2.3 – Benefícios da Implantação de Sistemas de GD	40
2.4 – Impactos pertinentes com o advento da Geração Distribuída	42
<b>Capítulo III</b>	<b>48</b>
<b>Qualidade de Energia - Enfoque Geração Distribuída</b>	<b>48</b>
3.1 – Considerações Iniciais	48
3.2 – Distúrbios relacionados à QEE	49
3.2.1 – Transitórios	55
3.2.2 – Variações de Tensão de Curta Duração	58
3.2.3 – Variações de Tensão de Longa Duração	61
3.2.4 – Distorções da Forma de Onda	63
3.2.5 – Flutuações ou Oscilações de Tensão	68
3.2.6 – Variações na Frequência do Sistema Elétrico	69
3.3 – Impacto da GD na Qualidade de Energia Elétrica	71
3.4 – Considerações finais	75

---

<b>Capítulo IV</b>	<b>77</b>
<b>A Influência de Variações de Frequência no Sistema Elétrico</b>	<b>77</b>
4.1 – Considerações Iniciais	77
4.2 – Efeitos da Variação da Frequência nos Gerador Síncrono	79
4.3 – Efeitos da Variação da Frequência no Gerador Assíncrono	84
4.4 – Efeitos da Variação da Frequência em Turbinas a vapor	89
4.5 – Efeitos da Variação da Frequência em Turbinas a gás e hidráulicas	95
4.6 – Relés de Frequência	96
<b>Capítulo V</b>	<b>104</b>
<b>Transformada Wavelet</b>	<b>104</b>
5.1 – Considerações Iniciais	104
5.2 – A Transformada Wavelet	104
5.2.1 – A Transformada Wavelet Contínua - TWC	105
5.2.2 – A Transformada Wavelet Discreta – TWD	110
5.2.3 – A TWD - Análise Multiresolução	112
5.3 - Famílias Wavelets	119
5.4 – Aplicações da Transformada Wavelet em Sistemas Elétricos de Potência	124
5.5 Considerações Finais	127
<b>Capítulo VI</b>	<b>128</b>
<b>Fundamentos e Implementação do Algoritmo Proposto</b>	<b>128</b>
6.1 – Considerações Iniciais	128
6.2 – Sistema Elétrico Proposto	129
6.2.1 Descrição do sistema utilizado	133
6.2.2 Lógica Computacional Proposta	136
6.3 Resultados Obtidos Utilizando o Método de Análise Proposto	144
6.4 Considerações Finais	154

---

<b>Capítulo VII</b>	<b>157</b>
<b>Conclusões Finais</b>	<b>157</b>
<b>7.1 – Conclusão</b>	<b>157</b>
<b>7.2 – Sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>159</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>160</b>
<b>Anexo A</b>	<b>165</b>
<i>Algoritmo Proposto</i>	<b>165</b>
<b>Anexo B</b>	<b>170</b>
<i>Dados do Software PSAT</i>	<b>170</b>
<b>Anexo C</b>	<b>181</b>
<i>Relatórios da ONS</i>	<b>181</b>
<b>Anexo D</b>	<b>186</b>
<i>Relé Digital</i>	<b>186</b>

---

## Lista de Figuras

Figura 1: Seqüência de execução do algoritmo proposto .....	22
Figura 2: Fontes de geração de energia distribuída [26].....	39
Figura 3: Análise da estabilidade de um sistema de duas máquinas, durante uma perturbação [41].....	51
Figura 4: Fluxograma com as descrições dos principais distúrbios relacionados a QEE. ....	53
Figura 5: Corrente impulsiva, descarga atmosférica [21].....	55
Figura 6: Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores. Tensão no terminal [21].....	57
Figura 7: Chaveamento de um banco de capacitores. Fluxo de Corrente no terminal [29]. ....	58
Figura 8: Fenômeno de ferorressonância em energização de transformadores [29]. ....	58
Figura 9: Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra [29] .....	59
Figura 10: Afundamento de tensão ocorrido pela partida de um motor [29] .....	59
Figura 11: Elevação de tensão de 6% na fase “A” originado por uma falta fase-terra na fase “C” [29] .....	60
Figura 12: Interrupção momentânea devido a um curto-circuito, com afundamento de tensão. [29] .....	60
Figura 13: Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem [59]. ....	64
Figura 14: Forma de onda com distorções Interharmônicas [59].....	64
Figura 15: Tensão com um sinal de ruído de alta frequência [59]. ....	65
Figura 16: Notches micro cortes na tensão [59].....	66
Figura 17: Forma de onda ilustrativa com o resumo dos distúrbios referentes à QEE [23].....	69
Figura 18: Principais fontes de energias na Geração Distribuída do Brasil.....	78
Figura 19: Sistema Elétrico representativo 3 barras [66] .....	81
Figura 20: Característica de variação da carga com a frequência [66] .....	82
Figura 21: Exemplo típico de curva diária de carga. [66].....	83
Figura 22: Principais tecnologias utilizadas para geração eólica em redes de distribuição.[67].....	86
Figura 23: Curva conjugado eletromagnético versus velocidade do rotor de uma máquina de indução.[45] .....	87
Figura 24: Conceito de velocidade crítica do rotor no plano conjugado versus velocidade. ....	87
Figura 25: Frequência x Amplitude de ‘stress’ (fadiga) para turbinas a vapor [27].....	90
Figura 26: - Limites de frequência de operação de uma turbina a vapor [27] .....	90
Figura 27: Tempo máximo de operação de turbinas operando fora da frequência nominal [68] .....	93

---

Figura 28: Vista geral de uma turbina a vapor [46] .....	94
Figura 29: Vista lateral de uma turbina a vapor- Palhetas danificadas [46].....	94
Figura 30: Palhetas de turbina a vapor, tie-wire = presilha , shroud= chapa de junção [46].....	95
Figura 31: Diagrama de blocos de um relé de frequência tipo estático .....	98
Figura 32: Exemplo ilustrativo da Arquitetura interna e externa de um relé digital [15] .....	99
Figura 33: Exemplo de um bloco multifunção de um relé digital [15].....	100
Figura 34: Diagrama de funcionamento básico do relé [7].....	102
Figura 35: Transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência usando FT [40] .....	106
Figura 36: STFT Transformada Janelada de Fourier continua [40] .....	106
Figura 37: A TW analisa as baixas frequências, altas frequências e o tempo [40].....	107
Figura 38: Representação de um sinal em diferentes escalas e posições [40].....	108
Figura 39: Exemplo do fator de escala em uma função seno.....	109
Figura 40: Exemplo do fator de escala em uma função Wavelet. ....	109
Figura 41: Translação aplicada a uma Wavelet. ....	110
Figura 42: Processo de filtragem de um sinal .....	112
Figura 43: Processo de diminuição do número de amostras do sinal. Downsampling [40].....	113
Figura 44: Exemplo de filtragem com downsampling de um sinal senoidal ruidoso [40].....	114
Figura 45: Ilustração do processo sucessivo de decomposição de um sinal em AMR [40].....	114
Figura 46: Exemplo de decomposição sucessiva de um sinal [40] .....	115
Figura 47: Processo de reconstrução de um sinal filtrado [40] .....	117
Figura 48: Processos de decomposição e reconstrução de um sinal Ingrid Daubechies [40].....	118
Figura 49: Reconstrução do sinal a partir de seus coeficientes [40].....	118
Figura 50: Wavelet mãe Haar .....	120
Figura 51: Wavelet mãe Daubechies.....	121
Figura 52: Wavelet mãe Coiflets .....	121
Figura 53: Wavelet mãe Symlets .....	122
Figura 54: Wavelets mãe Biortogonais .....	123
Figura 55: Exemplo de decomposição sucessiva de um sinal [40] .....	126
Figura 56: Exemplo de decomposição de um sinal com aproximação e detalhes [40].....	126

---

Figura 57: Usinas de açúcar e álcool, representação de um sistema de GD .....	129
Figura 58: Sistema Elétrico Proposto-Destaque Barramento B2 [36].....	135
Figura 59: Fluxograma do Algoritmo proposto .....	136
Figura 60: Ilustração básica da funcionalidade de um relé digital .....	137
Figura 61: Ilustração do módulo proposto para um relé digital .....	138
Figura 62: Exemplo de decomposição sucessiva de um sinal.....	141
Figura 63: Exemplo da AMR no sinal proposto para análise .....	142
Figura 64: Resposta do sistema mediante a ocorrência de curto-circuito trifásico.....	145
Figura 65: Aplicação da AMR no sinal de frequência, caso 1 .....	146
Figura 66: Frequência acumulada.....	147
Figura 67: Resposta do sistema mediante uma rejeição de carga.....	148
Figura 68: Resposta do sistema mediante uma rejeição de carga.....	149
Figura 69: Aplicação da AMR no sinal de frequência, caso 2.....	149
Figura 70: Frequência acumulada caso 2 .....	150
Figura 71: Resposta do sistema mediante ilhamento do Gerador G2.....	151
Figura 72: Aplicação da AMR no sinal de frequência, caso 3.....	152
Figura 73: Frequência acumulada caso 3 .....	153
Figura 74: Tempo limite versus frequência para uma turbina a vapor [61].....	155

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Dispositivos legais brasileiros ligados a Geração Distribuída .....	38
Tabela 2: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos [29] .....	54
Tabela 3: Resumo das causas, efeitos e soluções, referentes à QEE [23].....	70
Tabela 4: Tempo máximo de operação de uma turbina a vapor de acordo com sua frequência de operação .....	91
Tabela 5: Intervalos de análises de frequência.....	143
Tabela 6: Tempo limite versus frequência para uma turbina a vapor.....	156

---

## Lista de Siglas e Abreviaturas

AMR	Análise de Multiresolução
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GD	Geração Distribuída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
kW	kilowatts
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica
MW	Megawatts
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PIE	Produtor Independente de Energia
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
<i>PSAT</i>	<i>Power System Analysis Toolbox</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QF	<i>Quadrature filter</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
TW	Transformada de Wavelet
TWC	Transformada de Wavelet Contínua
TWD	Transformada de Wavelet Discreta

---



# **Capítulo I**

## **Introdução Geral**

### **1.1 – Considerações iniciais**

Neste capítulo será apresentado o contexto em que este trabalho se insere, seu objetivo principal, os objetivos específicos, a metodologia aplicada, considerações sobre as contribuições a serem alcançadas, a organização desta dissertação e uma revisão bibliográfica referente aos temas abordados.

### **1.2 – Contextualização e Justificativas**

O crescimento da geração distribuída (GD) vem se tornando cada vez mais evidente no panorama energético mundial. Considerada por muitos como a solução para suprir a demanda de consumo futuro, sendo usualmente de pequeno porte se comparada aos grandes projetos hidrelétricos, sistemas de GD podem permitir no contexto brasileiro incentivo econômico, pela possibilidade de utilização de tecnologia nacional, bem como ambiental, usando possivelmente fontes renováveis de energia. Tratando-se da região sudeste, fortemente no interior do estado de São Paulo, e atualmente no Triângulo Mineiro, nota-se um crescente aumento tanto no número de geradores independentes, quanto na quantidade de potência fornecida à rede elétrica. Em especial empresas do setor sucro-alcooleiras, fábricas de fertilizantes, empresas do setor alimentício, em geral um grande ramo da indústria nacional começou a ter interesse pelo mercado de energia, produzindo sua própria energia com a utilização de turbinas a vapor e geradores, sendo os resíduos de seus processos a energia primária para esta geração.

No entanto com a expansão dos sistemas GD surgem também questões pertinentes a Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Para cada tipo de tecnologia aliada a GD existem considerações relevantes aos aspectos de QEE, a qual pode ser deteriorada por falhas e operações de chaveamento na rede, pela ocorrência de transitórios ou pelos distúrbios causados pela operação de cargas, principalmente no que se refere à afundamentos de tensão, harmônicos, desequilíbrios entre fases e oscilações de frequência. A configuração do sistema de geração e transmissão, impedâncias de seus componentes, potências dos geradores, reguladores de velocidade, estabilizadores de tensão e a capacidade de curto-circuito, podem influenciar na ocorrência destes distúrbios.

Em particular no contexto deste trabalho, observa-se a importância da frequência para o Sistema Elétrico de Potência (SEP), especialmente se esta não respeitar os limites estabelecidos para a sua operação nominal. Isto pode acarretar sérios problemas no funcionamento dos equipamentos conectados a rede elétrica, tais como bancos de capacitores, geradores, turbinas etc. Necessariamente, para a supervisão da frequência do sistema sob determinada condição de operação, faz-se uso de relés de frequência, que acionam os dispositivos de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede fora dos patamares aceitáveis sob o ponto de vista de operação normal do SEP. A monitoração do SEP se torna imprescindível para que se possa ter QEE, o avanço tecnológico proporciona uma gama de equipamentos com grande confiabilidade e rápida resposta às ações a eles propostos, visto que estes são interligados aos sistemas de proteção. (*Relés digitais, disjuntores, sistemas supervisórios, etc.*).

Este trabalho focou as suas pesquisas nas variações de frequência ocorridas em um SEP dotado por um GD onde são encontrados grupos geradores formados por turbinas a vapor e geradores síncronos, visto que a ocorrência de subfrequência e sobrefrequência é prejudicial ao sistema de geração, principalmente se constituídos por turbinas a vapor. Esta pesquisa se estende aos relés digitais de frequência, pois estes possuem grande capacidade para resolver alguns dos

problemas intrínsecos ao SEP seja do ponto de vista das funções de medição, supervisão, controle, análise de eventos (registros sequenciais e oscilografias), proteção, monitoração e comunicação. Uma das vantagens associadas à utilização da capacidade de controle e automação dos relés digitais é seu potencial de simplificar a concepção dos painéis que compõem as instalações de potência. Isso diminui os tempos de construção, comissionamento e manutenção, além de agregar maior confiabilidade e flexibilidade ao controle, pois esta tecnologia de relés é dotada de microprocessadores para realização de suas funções.

Aliada a tecnologia disponível para os equipamentos de SEP, algoritmos possuindo diversas características vêm sendo estudados e utilizados para implementação em relés digitais. Técnicas empregando ferramentas poderosas que possuem a capacidade para análise simultânea nos domínios do tempo e da frequência têm sido desenvolvidas para estudo de fenômenos relacionados com a QEE. A Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta que possui esta característica devido a utilização da técnica de decomposição de sinais em Análise Multiresolução (AMR), que fornece valiosas informações para detecção, localização e classificação de diferentes distúrbios relacionados com a QEE. Assim, a TW tem sido proposta na literatura como uma nova técnica para monitorar problemas relacionados à QEE.

Salienta-se que com o vasto crescimento dos SEP, novos desafios surgem para a engenharia, e os seus reflexos são repercutidos na QEE do SEP. Neste ponto, vale expor na integra um dos boletins de ocorrência da ONS, divulgado em virtude de distúrbios no SEP, (*relatório nº - 3/139/08 emitido em 11/07/2008 disponível no anexo C*) “os distúrbios ocorridos provenientes de curtos, desligamentos de chaves e outros, são justificativas para o constante aprimoramento dos equipamentos de medição e monitoração do SEP”. Com este panorama, faz-se necessário o uso de mecanismo e técnicas que possam monitorar, proteger ou minimizar o impacto de tais problemas ocorrentes no SEP.

### 1.3 – Objetivo Geral

Como objetivo fundamental deste trabalho, propõe-se implementar um algoritmo capaz de detectar distúrbios na frequência do SEP, analisar os valores de subfrequência e sobrefrequência e quantizar o tempo em que o sistema esteve operando nestas condições. Com a formulação destes dados, disponibilizá-los como proposta para uma eventual manutenção preditiva nas palhetas das turbinas a vapor, visto que estas estão sujeitas a danos quando em prolongada operação sob condições anormais de frequência.

### 1.4 – Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral proposto serão trabalhados nesta dissertação os seguintes itens:

- Uma pesquisa para o referencial teórico da dissertação, com conteúdo focado em: Geração Distribuída, Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas de Potência, utilização da técnica de wavelet em Sistemas Elétricos de Potência.
- Utilizar o software PSAT - *Power System Analysis Toolbox* para implementação e simulação dos estudos de casos propostos.
- Utilizar a técnica de wavelet de decomposição em AMR para detecção dos distúrbios gerados nos estudos de casos.
- Utilização do software MATLAB para o desenvolvimento de um algoritmo que faça a análise das subfrequência e sobrefrequência.

## 1.5 – Organização da Dissertação e Metodologia Utilizada

No **segundo capítulo** é realizada uma descrição sucinta sobre os sistemas de GD e dos possíveis impactos causados pela implantação e proliferação destes no SEP.

O **terceiro capítulo** apresenta de forma objetiva o tema QEE aplicado a GD's. Inicialmente tem-se a descrição e a definição dos distúrbios relacionados a QEE segundo a norma da IEE 1159-1995. Na sequência tem-se uma análise descritiva sobre os impactos causados a QEE pela inserção de sistemas de GD na rede.

O **quarto capítulo** é direcionado especialmente para atingir o objetivo principal da dissertação. A faixa de variação da frequência para a operação do sistema é estabelecida entre  $60 \pm 0,5\text{Hz}$  (ONS, 2001). Este capítulo trata especificamente da influência da variação da frequência nos sistemas de GD mais utilizados, geradores síncronos (PCHs, usinas de açúcar e álcool (Cogeração)), geradores assíncronos (parques eólicos, pequenas unidades rurais) e turbinas.

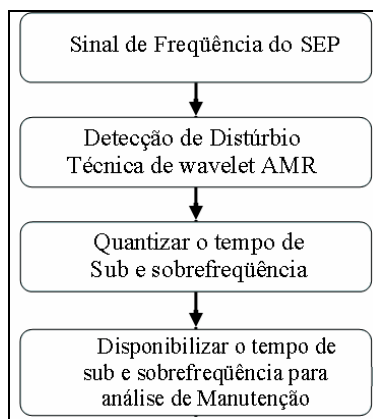
No **quinto capítulo** tem-se o viés motivacional desta dissertação, onde se descreve de forma conceitual os fundamentos básicos da técnica de wavelet, tanto contínua como discreta, a técnica de Análise Multiresolução (AMR) de uma forma bastante prática, exemplos das famílias Wavelets, sendo finalizado com um tópico sobre aplicações da Transformada Wavelet em Sistemas Elétricos de Potência.

O **sexto capítulo** destaca o algoritmo proposto para obter os resultados, com a finalidade de atingir o objetivo geral desta dissertação. O capítulo trás os estudos de casos implementados no software PSAT.

Por fim, o **sétimo capítulo** é dedicado para apresentação das principais conclusões e contribuições desta dissertação, sendo também delineados alguns pontos que podem ser continuados neste ramo de pesquisa.

Na sequência têm-se as bibliografias utilizadas e os anexos A, B, C e D (*algoritmo proposto, dados do PSAT, relatórios da NOS, relés de digitais*).

A metodologia aplicada a este trabalho pode ser observada na figura 1 e será comentada a seguir.



**Figura 1: Sequência de execução do algoritmo proposto**

De posse de uma vasta pesquisa bibliográfica sobre GD, QEE e Wavelet, focou-se o trabalho no objetivo geral, que é a implantação de um algoritmo para verificar o tempo em que o sistema esteve em sub e sobrefrequência. Para as eventuais análises partiu-se do princípio que o sinal de frequência, (*proveniente de um medidor de frequência, relés digitais de frequência*), já esteja disponível para as análises em forma de vetor. Consequentemente, este sinal é analisado pela técnica de wavelet AMR para detecção de distúrbios. Uma vez detectado o distúrbio, verifica-se o tempo em que este sinal permaneceu em sub e sobrefrequência, sendo este tempo acumulativo. Com isso pode-se comparar o tempo obtido, com os dados técnicos do fabricante da turbina, e, se for o caso, propor uma manutenção na turbina.

## **1.6 – Revisão Bibliográfica**

Por tratar-se de um tema multidisciplinar, durante as distintas fases deste trabalho foi necessária uma revisão bibliográfica sobre diferentes áreas e assuntos: Geração Distribuída, Qualidade de Energia Elétrica, Variações de Frequência e a Transformada de Wavelet. Em consequência, várias foram as fontes de pesquisa utilizadas: livros, apostilas de disciplinas do

programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Uberlândia, periódicos do IEEE, anais de congressos nacionais e internacionais, tutoriais de softwares e sites na internet.

Em vista da diversidade de assuntos, uma grande quantidade de literatura foi obtida. As contribuições das informações e referências mais relevantes, para melhor compressão do trabalho serão apresentadas ao longo da dissertação em cada capítulo, à medida que os diversos assuntos forem abordados. Na sequência tem-se o levantamento bibliográfico de alguns trabalhos, ordenados conforme o tema dos capítulos desta dissertação.

### ***Geração Distribuída***

Destaca-se na revisão bibliográfica do tema GD os trabalhos de Severino M.M (2008) [56], Gonçalves, L. F (2004) [26] , Brito M. P(2007) [12] , Marques F. A. S, et al (2007) [37] todos estes trabalhos focaram e apresentaram dados técnicos e simulações do impacto da inserção de sistemas de GD no SEP.

O site da ANEEL (*Agência Nacional de Energia Elétrica*) ([www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) ) disponibiliza resoluções e normas, sendo algumas citadas neste trabalho, relacionando os temas pertinentes como: definição do conceito de GD, conceito de autoprodutor, instituição e regulamentação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), definição de regras para a organização do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [44] e outros temas.

O artigos de Quezada, V.H.M. et al (2006) [50], Mc Tague, D.(2008) [38], Thornley, V. et al (2008) [60] , Rujian Lin (2008) [54], Escobar, A.H. et al (2008) [24], Boljevic, S. et al (2008) [9] descrevem de forma objetiva os conceitos de GD e as consequências dos sistemas de GD no SEP, o conjunto destes trabalhos apresenta uma visão panorâmica de GD em âmbito internacional.

### ***Qualidade de Energia Elétrica***

Problemas relacionados com Qualidade da Energia Elétrica (QEE), em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), têm motivado o desenvolvimento de diversas técnicas de processamento de

sinais para o monitoramento e análise de tais problemas. Dentre a gama de técnicas podemos citar como exemplo: detecção e classificação de distúrbio, identificação e localização de fontes geradoras de distúrbios, análise de transitórios de distúrbios, etc. Em decorrência da busca pela QEE, muitas são as instituições e autores que trabalham com esta linha de pesquisa, devido a vários fatores, dentre os quais merecem destaque:

- O crescente avanço da eletrônica de potência, fazendo proliferar cargas não lineares conectadas ao sistema.
- O aparecimento de equipamentos e sistemas de controle utilizando microprocessadores sensíveis a diversos distúrbios relacionados com a QEE
- Menor tolerância dos consumidores em relação aos problemas relacionados com a QEE, principalmente os consumidores industriais.

Cita-se neste contexto as pesquisas de DUGAN, R. C et al, (1996) [21] e Fernandes, Délio E. B.(1999) [25] que para conceituar e obter QEE afirma que: a forma de onda deve ser o mais próximo de uma senóide, haver simetria do sistema elétrico entre as fases e manter as magnitudes das tensões e frequência dentro de limites aceitáveis.

Como referência internacional tem-se o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) que através do comitê 22 (IEEE SCC22) [29], juntamente com outras entidades internacionais, coordena normalizações junto à chamada comunidade de qualidade de energia elétrica. Barker P. (2002) [8] expõe suas colocações sobre a influência dos sistema de GD na QEE

Com um enfoque em sistemas de GD os autores RIBEIRO, P et al, (2005) [52] e PINHEIRO, G et al, (2001) [47] em suas pesquisas analisaram os distúrbios inerentes a QEE, com a inserção de alguns tipos de GD.



### *Utilização da técnica de Wavelet*

Com o intuito de introduzir ao estudo e referenciar a aplicação da transformada de wavelet, fez-se um estudo dos trabalhos dos autores, Chui C. K. (1992) [16], Kaiser G.(1994) [31], Misiti M *et al* (2008) [40] onde tem-se uma visão técnica do uso das transformadas contínua e discreta. A teoria sobre wavelets tem sido muito difundida, entre outros fatores que justifica este crescimento, a sua origem interdisciplinar e a sua maneira eficaz de implementação, sendo esta técnica utilizada em análise de sinais, imagens, e na discretização de operadores diferenciais.

Buscou-se conhecer os estudos referentes à aplicação da Transformada Wavelet (TW) para análise de distúrbios relacionados com a QEE e sinais elétricos em geral, sendo levantados alguns dos principais trabalhos realizados com esta linha de pesquisa. Cabe aqui a citação destes autores como introdução ao tema “ Wavelet”.

Os autores ANGRISANI et al (1998) [5] utilizaram um método para análise da QEE combinando o uso da TWC com a AMR. A técnica de AMR foi usada tendo como função base a Wavelet de Daubechies com 16 coeficientes. A detecção do distúrbio é feita com a utilização da ferramenta TWC usando a função Wavelet de Morlet estimando o tempo de duração do distúrbio. A técnica de AMR é usada para extrair do sinal que contém o distúrbio em relação à componente fundamental. Com este método, os autores afirmam que os distúrbios mais relevantes no sistema elétrico de potência podem ser detectados, localizados e estimados automaticamente.

O trabalho de SANTOSO et al (1996) [55], refere-se à aplicação da teoria de Wavelet na análise da QEE, utilizando a Análise Multiresolução (AMR), com a Daubechies de ordem quatro (db4) como Wavelet mãe, para detectar e localizar vários tipos de distúrbios que estão relacionados com a QEE. O enfoque principal do trabalho está na decomposição de um dado sinal distorcido em outros sinais que representam uma versão de aproximação (conteúdo de

baixa frequência) e uma versão de detalhes (conteúdo de alta frequência) do sinal original. Os autores descreveram também a base de um possível esquema de classificação de distúrbios utilizando coeficientes quadrados da Transformada Wavelet (TW), que extraem características dos diferentes distúrbios.

A técnica de AMR, com a Wavelet mãe de Daubechies db4, foi também utilizada por Arruda, E. F (2003) [6] para detectar e localizar diferentes problemas de QEE, sendo a base de sua aplicação focada na decomposição de um dado sinal em versões de aproximação e de detalhes. O autor utilizou o princípio do teorema de Parseval o qual fornece informações sobre o conteúdo de frequência do sinal e possibilitando classificar diferentes fenômenos. Características únicas dos diferentes distúrbios podem então ser extraídas utilizando-se de curvas de desvio padrão em diferentes níveis de resolução.

Filho, O. Delmont (2003) [65] consciente dos problemas que afetam a QEE em um determinado sistema, deteve-se em sua dissertação em estabelecer um algoritmo que evidenciasse os distúrbios relacionados à QEE, para posteriormente evitar danos aos equipamentos. Através desta proposta, realizou um estudo para diagnosticar quais ferramentas eram viáveis na utilização deste trabalho. O autor verificou que antigamente a análise dos sinais que afetam a QEE era realizada através da transformada de Fourier, que é uma transformada bastante difundida e conhecida. Nos dias atuais, a Transformada Wavelet é utilizada em larga escala, principalmente na área de SEP. Este foi um dos fatores para a utilização desta transformada no trabalho do autor mencionado, e também pela possibilidade de obter informações tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

Os autores Kim C. H. e Aggarwal R. (2000) [33] [34] em seus trabalhos mostram a técnica de wavelet na utilização de SEP enfatizando a QEE, concluindo que a análise por wavelet ultrapassa as limitações dos métodos de Fourier pelo emprego de funções de análise, no tempo e na frequência. A transformada wavelet é excelente 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 dos transitórios de SEP. A 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 o objetivo de demonstrar a utilidade da TW Chaari O. et al (1996) [14], apresentam seus estudos em sistemas de distribuição. A TW de um sinal consiste na medida de similaridade entre o sinal e um conjunto de versões transladadas e escaladas de uma determinada wavelet mãe. A wavelet mãe é uma seleção de funções oscilatórias com rápido amortecimento. A TW neste estudo é usada para analisar transitórios de sinais falta-terra, nível tensão de 20 kV. As wavelets podem ser empregadas para análise de redes frente a situações de faltas, podendo ser implementadas em tempo real na proteção, como por exemplo, nos relés digitais atualmente disponíveis.

Valins, T. F. (2005) [62] propôs em sua dissertação, “*Relé Digital de Distância Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet*”, a proteção digital fundamentada na teoria de ondas viajantes e da ferramenta transformada wavelet, onde um algoritmo completo para proteção digital foi implementado, consistindo basicamente nos módulos de detecção, classificação e localização da falta, com a consequente determinação das zonas de proteção do relé. Para este esquema completo de releamento, o autor empregou como ferramenta de análise a TW. Sinais transitórios de alta frequência gerados por uma situação de falta podem ser analisados pela TW, detectando-se com precisão o instante de chegada das ondas em um ou nos dois terminais da linha. Conhecendo o instante de chegada dessas ondas e sua velocidade de propagação, a zona de proteção na qual a falta está alocada pode ser estimada de maneira fácil e rápida. O algoritmo foi implementado através do software Matlab e posteriormente testado, quando se utilizaram dados de faltas obtidos através de simulações no software ATP (Alternative

Transients Program). Pelos resultados alcançados, pode-se afirmar que a aplicação é bastante adequada para uso em relés digitais de distância.

Silveira P. M et al (2002) [58] propôs em seu artigo a utilização da TW para detecção e identificação de tipos de faltas em linhas de transmissão. O procedimento de identificação foi baseado na TW associada a uma transformação modal. Dessa forma os coeficientes wavelet dos sinais de falta são obtidos por análise AMR. Para curtos intervalos de análises os níveis de energia contidos nos sinais transformados são extraídos e comparados a limiares apropriados, determinando o tipo de falta.

### ***Variações de Frequência e Relés digitais***

O IEEE através do comitê de sistema de potência, apresenta um guia de análise para eventuais variações de frequência no sistema elétrico e suas consequências focando plantas de com geradores síncronos.

Reimert D. (2006) [51] em seu livro titulado de *“Protective relaying for power systems”* demonstra que os efeitos causados em um gerador trabalhando em sobrefrequência não são tão preocupativos quanto este trabalhando em subfrequência. A condição de sobrefrequência é o resultado de excesso geração, pode ser corrigida rapidamente pelos reguladores de velocidade conectados a máquina primária. Uma subfrequência é causada através de uma sobrecarga, que muita das vezes não são corrigidas localmente na geração. O autor também descreve os problemas causados em turbinas a vapor, gás e hidráulica quando submetidas a variações de frequências .

Segundo Pavani, A. P. G. (2008) [45] na análise de desempenho em regime permanente dos sistemas elétricos de potência costuma-se considerar uma condição operativa, ou seja, uma condição de equilíbrio, tensão e frequência constante. Assim o sistema deve ser dotado de um sistema de controle capaz de detectar variações de carga, as quais provocam alterações na frequência e ou tensão. É importante que o sistema de controle esteja ajustado, se possível de

forma otimizada, no sentido de garantir uma boa margem de estabilidade para a operação do sistema elétrico. Para enfatizar as características específicas dos geradores de indução Pavani, A. P. G. (2008) [45] realizou um estudo de modelagem dinâmica do gerador de indução, e através de simulações afirmou a existência de um ponto de equilíbrio na curva característica do gerador de indução (conjugado versus velocidade do rotor), concluindo que o gerador de indução possui um maior sensibilidade a perda de sincronismo que os geradores síncronos.

Guimarães G. C. (2003) [27] em seu trabalho expõe que uma especial atenção tem sido dada à operação dos turbogeradores sob condições de operações em sobrefrequência e ou subfrequências. Em particular, sobre os possíveis danos a que estão sujeitas as turbinas a vapor quando em prolongada operação sob condições de subfrequência, durante uma severa condição de sobrecarga imposta ao sistema quando há uma perda de geração. As turbinas são cuidadosamente projetadas para que as frequências de ressonância das palhetas, para a rotação nominal, sejam suficientemente defasadas, de forma a evitar vibrações e excesso de “stress” ou fadiga. Quando a turbina opera fora de sua frequência nominal, a amplitude de “stress” aumenta e algum dano é acumulado.

Trindade, Fernanda C. L (2009) [61] em sua dissertação, apresentou uma série de estudos sobre a operação isolada de sistemas industriais com geradores síncronos após a ocorrência de ilhamentos. A principal motivação para a realização dos estudos foi o crescimento do uso de geradores síncronos em instalações industriais, com controladores digitais automáticos de velocidade e de excitação, e o aumento do uso de relés digitais de proteção. Com isso a autora realizou simulações verificando as variações de frequência, tensão e fluxo de carga de sistemas ilhados, confirmando a possibilidade de desenvolvimento de novas metodologias de controle e proteção desses sistemas de GD.

Barbosa, D.(2007)[7] focando no tema flutuação de frequência, comenta que o aprimoramento das técnicas utilizadas para uma melhor estimação da frequência em um SEP é

muito importante para a operação correta do mesmo. Tipicamente, abordagens à estimação da frequência estão associadas à proteção contra a perda de sincronismo, priorizando a manutenção da estabilidade do SEP. O autor em seu trabalho propôs a implementação da técnica de medição de frequência utilizando filtros adaptativos em relés digitais.

Nesse intuito, várias técnicas vêm sendo desenvolvidas, sendo principalmente baseadas na disposição dos fasores, no método dos mínimos quadrados, na Transformada Rápida de Fourier - FFT, em técnicas inteligentes e no filtro de Kalman, destacando Pradhan et al. (2005) [48], Dash et al. (1999) [19],

Com o desenvolvimento do hardware computacional e dos algoritmos para fins de proteção e monitoramento, a tecnologia digital, neste princípio de século, tornou-se a base da maioria dos sistemas de uma subestação, atuando com aplicações das técnicas citadas no parágrafo anterior. Desta forma, o relé digital tem sido um dos equipamentos principais para proteção, monitoramento, medição, controle e comunicação. Sua principal característica se fundamenta na possibilidade de implementação de algoritmos computacionais e utilização de operações matemáticas, as quais são utilizadas em computadores comuns. Como mostra o autor Chemin N.U (2008) [15] em seu trabalho.

VARGAS, E. T. (2005) [63] propôs em seu trabalho um método baseado em Algoritmos Genéticos, com a função de estimar os parâmetros associados as formas de ondas, tais como amplitude, frequência e ângulo de fase das mesmas, referentes a uma proposição de relé de frequência. O método proposto baseou-se em Algoritmos Genéticos com representação real, tendo em vista a não necessidade de codificação dos valores logo na entrada do processo. O trabalho apresentou um estudo de uma das várias técnicas da computação evolutiva, conhecida como Algoritmo Genético, cuja aplicação é inspirada nos mecanismos da evolução natural das espécies identificado pelo naturalista Inglês Charles Darwin.

Chaari, O et al (1996) [14], Magnago, F.H.; Abur, A. (1998) [34], propuseram em seus artigos, implementar em relés digitais, algoritmos para detecção e localização de curtos-circuitos utilizando a técnica da transformada de wavelet.

Megahed, A.I et al (2008) [39] em seu artigo implementa um algoritmo proposto para relés de proteção baseado na transformada de wavelet para detecção de correntes residuais em transformadores utilizados em SEP.

Na referência Almeida, M. A. D (2005) [1] o autor relata que técnicas de proteção digital surgiram no final da década de 60, quando vários pesquisadores desenvolveram diversos algoritmos de proteção, inicialmente para linhas de transmissão. Estes trabalhos tiveram que aguardar literalmente o desenvolvimento adequado dos computadores digitais no que se refere à capacidade de computação e a custos para sua aplicação prática. Tal desenvolvimento só foi alcançado com o advento dos microprocessadores, o que tornou possível a competição a níveis comerciais com os relés analógicos convencionais, possuindo características de economia, flexibilidade, confiabilidade e versatilidade de comunicação.

Mason, C. Russell (2005) [13] mostra em seu livro a versatilidade e a importância dos relés digitais nos sistemas de geração e transmissão de energia.

Mota J. Bet al.(2008) [41] mostra na pratica a implantação de relés digitais nas unidades geradoras de Itaipu. No ano de 2006 entraram em funcionamento as duas novas unidades geradoras da usina de Itaipu, uma no setor de 60 Hz e uma no setor de 50 Hz. A instalação da proteção destas duas novas unidades geradoras trouxe, juntamente com o benefício da tecnologia digital, problemas e desafios. Os principais problemas encontrados foram: desempenho da proteção diferencial face as novas unidades serem compartilhadas com as unidades antigas, comportamento inadequado perante variações de frequência, entre outros enumerados pelos autores. Uma das conclusões do artigo refere-se as proteções digitais que segundo os autores devem ser submetidas a testes de bancada e ou de modelo, com variação da frequência

fundamental dos sinais de tensão e corrente, objetivando avaliar o seu desempenho e treinamento dos operadores, devido aos vários parâmetros de configuração dos relés digitais.

Crossley, P.A. e McLaren, P.G (1983) [18] fundamentados na teoria de propagação das ondas viajantes geradas pelo curto-circuito, apresentaram um relé de distância de alta velocidade. Através da informação relativa ao intervalo de tempo entre a primeira onda que atinge o relé e a correspondente onda refletida do ponto de falta que chega a este, estimou-se a localização da falta. O método foi aplicado para faltas em um sistema trifásico fazendo-se uso da teoria modal. A detecção da onda refletida foi função da correlação cruzada do sinal refletido contra o sinal inicial armazenado da onda. Quando o atraso da seção do sinal inicial corresponde a duas vezes a distância da falta, ocorre a máxima saída da função de correlação cruzada. Os parâmetros que influenciaram na exatidão da localização da falta são: o local, o tipo e o ângulo de incidência da mesma.

Coury, D. V et al (2007) [17] em seu livro faz um excelente explanação sobre as funcionalidades, aplicações e tecnologias utilizadas nos relés. Apresentando os estágios mais avançado na evolução de textos aplicados à proteção de equipamentos para sistemas elétricos de potência, explicando que os relés começaram como dispositivos eletromecânicos, por um período foram constituídos de componentes de estado sólido e tornaram-se microprocessados nas últimas décadas. O livro apresenta a fundamentação de proteção adaptativa, filosofia que permite e procura fazer ajustes automáticos em várias funções de proteção para torná-las mais cientes das principais mudanças das condições do sistema, bem como a moderna comunicação em proteção, a medição sincronizada de fasores, a aplicação da transformada wavelet na proteção, as aplicações de inteligência artificial na proteção, redes neurais artificiais, lógica fuzzy, agentes e finalmente algoritmos genéticos.



Neste tópico realizou-se uma síntese das principais referências que contemplam as questões associadas aos temas de GD, QEE, variações de frequência, relés e Wavelet. Conclui-se que, com a pesquisa realizada e a diversidade dos assuntos tratados por cada um dos autores conforme os temas abordados, a colaboração para construção do conhecimento é evidente, e assim fornecendo a este trabalho uma base sólida em termos de referencial bibliográfico.

## **Capítulo II**

# **Aspectos Gerais Sobre Geração Distribuída**

### **2.1 – Considerações Iniciais**

A matriz energética do Brasil é em sua maioria provinda de hidrelétricas, que possui um modelo centralizado e estatal, com unidades geradoras de grande porte, ironicamente distantes dos grandes centros de carga (consumidores) e conseqüentemente ligados através de extensas linhas de transmissão. Pode-se citar entre vários outros fatores motivadores para o desenvolvimento dos sistemas de Geração Distribuída (GD): os altos custos na construção de novas usinas geradoras, aos grandes impactos ambientais e a busca de novas alternativas para atender a crescente demanda de carga da atualidade. Uma das principais características de sistemas de GD está na variedade de tecnologias utilizadas para possibilitar o uso consciente de fontes alternativas para a produção de energia elétrica.

Este capítulo inicia-se com uma abordagem sobre GD, em termos de definição, legislação, regulamentação seguindo com a apresentação de suas vantagens. Na seqüência é feita uma descrição dos fatores relevantes sobre os possíveis impactos causados pela implantação de sistemas de GD, analisando os quesitos técnicos, como estabilidade, ajuste de proteção e qualidade. Finalizando, são feitas considerações gerais com relação ao extenso e diversificado tema, abordado no capítulo.

## 2.2 – Conceito e Legislação Vigente para Regulamentação de Sistemas de GD

A expressão GD surgiu por influência da língua inglesa. Existem na literatura vários termos coligados a GD os quais distintamente possuem uma conotação específica para cada vertente do assunto, exemplificando pode-se citar: *on-site generation*, *dispersed generation*, *decentralized generation*, *micropower*. As palavras “geração distribuída” de língua inglesa “*distributed generation*”, traduzida literalmente para língua portuguesa é adequada à representação da mensagem lingüística por ela trazida.

Os vários pontos de vista analisados acerca da definição de Sistemas de GD, [56] em sua tese, traz de forma sucinta citações literárias destas definições, vejamos algumas delas:

Um sistema de GD envolve pequenas quantidades de geração conectadas ao sistema de distribuição com o propósito de alimentação local (nível de subestação) de picos de carga e ou de tornar desnecessária a construção adicional, ou o reforço de linhas de distribuição locais.

Sistemas de energia pequenos, modulares, descentralizados, conectados ou não à rede de energia elétrica e localizados no local onde a energia é consumida ou próxima a ele.

Geração de eletricidade por usinas de pequeno porte localizadas próximas às cargas elétricas que elas suprem. O termo geralmente é usado para se referir a usinas que são pequenas o suficiente para serem conectadas ao sistema de distribuição em vez de ao sistema de transmissão. Dependendo do tamanho das cargas vizinhas e da capacidade da linha de distribuição à qual é conectada, o máximo tamanho da GD pode variar de uns poucos quilowatts até cinco megawatts. As menores unidades de Geração Distribuída comercialmente disponíveis hoje podem produzir trinta quilowatts.

Geradores de eletricidade (painéis solares, turbinas eólicas, geradores a biodiesel, células a combustível etc.) localizados próximos ao ponto de consumo. Enquanto as usinas de geração central continuam a prover energia à rede, os recursos distribuídos ajudam a suprir os picos de demanda e reduzir o carregamento no sistema.

GD é o uso de tecnologias de geração de energia de pequena escala localizadas próximas às cargas alimentadas. Ela permite às indústrias produzirem a sua própria eletricidade a partir de processo de co-geração a gás implementado em suas próprias instalações

Fontes independentes de geração de energia que estão em diversos pontos de uma rede de distribuição.

Compreende todas as instalações de geração que estão conectadas diretamente à rede de distribuição ou do lado do consumidor e que têm base no uso de fontes renováveis de energia ou de tecnologias para geração combinada de calor e energia.

Analisando as definições apresentadas observa-se que o termo GD é exposto e utilizado por cada autor ou instituição conforme sua prática ou sua realidade. Para satisfazer certas necessidades específicas as definições se tornam exclusivas para certas questões. É o caso do valor especificado para a potência instalada das unidades geradoras, sendo que algumas definições trazem como patamar máximo trinta megawatts, outras definições não focam a potência instalada, e sim uma geração realizada fora da rede central conectada ou não, mas sempre trazendo um foco de descentralização.

A definição legal de GD está registrada na legislação brasileira pelo decreto n.º 5.163/2004, formalizando que:

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. [10]

Partindo desta definição podemos analisar diversos fatores tais 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, são fatores que atualmente impulsionam a implantação de sistemas ditos como GD. Nos últimos anos a implantação de unidades de GD vem crescendo, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) do governo brasileiro visa buscar a utilização e diversificação da matriz energética de maneira renovável. Com isso sistemas energéticos como, energia eólica, solar, biomassa e pequenos aproveitamentos hidrelétricos são considerados imprescindíveis para o crescimento do sistema energético brasileiro. Assim a necessidade de leis, padrões, regulamentação, ou seja, uma legislação específica sobre sistema de GD é imprescindível por parte de nosso governo.

Nota-se que uma evolução gradativa da legislação e da regulamentação, o que demonstra a disposição das autoridades setoriais em estimular o segmento. O ponto forte foi o ano de 2003, através da lei 10.762 determinou-se que o desconto da tarifa de distribuição, concedido com a lei 9.427, deveria incidir sobre a produção e o consumo. Em 2007, mais um avanço na legislação, a lei 11.488 modificou o critério de 30 MW de potência instalada para potência injetada no sistema, com isso houve grande investimento por parte dos produtores. A potência adicionada pelas PCHs em 2007 (253 MW) foi quase cinco vezes maior que aquela observada em 2002 (51 MW). Além disso, entre janeiro e agosto de 2008 mais 353 MW foram acrescentados por este tipo de usina, enquanto que o relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aponta que, em 2009, serão mais 431 MW. [2]

Na tabela 1 é apresentada uma síntese cronológica sobre alguns dos principais dispositivos legais brasileiros ligados a GD. [11], [52], [10], [56].

Tabela 1: Dispositivos legais brasileiros ligados a Geração Distribuída

<b>Dispositivos legais</b>	<b>Descrição</b>
<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.
<b>Decreto n.º 2.003/1996</b>	Regulamentou a produção de energia elétrica por auto produtor e PIE
<b>Lei n.º 9.427/1996</b>	Instituiu a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)
<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 repotênciação 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 cogeradoras 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.
<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. 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

Um sistema de GD proporciona um aproveitamento de fontes locais de energia disponíveis não sendo necessárias obras grandiosas de conexão e transmissão com a matriz energética brasileira. Estas fontes são de pequeno porte conectadas a rede de distribuição e suprem uma possível necessidade energética do sistema elétrico interligado num determinado local. A título de exemplo, veja a figura 2:

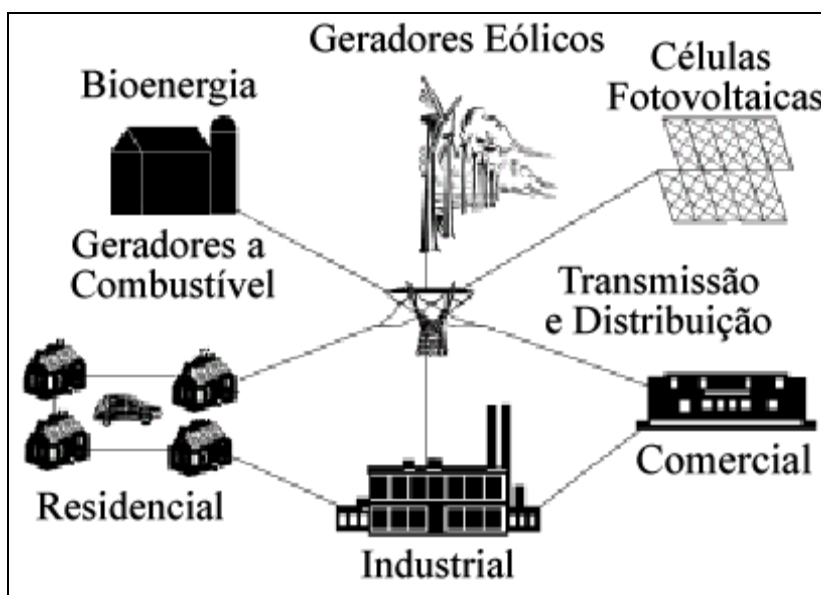


Figura 2: Fontes de geração de energia distribuída [26]

## 2.3 – Benefícios da Implantação de Sistemas de GD

O crescimento da GD provocou também a necessidade de incentivos a pesquisas e investimentos no setor, conforme descrito em [26]. Algumas causas de natureza 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, têm sido a motivação propulsora para universidades pesquisarem e analisarem as **vantagens** e os possíveis **impactos** causados pelo sistema de GD. Citam-se as seguintes principais vantagens [30]:

- Atendimento mais rápido ao crescimento da demanda (ou à demanda reprimida) por ter um tempo de implantação inferior ao de acréscimos proporcionados pela 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.
- Aumento da estabilidade do sistema elétrico, pela existência de reservas de geração distribuídas, conseqüentemente, exigindo menores reservas centrais.
- Redução das perdas na transmissão e dos respectivos custos, e adiamento no investimento para reforçar o sistema de transmissão.
- Redução dos investimentos para implantação, inclusive os das concessionárias.
- Redução dos riscos de planejamento.
- Aumento da eficiência energética, redução simultânea dos custos das energias elétrica e térmica, e colocação dos excedentes da primeira no mercado a preço competitivo.



- Redução de impactos ambientais da geração, pelo uso de combustíveis menos poluentes, pela melhor utilização dos combustíveis tradicionais e, em certos tipos de cogeração, com a eliminação de resíduos industriais poluidores.
- Benefícios gerais decorrentes da maior eficiência energética obtida pela conjugação da GD com a geração centralizada, e das economias resultantes.
- Maiores oportunidades de comercialização e de ação da concorrência no mercado de energia elétrica, na diretriz das Leis que reestruturaram o setor elétrico.

Na referência citada [30] o autor descreve algumas desvantagens do sistema de geração distribuída:

- 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;
- Maior complexidade administrativa, contratual e comercial;
- Maiores dificuldades de coordenação das atividades.
- Em certos casos, diminuição do fator de utilização das instalações das concessionárias de distribuição, o que tende a aumentar o preço médio de fornecimento das mesmas.
- Para o produtor independente, a interligação à rede acarreta obviamente certa redução 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.

## 2.4 – Impactos pertinentes com o advento da Geração Distribuída

Com a venda de energia elétrica por parte dos proprietários de unidades de GD, visando a obtenção de lucros, colocando os geradores para operar o maior tempo possível, este se preocupam com a segurança de seus geradores ajustando suas proteções de forma mais rigorosa que o habitual. Com isso a possibilidade de desligamento automático destes geradores aumenta, lesando a qualidade e a confiabilidade do sistema elétrico. O desligamento indevido de geradores por parte dos sistemas de GD agrava a estabilidade do sistema elétrico, elevando o número de atuações indevidas dos disjuntores de proteção da rede, os quais foram projetadas para um sistema de geração centralizada. Os problemas locais que aparecem em um sistema de Geração Distribuída, como os aspectos de proteção, estabilidade de tensão e frequência, controle de reativos são exemplos de que, caso os níveis de tensão e frequências estejam fora dos padrões adequados, causam impactos na estabilidade do sistema elétrico. Na sequência uma descrição dos impactos causados pela GD, citadas por alguns autores.

Com o novo cenário incluindo GD, torna-se necessário uma avaliação dos impactos técnicos que podem ocorrer na operação de sistemas de distribuição, uma vez que essas redes não foram originalmente projetadas para suportar uma significativa inserção de unidades geradoras.

Os autores [37] em seu trabalho, determinaram o impacto da instalação de geradores síncronos de pequeno e médio porte na operação de redes de distribuição do ponto de vista de regime permanente. 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 realizada a partir da estabilidade em regime permanente, identificando as barras onde a instalação de GD proporcionaria a melhoria do 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 itens anteriores. Com estes dados verificou-se a máxima quantidade de GD que se poderá injetar em cada local, sem que se tenham violações de restrições operativas. A análise da estabilidade transitória por sua vez também possibilitou concluir que o nível de penetração de GD depende dos valores utilizados nas configurações da proteção, e que estes estejam de acordo com os valores de tempo de eliminação da falta para cada condição de operação do sistema.

Os principais aspectos técnicos analisados por [12] são: **Fluxo de potência, perdas elétricas e correntes de curto-circuito**, com a inserção de geradores síncronos na operação de redes de distribuição. As redes de distribuição são projetadas originalmente para entregar potência da subestação para os consumidores. Os fluxos de potência ativa são geralmente unidirecionais. A integração de geradores distribuídos para operar junto com os sistemas 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. Conclui-se que a GD pode influenciar a estabilidade de tensão de duas formas:

a) A GD operando em coordenação com as exigências locais da carga. Sempre que a carga local na rede de distribuição estiver aumentando, a produção local será aumentada também e vive-versa, neste caso, a GD reduz as variações entre o máximo e o mínimo nível de tensão, comparadas a uma situação sem GD. Um benefício da GD para o sistema, pois as variações de tensão em certas regiões são críticas.

b) A GD não opera em coordenação 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, porque o nível de tensão mínimo se manteria (*geralmente na situação de carga máxima, sem GD*), mas o nível máximo da tensão aumentaria (*carga leve, mas GD operando com máxima geração*). Neste caso o principal objetivo seria a venda de energia elétrica.

Na análise das perdas elétricas, verificou-se que para um máximo carregamento do sistema, as perdas elétricas diminuíram até certo ponto com a inserção dos geradores distribuídos, até chegar a um limite de saturação. Para a situação de carregamento mínimo, independente do tipo de controle dos geradores, as perdas aumentaram, e isso é devido ao fato da energia gerada estar sendo exportada ao sistema de sub-transmissão. A inserção de geradores distribuídos provocou um aumento nos níveis de curto-circuito, devido à contribuição dos geradores. Foi visto então que essa contribuição depende do tipo de gerador, e nesse caso o que mais contribuiu foi o gerador síncrono com fator de potência adiantado.

Dentre os principais impactos, de particular interesse [26] destacou: **os impactos na regulação de tensão; impactos na análise de redes de distribuição; impactos devido as diferentes localizações da GD; impactos na estabilidade do sistema elétrico de potência, impactos na qualidade de energia e impactos do ilhamento.** Estas questões foram abordadas no âmbito da modelagem dos componentes, sendo feita uma reavaliação dos parâmetros dos modelos existentes. Observou-se que a inserção de uma, ou mais unidades de geração próximas a unidade central de energia, pode alterar a coordenação da proteção, onde um curto-circuito após o fusível pode conduzir à operação não desejada deste, sem a devida atuação dos disjuntores. Com a relação a estabilidade de tensão enfatiza-se que um problema que poderá ocorrer na regulação de tensão se deve ao fato de existirem diversos reguladores de tensão na rede.

Um sistema de distribuição pode ter transformadores com Tap automático, ajustados para permanecer numa determinada faixa de tensão já programada anteriormente, se no mesmo sistema de distribuição estejam instalados geradores com a intenção de também regular a tensão, poderá ocorrer uma competição entre os reguladores de tensão do transformador e do gerador causando um modo oscilatório na tensão [26].

A situação de ilhamento é presente 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. Esta condição de ilhamento ocorre após algum distúrbio ou falta, onde o sistema é desligado pelo sistema de proteção. Neste tipo de impacto, após a ocorrência de faltas e distúrbios, é normal que o sistema tente se recompor em seguida, e isto, realmente acontece rapidamente através do fechamento dos mesmos dispositivos de proteção, 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. [26].

O impacto na qualidade de energia pelos sistemas de GD é real, deste modo, atualmente é uma das questões mais seriamente estudadas. A sensibilidade de alguns equipamentos industriais e comerciais hoje utilizados necessita de parâmetros estáveis no sistema elétrico. Fontes alternativas de energia como células fotovoltaicas e turbinas eólicas podem trazer grandes benefícios ao sistema de potência, como exemplo a utilização de fontes não poluentes e renováveis. Porém, alguns cuidados especiais devem ser tomados com estes tipos de fontes de geração.

### **2.5 – Considerações finais**

Foi possível com a descrição deste capítulo analisar e conhecer os fundamentos sobre o tema GD, também referenciada como Geração Dispersa, Geração *on-site* ou Geração Descentralizada. Como citado, existem vários termos para designar este tipo de geração, assim como as características que devem ser utilizadas para definir um empreendimento como GD.

Não se teve aqui preocupação em fazer uma revisão bibliográfica extensa sobre o assunto, sendo o tema GD diversificado e de várias vertentes técnicas. Entretanto foram exploradas algumas definições e realizadas breves descrições sobre o assunto. Conclui-se que notoriamente 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 com foi citado sobre a resolução normativa ANEEL n.º 247/2006 e a lei n.º 11.488/2007 [3].

Ênfase foi dada aos impactos causados pela implantação de unidades de Geração Distribuída. Vale ressaltar que uma avaliação sobre o fluxo de potência, curto-circuito, aspectos relacionados à proteção e estabilidade de tensão e frequência de sistemas de distribuição na presença de geração distribuída, constitui um promissor campo de pesquisa na atualidade. É importante citar que deve-se avaliar até que ponto as características do sistema de distribuição serão afetadas. Vários estudos estão sendo realizados no sentido de dimensionar 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. Exemplificando, os geradores de parques eólicos e os geradores de PCHs possuem dinâmica de funcionamento distintas, e os prováveis impactos de estabilidade no sistema, por sua vez serão diferentes. Os geradores eólicos que utilizam geradores de indução irão fornecer energia ativa e absorver reativos da rede. Outro exemplo, sistemas fotovoltaicos fornecerão potência ativa, porém em seu funcionamento de conversão de energia podem introduzir harmônicos no sistema, afetando a qualidade da energia.

Fica claro que o crescimento dos sistemas de GD não deve ser pautada por buscar somente melhores custos de produção, diminuição dos impactos ambientais ou simplesmente para o comércio da energia, mas, aliado a este crescimento, deve-se conjugar pesquisas e

projetos que possam ter como objetivo a estabilidade, confiabilidade e a qualidade do sistemas elétricos de potência.

O próximo capítulo retrata em especial a questão da Qualidade de Energia Elétrica tendo como ênfase nesta dissertação os impactos causados pelos sistemas de Geração Distribuída.

## Capítulo III

# Qualidade de Energia - Enfoque Geração Distribuída

### 3.1 – Considerações Iniciais

Existem muitas e diferentes razões para esse enorme aumento de interesse em QEE (Qualidade de Energia Elétrica). Por exemplo, além dos equipamentos terem se tornado menos tolerantes a distúrbios de tensão, também os processos de produção se tornaram menos tolerantes à operação incorreta de tais equipamentos. O aumento da utilização de dispositivos eletrônicos de potência aumentou, na mesma proporção, os distúrbios (ou deformações) na corrente do sistema como um todo. Considerando o comportamento não ideal do processo de transmissão de energia elétrica, são obtidas então deformações na tensão também. A geração distribuída e o uso de fontes renováveis de energia criam novos problemas de qualidade de energia. Até mesmo o aumento de consumidores interessados ou informados sobre QEE, o que leva ao aumento de reclamações nos órgãos competentes, é um fator responsável pelo aumento da necessidade de indicadores de qualidade.

Dessa discussão surge então a pergunta: o que é qualidade de energia elétrica? Muitos, e algumas vezes conflitantes entre si, são os conceitos de QEE. Em suma a QEE possui três níveis de qualidade, a saber: Qualidade do atendimento, Qualidade do serviço e Qualidade do produto. A qualidade no atendimento refere-se as cobranças indevidas, taxas, tempo de atendimento etc. A qualidade no serviço esta relacionada a operação e manutenção do sistema elétrico, proporcionando para os clientes o mínimo de interrupção aceitável. A qualidade no produto possui um foco técnico, que diz respeito à conformidade do produto que, do ponto de vista ideal, seria a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constante, que é o conceito abordado neste trabalho.



A qualidade de energia da rede elétrica pode ser deteriorada por falhas e operações de chaveamento na rede, pela ocorrência de transitórios ou pelos distúrbios causados pela operação de cargas poluidoras, principalmente no que se refere à flicker, harmônicos e desequilíbrio entre fases. A natureza desses distúrbios está relacionada à capacidade de curto-circuito, que corresponde a uma medida da impedância interna, que depende da configuração da rede, impedâncias de seus componentes, potências geradas.

Neste capítulo tem-se inicialmente a descrição e a definição dos distúrbios relacionados a QEE segundo a norma da IEE 1159-1995. No tópico 3.3 tem-se uma análise descritiva sobre os impactos causados pela inserção de sistemas de GD na QEE. Finalizando o capítulo, com considerações pertinentes ao assunto abordado.

### **3.2 – Distúrbios relacionados à QEE**

Com o inevitável e essencial crescimento dos sistemas de Geração Distribuída e a privatização do setor elétrico, as atividades de geração, transmissão e distribuição por sua vez tornam-se um comércio, o que motiva a busca pela qualidade nos serviços e no produto final por parte de todos aqueles envolvidos no processo de produção de energia elétrica, estes serviços envolvem o diagnóstico, solução e o impacto econômico de qualquer anomalia sobre o sistema elétrico.

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

Estes distúrbios afetam comumente a tensão e a frequência do sistema, para analisar estas duas grandezas comumente empregadas para descrever a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) devem ser observadas três características principais: [21]

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

Quando a tensão e ou frequência do sistema elétrico são afetados, podemos ter um caso de instabilidade do sistema, ou seja, perda de estabilidade. A estabilidade de um sistema de potência está ligada ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas. Após a ocorrência de uma perturbação, com a extinção da perturbação, as máquinas deverão voltar ao seu estado de funcionamento normal. Ao contrário, se houver qualquer mudança na configuração do sistema, tais como, perda de carga, linhas de transmissão, fortes fluxo de reativos, etc., ocorrerá um desequilíbrio entre a geração e a carga, e assim as máquinas geradoras estarão trabalhando em outro ponto de operação. É primordial que, em qualquer situação, as máquinas geradoras interligadas no sistema permaneçam em sincronismo.

Para definir perda de estabilidade de acordo com a perturbação, [42] faz uma distinção entre perda de estabilidade transitória e perda de estabilidade dinâmica.

**Perda de estabilidade transitória** - Perda de estabilidade quando o sistema é submetido a uma grande perturbação, como, por exemplo, um curto-circuito no lado de alta tensão do sistema de transmissão, perda de uma grande unidade geradora, etc. Se a instabilidade se verificar na primeira oscilação do ângulo de torque da máquina, o qual depende muito do ponto de operação do sistema e do tempo de duração da perturbação, tem-se um caso típico de instabilidade transitória [42].

Nesses casos, os reguladores de tensão rápidos são altamente importantes, pois, atuam diminuindo o tempo de desequilíbrio entre a carga e a geração. Caso haja perda de estabilidade,

o uso de controladores suplementares não faz efeito, pois geralmente durante uma grande perturbação os reguladores de tensão se encontram operando nos limites.

**Perda de estabilidade dinâmica** - Perda de estabilidade quando o sistema é submetido a pequenas perturbações, como, por exemplo, uma suave mudança no carregamento do sistema, uma pequena variação na tensão das máquinas, etc. Essa instabilidade é geralmente provocada pela existência de um modo de oscilação instável associado a algum elemento de controle (ver figura 3) [42].

Observa-se, por exemplo, que quando há variações no nível de carga de um sistema (aumentando ou diminuindo a carga), têm-se, mesmo de forma gradual, oscilações, porém, não de forma apreciáveis. O limite de estabilidade dinâmica refere-se ao máximo fluxo de potência possível em um ponto particular do sistema elétrico, sem perda de estabilidade.

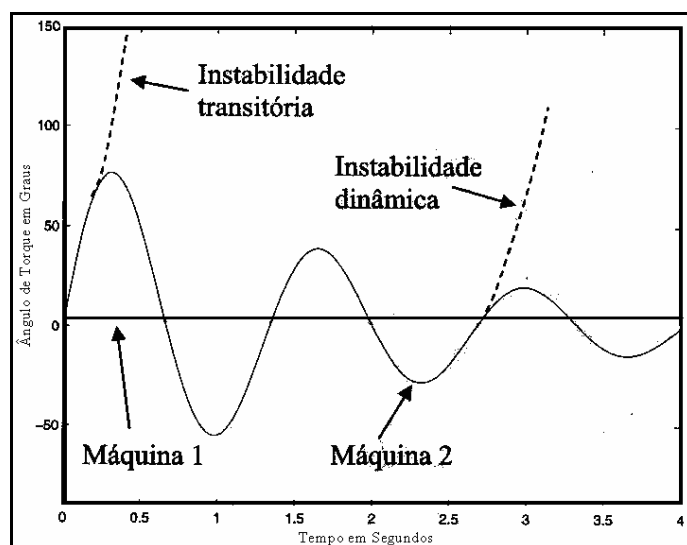


Figura 3: Análise da estabilidade de um sistema de duas máquinas, durante uma perturbação [41].

Os órgãos governamentais avaliam a QEE produzidas pelas concessionárias através de índices específicos, tais como, dentre outros, **DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora)** e **FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora)**, que é o intervalo de tempo em e o número de interrupções ocorridas, em média,

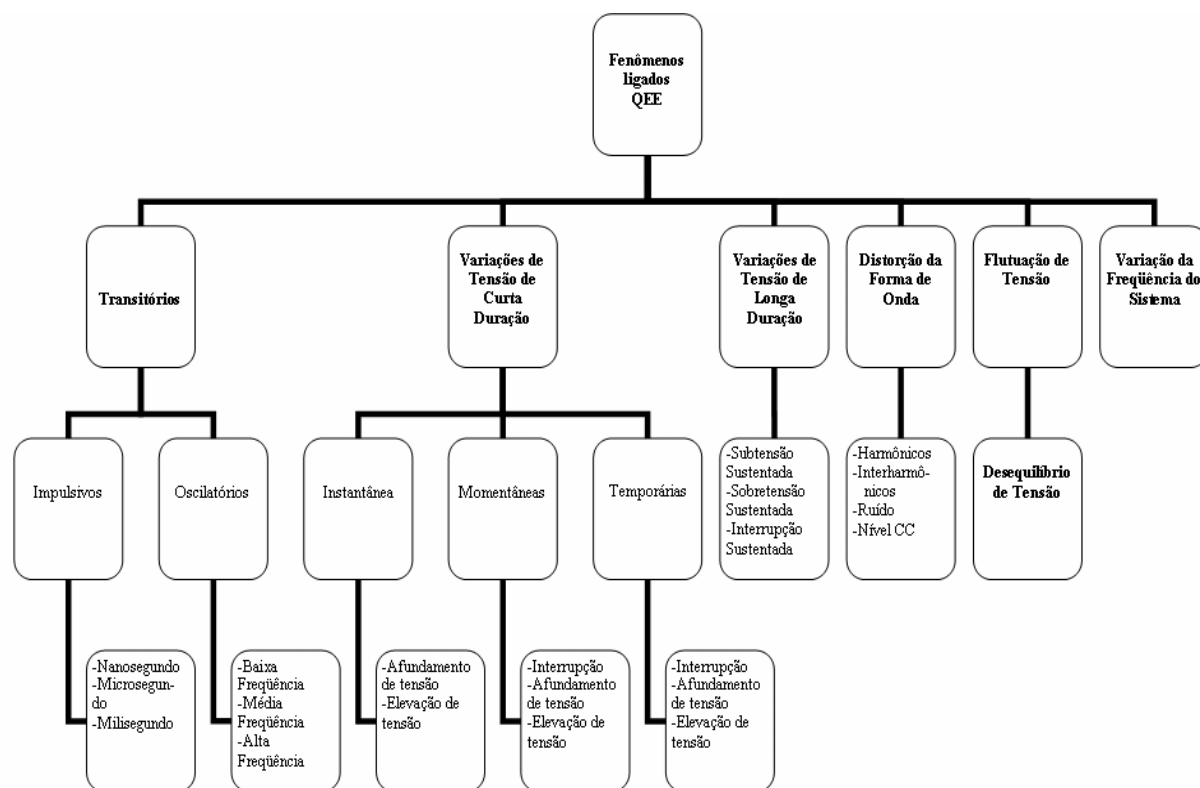
no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado respectivamente.

O **Indicador de Continuidade** é um índice de representação quantificável do desempenho de um sistema elétrico, utilizado para a mensuração da continuidade apurada e análise comparativa com os padrões estabelecidos. Estes índices foram estabelecidos conforme definições da Resolução nº 024 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. É importante observar que estes índices estão relacionados somente com o intervalo de tempo em que o sistema permanece desligado e a frequência de tais ocorrências. Sendo assim, estes índices não visam avaliar e ou em termos de detectar certas alterações nas formas de onda e na frequência, estabilidade, ruídos e distorções harmônicas, que podem acarretar problemas operacionais nos equipamentos dos consumidores. Tratando-se de níveis de tensão, outro documento importante para QEE é a Resolução nº 505 da ANEEL que trata dos níveis de tensão em regime permanente, focando a importância em se tratando de casos como afundamento, elevação e interrupção da energia elétrica.

Com o desenvolvimento tecnológico, principalmente da eletrônica e o conseqüente o surgimento de equipamentos sensíveis às alterações de sinais da rede elétrica, como os baseados em microprocessadores, computadores, controladores entre outros, tanto entre os consumidores industriais como os comerciais, a preocupação com a QEE se torna cada vez mais inerente por parte dos consumidores de fornecedores.

Com o intuito de evidenciarmos os distúrbios relacionados à QEE, faz-se necessário para o momento verificar as definições e características principais destes distúrbios, apresentadas pelo IEEE 1159-1995, no quadro abaixo tem-se as categorias e características típica de fenômenos eletromagnéticos, o conteúdo espectral, a duração típica e amplitude de tensão; conforme recomenda o IEEE 1159-1995 [29].

Evidencia-se de forma global, a figura 4, que traz estes fenômenos, descritos em um fluxograma e a tabela 2 com as categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos.



**Figura 4: Fluxograma com as descrições dos principais distúrbios relacionados a QEE.**

Tabela 2: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos [29]

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
<b>1.0 – Transitórios</b>			
1.1 – Impulsivos			
1.1.1 – Nanosegundo	5 ns	< 50 ns	
1.1.2 – Microsegundo	1 $\mu$ s	50 ns - 1 ms	
1.1.3 – Milisegundo	0,1 ms	> 1 ms	
1.2 – Oscilatórios			
1.2.1 - Baixa Frequência	< 5 kHz	3 - 50 ms	0,4 pu
1.2.2 - Média Frequência	5 – 500 kHz	20 $\mu$ s	0,4 pu
1.2.3 - Alta Frequência	0,5 - 5 MHz	5 $\mu$ s	0,4 pu
<b>2.0 - Variações de Tensão de Curta Duração</b>			
Instantânea			
2.1 - Afundamento de tensão		0.5 - 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.2 - Elevação de tensão		0.5 - 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
Momentânea			
2.3 – Interrupção		0.5 ciclos -3 s	< 0.1 pu
2.1 - Afundamento de tensão		30 ciclos - 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2 - Elevação de tensão		30 ciclos - 3 s	1,1 – 1,4 pu
Temporária			
2.3 – Interrupção		3 s - 1 minuto	< 0,1 pu
2.1 - Afundamento de tensão		3 s - 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
2.2 - Elevação de tensão		3 s - 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
<b>3.0 - Variações de Tensão de Longa Duração</b>			
3.1 - Subtensão Sustentada		> 1 minuto	0,8 – 0,9 pu
3.2 - Sobretensão Sustentada		> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
3.3 - Interrupção Sustentada		> 1 minuto	0,0 pu
<b>4.0 - Distorção da Forma de Onda</b>			
4.1 – Harmônicos	0 – 100 <sup>o</sup>	regime permanente	0 – 20%
4.2 – Interharmônicos	0 - 6 kHz	regime permanente	0 – 2%
4.3 – Ruído	Faixa ampla	regime permanente	0 – 1%
4.4 – Nível CC		regime permanente	0 – 0,1%
<b>5.0 - Flutuação de Tensão</b>	< 25 Hz	intermitente	0,1 - 7%
<b>6.0 - Desequilíbrio de Tensão</b>		regime permanente	0,5 - 2%
<b>7.0 – Variação da Frequência do Sistema</b>		< 10 s	

O IEEE através do comitê 22 [29], juntamente com outras entidades internacionais, coordena normalizações junto à chamada comunidade de qualidade de energia elétrica. Basicamente os distúrbios são definidos pela amplitude e duração destes fenômenos eletromagnéticos, os quais são os mais focados citados nos tópicos a seguir [25].

### 3.2.1 – Transitórios

Pode-se citar algumas causas pertinentes aos fenômenos transitórios ocorrentes no sistema elétrico: As 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. Na sequência descrevemos de forma objetiva os fenômenos ligados a QEE onde através da referencia citada, [29] onde encontra-se de forma normativa, uma abordagem completa, ao tema tratado.

#### *Transitórios Impulsivos*

Os transitórios impulsivos são decorrentes de descargas atmosféricas. Sua definição pode ser formulada como uma 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 bastante diferente daquela da rede elétrica. Os transitórios impulsivos geralmente são definidos por um tempo de subida e outro de descida do impulso. Como exemplo a figura 5 mostra uma corrente típica de um transítório impulsivo, de uma descarga atmosférica.

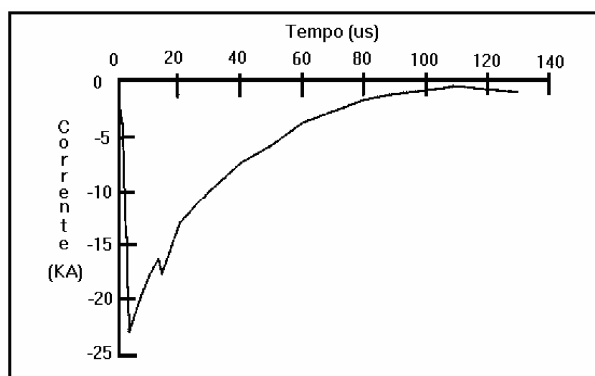


Figura 5: Corrente impulsiva, descarga atmosférica [21]

Tratando-se de descargas atmosféricas conseqüentemente haverá altas sobretensões transitórias podem também fluir ao longo do condutor terra. Existem numerosos caminhos através dos quais as correntes de descarga podem penetrar no sistema de aterramento, tais como o terra do primário ou do secundário de um transformador e as estruturas do sistema de distribuição. Segundo [6] os principais problemas relacionados com a QEE causados referentes ao sistema de aterramento são:

- Considerável elevação do potencial do terra local em relação a outros terras. Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra, tal como um computador conectado ao telefone através de um *modem*, podem falhar quando submetidos a altos níveis de tensão.
- Indução de altas tensões nos condutores fase, quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra.[6]

Quando ha alguma incidencia de descarga atmosferica em pontos de extra alta tensão nas linhas de transmissão, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou estações abaixadoras. A onda de tensão ao percorrer a linha, desde o ponto de incidência até as subestações abaixadoras para a tensão de distribuição, tem a sua crista atenuada consideravelmente, o que tende a eliminar os efeitos advindos de descargas atmosféricas ocorridas em nível de transmissão, em consumidores ligados em nível de baixa tensão. Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão, e supostamente localizados nas proximidades do ponto de descarga, estarão sujeitos a tais efeitos, podendo danificar alguns equipamentos de suas respectivas instalações. [6]

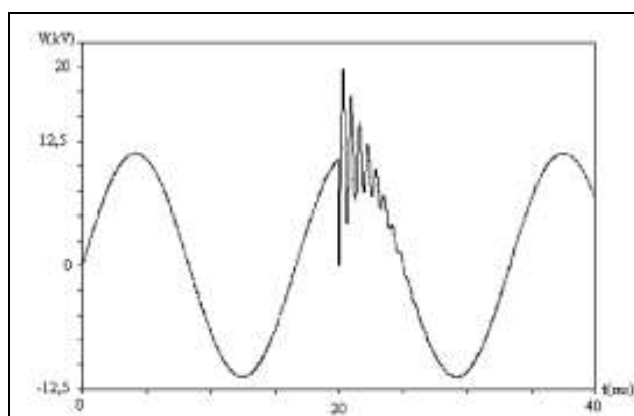
### ***Transitórios Oscilatórios***

Os transitórios oscilatórios, ou mesmo, oscilação transitória, são mais freqüentemente causados pela energização de bancos de capacitores, que as vezes resulta em oscilações de tensão com freqüência entre 300 e 900 Hz, com magnitude entre 2,0 pu, sendo os valores típicos de 1,3 a 1,5 pu, com duração entre 0,5 a 3 ciclos dependendo das características de amortecimento do



sistema, como citado estes podem ser definidos em função do conteúdo espectral, duração e magnitude da tensão. Além dos bancos de capacitores, este tipo de transitorio são decorrentes também da energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, etc.

Com a expansão o uso de banco de capacitores pelas concessionárias para a manutenção dos níveis de tensão, e pelas indústrias para correção do fator de potência, tem-se tido uma preocupação especial no que se refere à possibilidade de se estabelecer uma condição de ressonância, conforme comentário de [6]. Tal condição pode ser satisfeita 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 e energização de transformadores. Outro fato importante citado pelo autor é a desenergização de cargas indutivas a qual pode gerar impulsos de alta frequência, apesar de serem de curta duração, estes transitórios podem interferir na operação de cargas eletrônicas. Para eliminar e ou minimizar este tipo de transitorio, filtros de alta-frequência e transformadores isoladores podem ser usados. Abaixo as figuras 6, 7 e 8 representativas dos transitórios oscilatórios.



**Figura 6: Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores. Tensão no terminal [21].**

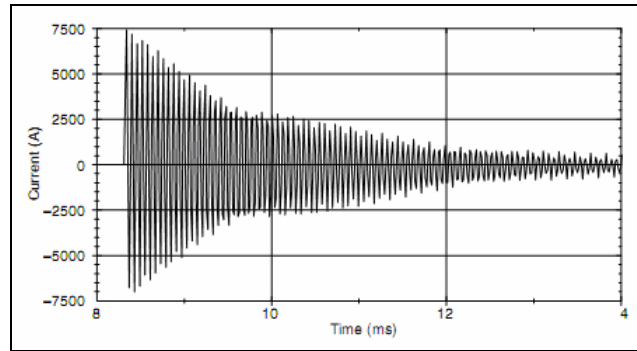


Figura 7: Chaveamento de um banco de capacitores. Fluxo de Corrente no terminal [29].

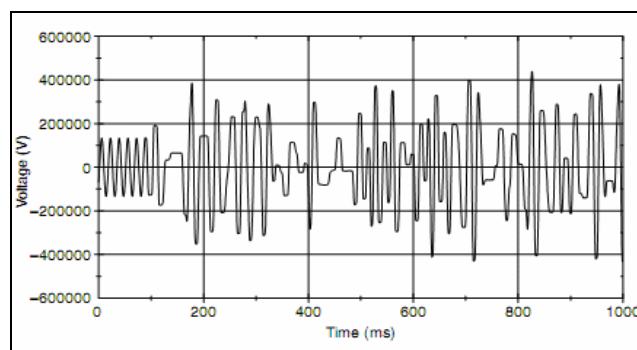


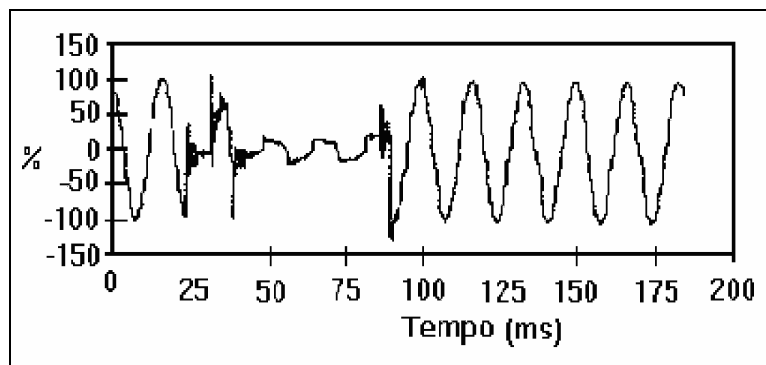
Figura 8: Fenômeno de ferorressonância em energização de transformadores [29].

### 3.2.2 – Variações de Tensão de Curta Duração

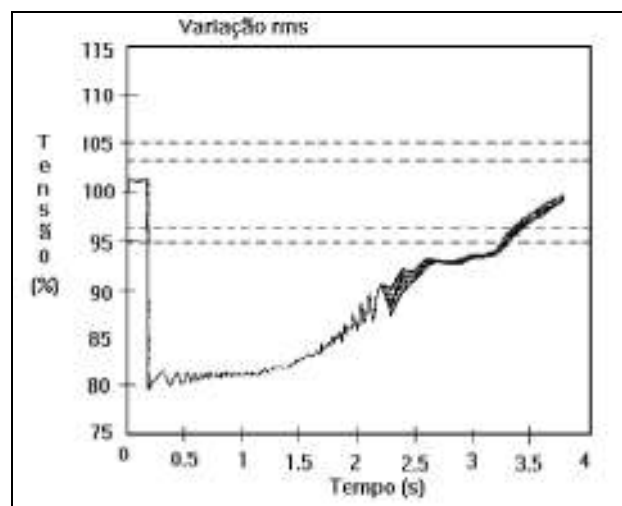
Conforme apresentado pelo [29], variações de tensão de curta duração apresentam duração típica entre 0,5 ciclo e 1 minuto, e podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração do fenômeno. São causadas por condições de falta, energização de grandes cargas, 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.

A referência [29], que trata sobre o monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica, descreve os distúrbios de **afundamento de tensão, elevação de tensão e interrupção de tensão**, sendo que cada um destes distúrbios possui uma particularidade para sua definição, na sequência tem-se na integra a descrição destes, conforme a referencia [29]:

- **Afundamento de tensão:** Também referenciado como “Sag - afundamento”, como o próprio nome induz uma subtensão de curta duração, caracterizada por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto. Causados por faltas em sistemas de transmissão e de distribuição e ou pela energização de grandes cargas (partida de grandes motores e corrente de energização dos transformadores). Afundamentos de tensão com período inferior a 10ms e abaixo de 10% não são levadas em consideração, quedas de tensão de curta duração menores que 10% são toleradas pela maioria dos equipamentos elétricos [29].



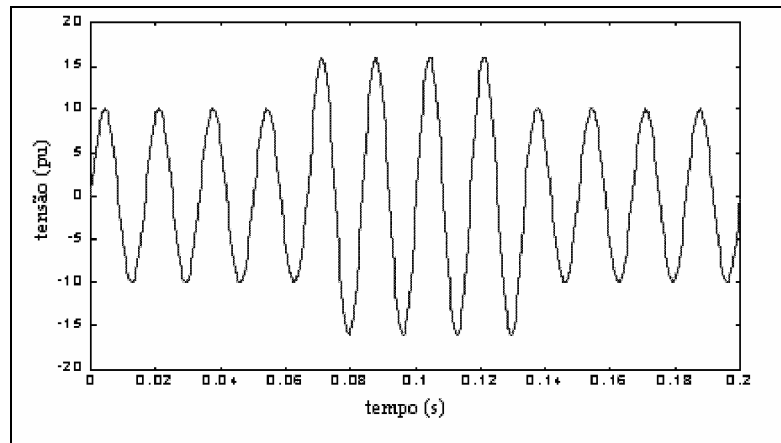
**Figura 9: Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra [29]**



**Figura 10: Afundamento de tensão ocorrido pela partida de um motor [29]**

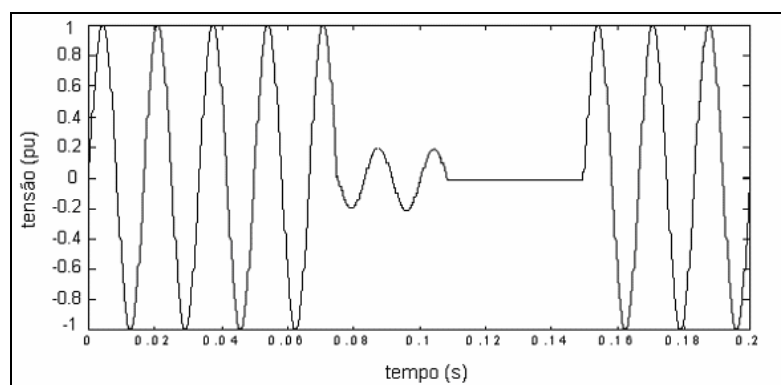
- **Elevação de Tensão:** “Swell - ondulação” é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, para a frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Assim

como os afundamentos de tensão, as elevações de tensão estão geralmente associadas com as condições de falta no sistema, principalmente aos curtos-circuitos fase-terra, sendo que nestas condições as fases não defeituosas tendem a sofrer uma elevação de tensão [29].



**Figura 11: Elevação de tensão de 6% na fase “A” originado por uma falta fase-terra na fase “C” [29]**

- Interrupção de tensão: Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto. Este tipo de interrupção pode ser causado por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão quando estas são devidas a faltas no sistema supridor [29].



**Figura 12: Interrupção momentânea devido a um curto-circuito, com afundamento de tensão. [29]**

Existem várias medidas que podem ser tomadas por parte de consumidores, concessionárias e fabricantes de equipamentos no sentido de diminuir o número e a severidade dos afundamentos de tensão de curta duração. Algumas destas medidas são citadas e bem esclarecidas por [6] em sua dissertação, relacionadas abaixo os tópicos referentes:

- Utilização de transformadores ferroressonâtes, conhecidos também como CVT's (Constant Voltage Transformers).
- Utilização de UPS's (Uninterruptible Power Supply). fundamentam-se nas operações on-line e standby,.
- Utilização de conjuntos motor-gerador (M-G).
- Utilização de métodos de partida de motores.
- Melhorar as práticas para o restabelecimento do sistema da concessionária em caso de faltas.

### 3.2.3 – Variações de Tensão de Longa Duração

As variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, estando esta na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto. Resolução 505 da ANEEL [4], define os índices que caracterizam variações de tensão de longa duração. Estas 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 [6] [21]. Os tópicos seguintes descrevem o conceito destes fenômenos, descrição referenciada na íntegra por [6].

- Interrupções Sustentadas: Quando a tensão de suprimento permanece em zero por um período de tempo superior a 1 minuto, a variação de tensão de longa duração é considerada uma interrupção sustentada. Interrupções de tensão por um tempo superior a 1 minuto são freqüentemente permanentes e requerem a intervenção da concessionária. As interrupções

sustentadas podem ocorrer devido à manutenção programada ou não. A maioria delas ocorre de forma não programada e algumas das causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, etc.[6]

- **Afundamentos de Tensão Sustentados:** É caracterizado por um decréscimo no valor eficaz da tensão a valores menores que 0,9 pu, com período de duração maior que 1 minuto. Os afundamentos de tensão são decorrentes principalmente do carregamento excessivo dos circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Outros fatores que contribuem para as subtensões são: a conexão de cargas à rede elétrica, o desligamento de bancos de capacitores e, conseqüentemente, o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão. [6]

- **Elevações de Tensão Sustentadas:** Possui com característica um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 pu (valores típicos entre 1,1 e 1,2 pu) por um período de duração maior que 1 minuto. As sobretensões de longa duração podem ser o resultado do desligamento de grandes cargas ou da energização de um banco de capacitores. Com relação às conseqüências das elevações de tensão de longa duração, estas podem resultar em falha dos equipamentos. Dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensões, embora transformadores, cabos, disjuntores, transformadores de correntes e máquinas rotativas, geralmente não apresentam falhas imediatas. Entretanto, estes equipamentos, quando submetidos a elevações de tensão sustentadas, poderão ter as suas vidas úteis reduzidas. Relés de proteção também poderão apresentar falhas de operação durante as elevações de tensão. A potência reativa fornecida pelos bancos de capacitores aumentará com o quadrado da tensão durante uma

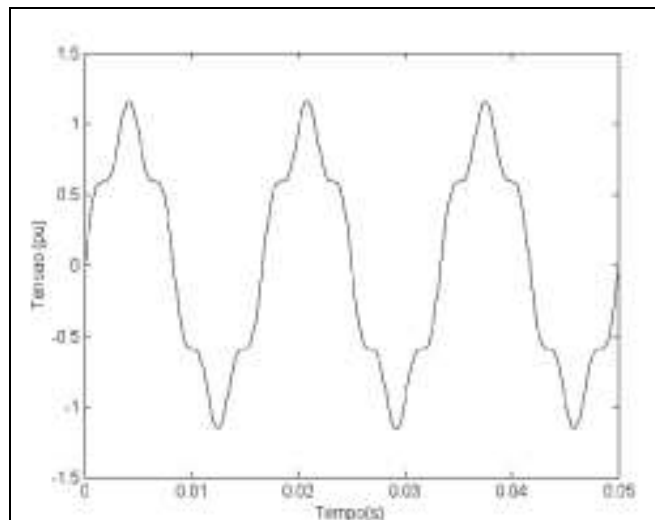
condição de sobretensão, enquanto que a iluminação poderá também ser aumentada em tal condição. [6]

Dentre algumas opções para a solução de tais problemas, destaca-se a troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, tanto em sistemas de concessionárias como em sistemas industriais; a instalação de compensadores estáticos de reativos, possibilitando um controle maior do nível da tensão; instalar reguladores de tensão para estabilizar o nível da tensão; instalar capacitores *shunt* para reduzir a corrente do circuito; instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva; instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância da linha.

### 3.2.4 – Distorções da Forma de Onda

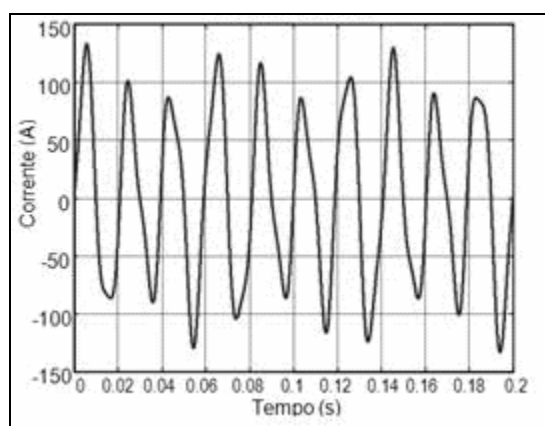
A distorção da forma de onda é definida como um desvio da situação de regime permanente (forma de onda puramente senoidal - frequência fundamental) caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Os cinco tipos principais de distorções citadas por [6] [21] são:

- Distorções Harmônicas: Harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia. As distorções harmônicas estão em desacordo com os objetivos da qualidade de suprimento promovido pelas concessionárias de energia elétrica, as quais devem fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Vale ressaltar que o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor, prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica [6].



**Figura 13: Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem [59].**

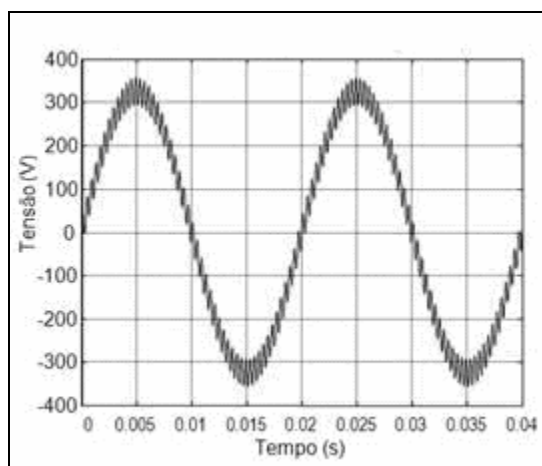
- **Inter-harmônicas:** são componentes de frequência, em tensão ou correntes, que não são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60 Hz). Estas podem aparecer como frequências discretas ou por uma larga faixa espectral. As inter-harmônicas podem ser encontradas em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais carrier (sinal superposto ao sinal de tensão utilizado para transmissão de informações) em linhas de potência também podem ser considerados como interharmônicos [6].



**Figura 14: Forma de onda com distorções Interharmônicas [59].**

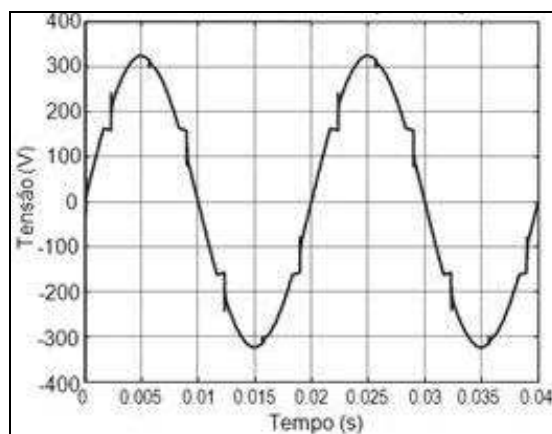


- **Ruídos:** Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências de até 200 kHz, as quais se apresentam superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro em linhas de transmissão. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas e, comumente, estão relacionados com aterramentos impróprios. Basicamente, os ruídos consistem de uma distorção indesejada no sinal elétrico que não pode ser classificado como distorção harmônica e ou transitório.[6].



**Figura 15: Tensão com um sinal de ruído de alta frequência [59].**

- **Notching:** É um distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. 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 [6].



**Figura 16: Notches micro cortes na tensão [59].**

- **Nível CC:** É a presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA (“DC offset” termo muito utilizado) pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil do equipamento. Pode também causar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores [6].

Finalizando este tópico algumas considerações importantes: Para fins práticos, as componentes harmônicas de ordens elevadas (acima da 25<sup>o</sup> a 50<sup>o</sup> ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência, não representando perigo aos sistemas de potência. Atualmente com o avanço tecnológico e o desenvolvimento da eletrônica de potência, o conteúdo harmônico tem-se elevado provocando efeitos indesejáveis em diversos equipamentos ou dispositivos ligados ao sistema elétrico, seja este industrial ou residencial. Existem vários tipos de cargas elétricas com características não lineares implantadas em grande quantidade no sistema elétrico brasileiro, exemplificando:

- Motores de corrente alternada;
- Transformadores alimentadores;
- Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
- Fornos a arco;
- Motores de corrente contínua controlados por retificadores;

- Motores de indução controlados por inversores com comutação;
- Processos de eletrólise através de retificadores não controlados;
- Fornos de indução de alta frequência e ou controlados por reatores saturados;
- Cargas de aquecimento controladas por tiristores;
- Geradores de indução com Controladores de Tensão;
- Reatores eletrônicos;

Como a presença de harmônicos nas linhas de distribuição de energia origina problemas nos equipamentos e componentes do sistema elétrico, cabe aqui citar alguns problemas decorrentes dos harmônico nomeadamente [59].

- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas;
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- Problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- Aumento nas perdas dos condutores elétricos;
- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dielétrico;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (flicker – para o caso de ocorrência de sub-harmônicos);
- Erros nos medidores de energia elétrica e instrumentos de medida;
- Interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação;
- Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), sistemas de controle comandados por microcontroladores.

### 3.2.5 – Flutuações ou Oscilações de Tensão

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas do valor eficaz da tensão de suprimento dentro da faixa que compreende 0,95 e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e se manifestam de diferentes formas, os tipos principais de flutuações citadas por [6] e [21] são:

- **Flutuações Aleatórias:** A principal fonte destas flutuações são os fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação.

- **Flutuações Repetitivas:** Dentre as principais fontes geradoras de flutuações desta natureza tem-se máquinas de solda, elevadores de minas e ferrovias.

- **Flutuações Esporádicas:** A principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores.

Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Efeito flicker ou cintilação luminosa.

Entretanto, o fenômeno **flicker** consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. O desconforto visual associado à perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável. A intensidade do efeito flicker está associada a amplitude das oscilações e a duração do distúrbio ou ciclo de operação da carga perturbadora [65].

### 3.2.6 – Variações na Frequência do Sistema Elétrico

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo os desvios ocorridos na frequência do 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. Face aos comentários iniciais apresentados, têm-se no próximo Capítulo “A Influência das Variações na Frequência do Sistema Elétrico”, apontamentos que indicarão os objetivos deste trabalho no contexto de GD e QEE.

Finalizando o assunto sobre as categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos inerentes a QEE, tem-se a figura 17 e a tabela 3 resumindo as causas os efeitos e principais soluções referentes aos fenômenos citados. [23].

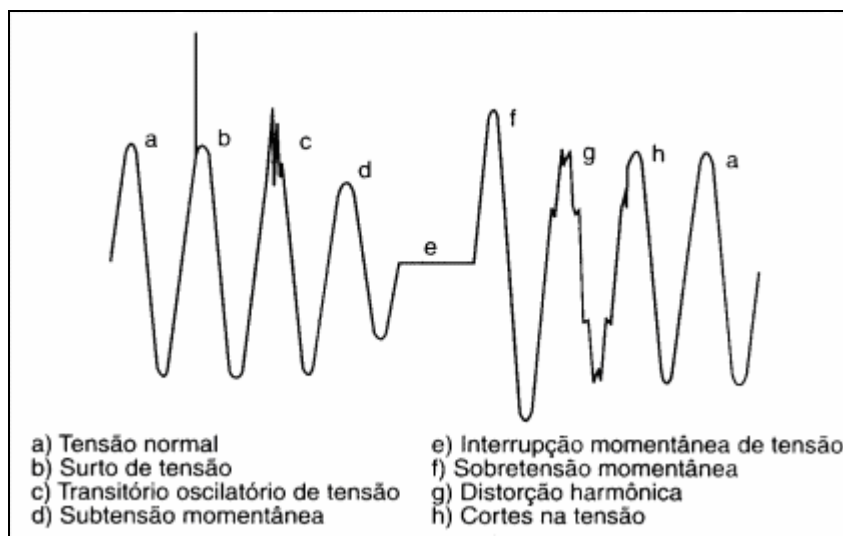


Figura 17: Forma de onda ilustrativa com o resumo dos distúrbios referentes à QEE [23].

**Tabela 3: Resumo das causas, efeitos e soluções, referentes à QEE [23].**

<b>Causas - Efeitos - Soluções</b>				
<b>Resumo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Causas</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Soluções</b>
Interrupções	Interrupção total da alimentação elétrica	Curtos-circuitos, descargas atmosféricas e outros acidentes que exijam manobras precisas de fusíveis, disjuntores, etc.	Queda do sistema. Danificação de componentes. Perda de produção.	UPS Geradores de emergência (interrupções de longa duração)
Interrupções	Distúrbio na curva senoidal, resultando em rápido e agudo aumento de tensão.	Descargas atmosféricas. Manobras da concessionária. Manobras de grandes cargas e bancos de capacitores.	Travamento, perda de memória e erros de processamento. Queima de placas eletrônicas, danificação de materiais de isolamento e de equipamentos.	Supressores de transientes. UPS com supressores de transientes. Transformadores de isolamento
Sag/swell	Subtensões (“sags”) ou sobretensões (“swell”) curtas (meio ciclo até 3 segundos) “Sags” respondem por cerca de 87% de todos os distúrbios elétricos.	Queda/partida de grandes equipamentos. Curtos-circuitos. Falha em equipamento ou manobras da concessionária.	Perda de dados e erros de processamento. Desligamento de equipamentos. Oscilações em motores com redução de vida útil.	UPS Reguladores de tensão.
Ruídos	Sinal indesejado de alta frequência que altera o padrão normal de tensão (onda senoidal)	Interferência de estações de rádio e TV. Operação de equipamentos eletrônicos.	Travamentos, perda de dados e erros de processamento. Recepções distorcidas (áudio e vídeo).	UPS Transformadores de isolamento, Filtros de linha.
Harmônicos	Alteração do padrão normal de tensão (onda senoidal), causada por frequências múltiplas da fundamental (50 Hz-60 Hz).	UPS, reatores eletrônicos, inversores de frequência, retificadores e outras cargas não-lineares.	Sobreaquecimento de cabos e equipamentos. Diminuição da performance de motores. Operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis.	Filtros de harmônicas. Reatores de linha. Melhorias na fiação e no aterramento. Transformadores de isolamento.
Variações de tensão de longa Duração	Variações de tensão com duração acima de 1 minuto	Equipamentos e fiação sobrecarregados. Utilização imprópria de transformadores. Fiação subdimensionada ou conexões malfeitas.	Desligamento de equipamentos. Sobreaquecimento de motores e lâmpadas. Redução de vida útil ou de eficiência dos equipamentos.	UPS Verificar conexões e fiações elétricas. Transferência de equipamentos para outros circuitos.

### 3.3 – Impacto da GD na Qualidade de Energia Elétrica

Será que podemos afirmar que a GD contribui inequivocamente para a melhoria da qualidade de energia e da operação do sistema integrado? Pergunta feita por [52] em seu artigo, o mesmo salienta que, sem uma análise detalhada do que significa o termo GD, a tecnologia empregada, como é conectada e qual o ponto de conexão na rede elétrica na topologia do sistema, não é possível padronizar uma resposta. Ao decorrer dos assuntos já tratados nos tópicos e capítulos anteriores, concluímos que existem, benefícios para a rede e cuidados que devem ser tomados na inserção dos sistemas de Geração Distribuída à rede. Este tópico deste capítulo não possui o intuito de verificar os impactos técnicos com justificativas e conclusões retiradas através de simulações de estudos de caso, o objetivo centrado aqui neste tópico está em uma abordagem geral e conceitual dos impactos relacionados a GD na QEE que consiste em confrontar as definições de QEE com a realidade das instalações de GD.

Alguns aspectos relativos à influência de geração distribuída nos índices de qualidade praticados no setor elétrico brasileiro são comentados por [47] em seu artigo, a descrição destes aspectos são analisadas em dois pontos, **Confiabilidade do sistema** e **Conformidade do fornecimento**, vejamos estes:

- **Confiabilidade do sistema:** O efeito da presença de geração distribuída nos índices de confiabilidade é observado pela possibilidade da mesma suprir toda ou parte da carga interrompida na indisponibilidade da alimentação principal, em decorrência de alguma falta no sistema. A ocorrência de uma falha provoca a atuação dos dispositivos de proteção do sistema principal e também da geração distribuída, caso esteja em operação, e esta também é isolada (ilhada). Nesse instante, pode-se analisar a possibilidade de retornar à geração distribuída, e alimentar as cargas que foram desligadas e estão em seu campo de atuação. Dessa forma, com a entrada desta geração, há melhoria significativa nos índices relacionados a tempo de indisponibilidade, como o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), devido ao suprimento de parte da carga pela geração distribuída enquanto a geração principal está sendo reparada. Nos índices de confiabilidade relacionados à frequência de falha não são esperadas melhorias tão significativas, uma vez que os sistemas de proteção retiram também a geração distribuída, porém, os índices de frequência que contabilizam desligamentos programados, como o FEC

(Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), terá um desempenho melhor nos meses em que houver desligamentos programados.[47]

- **Conformidade do fornecimento:** Entende-se por conformidade do produto energia elétrica, a ausência de diferenças entre a tensão entregue ao consumidor e aquela com amplitude, frequência nominal e forma senoidal, especificada pelas normas técnicas de QEE. Como exemplo a geração descentralizada representada por usinas térmicas contribui para a melhoria dos índices de conformidade, uma vez que injeta energia elétrica dentro dos padrões de amplitude especificada, nas proximidades da área de consumo, “fortalecendo” a capacidade do sistema em absorver as distorções ocasionadas pela operação inadequada de equipamentos da rede ou dos consumidores. Em função de estar perto da carga há melhor controle do perfil de tensão.[47]

Relacionado aos itens citados pelo autor, cabe algumas considerações, aspectos relativos à influência de geração distribuída nos índices da QEE praticados no setor elétrico brasileiro são relevantes, como já comentado qualidade de energia da rede elétrica pode ser deteriorada por falhas e operações de chaveamento na rede, pela ocorrência de transitórios ou pelos distúrbios causados pela operação de cargas poluidoras, principalmente no que se refere a flicker, harmônicos e desequilíbrio entre fases. A ocorrência desses distúrbios está ligado à capacidade de curto-circuito, ou seja a impedância interna, que depende da configuração da rede, impedâncias de seus componentes, potências geradas, cabos, fluxo de potência etc. Conforme a tecnologia de GD utilizada, e também o ponto onde a mesma é conectada, a inserção de GD pode trazer benefícios ou não a qualidade de energia.

Os autores do artigo “Geração Distribuída e Impacto na Qualidade de Energia” [52] analisaram os fenômenos citados no tópico 3.2 deste capítulo, com a inserção de alguns tipos de GD, para o enriquecimento deste tópico, cabe aqui, uma síntese das observações realizadas no artigo, visto que já foram citadas as definições dos fenômenos referentes a QEE.

Nas Variações de tensão de longa duração a GD pode impactar de forma negativa ou positiva a tensão em regime permanente. Denominado de “suporte de tensão”, é quando a GD proporciona benefícios, claro que, o suporte de tensão não é de forma contínua garantida. A GD frequentemente é operada no modo de “não controle de tensão”. Neste modo a GD fornece



potência ativa a um fator de potência constante é a tensão no alimentador não é constante, mudando de acordo com o efeito da inserção de potência, este pode ser considerado um ponto negativo observando as variações de tensão do sistema. Quando GD é operada no modo de “controle de tensão” o objetivo é manter a tensão num valor constante. As formas como a GD pode dificultar a regulação de tensão são:

- **Tensão Baixa devido a uma GD localizada imediatamente após uma compensação de perdas na linha:** A compensação de perdas na linha (line-drop compensation) é uma técnica comumente aplicada nos reguladores de linha para controlar a tensão na barra de carga de um alimentador. Quando a GD está localizada imediatamente após esta compensação, a corrente observada pelo equipamento é reduzida em função da geração da GD, e isto conduz a falhas no controle da regulação da tensão na barra de carga, levando a subtensão nesta barra.
- **Interação com os equipamentos de regulação:** Uma outra área de preocupação é a interação da GD com os equipamentos de regulação. Se a GD tem uma potência ativa gerada variável isto pode mudar a tensão do sistema de forma a causar a operação constante de reguladores de tensão ou de bancos de capacitores reduzindo a vida útil de tais equipamentos ou causar impactos notáveis na qualidade da tensão sob tais condições. [52]

Outro caso são as variações de tensão de curta duração, sendo o principal tipo, as elevações de curta duração (SWELL), sendo causados por faltas ou operações de chaveamento na rede, mas são menos comuns do que os afundamentos.

Com relação aos harmônicos as tecnologias de GD que possuem conversores eletrônicos podem introduzir correntes harmônicas na rede, Entretanto com o avanço tecnológico pesquisadores, vêm desenvolvendo novos dispositivos, técnicas de chaveamento e topologias para as pontes conversoras que possibilitam o fluxo de correntes na rede o mais próximo de senóides perfeitas. As tecnologias mais utilizadas conectadas através de conversores são células de combustível e alguns modelos de usinas eólicas, sistemas fotovoltaicos também contribuem para a injeção de harmônicos no sistema elétrico. Chaveamentos a altas frequências (PWM - Pulse Width Modulation) podem reduzir substancialmente os valores das correntes harmônicas

de frequências mais baixas. Contudo o impacto dos componentes de altas frequências precisa ser observado.

A Flutuação de tensão (Flicker), alguns tipos de GD que necessitam maior atenção em virtude da possibilidade de geração de flicker, são:

- A conexão e desconexão de geradores de indução.
- A operação de turbinas eólicas.
- A Operação de geradores fotovoltaicos.

A operação de centrais eólicas em redes elétricas provoca a ocorrência de flicker devido a diversos fatores inerentes ao processo de geração, em operação contínua, os principais efeitos são, sombreamento das pás pela torre, gradiente de vento, controle de direção do rotor (“yaw control”), controle de passo (“pitch control”) ou pelas turbulências naturais do vento incidente na turbina eólica.

A inserção em grande escala de GD pode levar a mudança no sentido do fluxo nas linhas reduzindo a seletividade e eficácia dos circuitos de proteção, sendo necessário uma nova avaliação das proteções existentes. Nos casos onde a GD é instalada para permitir operação em ilha com parte da carga, deve-se observar e utilizar meios para não permitir que nenhuma potência seja suprida ao restante da rede desenergizada evitando acidentes e quando a rede voltar a operação.

Recursos de GD pode ser uma fonte de problemas de variações de tensão, frequência para o sistema de energia elétrica. Reciprocamente, GD deve ser dotado de equipamentos apropriados para evitar tais problemas, interface de transformador, relés de proteção de anti-ilhamento[8].

Tratando das variações de frequência, o desequilíbrio entre demanda e suprimento de energia provoca variações na frequência da rede, a variação não pode ultrapassar uma margem pré-definida, permitindo a operação fluente dos processos industriais e outras cargas que

dependem da frequência para um bom funcionamento. Caso essas variações ocorram de forma não controlada será exigido grande esforço do operador da rede para manter as variações de frequência dentro dos limites permitidos. A GD deverá buscar maior eficiência das plantas, para que sua operação evite maiores impactos à operação da rede.

### **3.4 – Considerações finais**

O tema tratado neste capítulo possibilitou uma visão geral e de fator relevante para atual conjuntura da matriz elétrica brasileira, em virtude dos sistemas de geração distribuída e o uso de fontes renováveis de energia os quais criam novos problemas de qualidade de energia como variações de tensão, flicker, distorção da forma de onda e variações de frequência. Este avanço conduz os consumidores, concessionárias e instituições a monitorarem e formalizar padrões indicadores de QEE, o que leva ao aumento de reclamações nos órgãos competentes, tornando um fator responsável pela necessidade de indicadores de qualidade. A definição de QEE traz o conceito de fornecer e estabelecer a alimentação elétrica a um equipamento sensível, de forma apropriada para sua operação, é oportuno salientarmos que o IEEE através do IEC (International Electrotechnical Commission), define QEE como “o conjunto de características da eletricidade em um dado ponto de um sistema elétrico, avaliados em relação a um conjunto referencial de parâmetros”. Sendo o enfoque desta definição não no equipamento e sim na medição e quantificação do desempenho de um sistema elétrico de potência.

Finalizando, as questões de qualidade devido à inserção de GD, para cada tipo de tecnologia aliada a GD, deverá ser avaliada de forma única levando em consideração todos os aspectos de qualidade de energia citados nesse trabalho. Com isto surge a cada dia um desafio, que consiste em encontrar para o setor energético brasileiro um equilíbrio responsável entre o crescimento do mercado e a capacidade de coordenação por parte do governo e instituições envolvidas, visando um desenvolvimento sustentável com qualidade.

O próximo capítulo traz de forma específica a influência de variações de frequência no Sistema elétrico, assunto já comentado de forma introdutória neste capítulo, visto a ocorrência deste fenômeno pode impactar a Qualidade de Energia Elétrica do sistema.

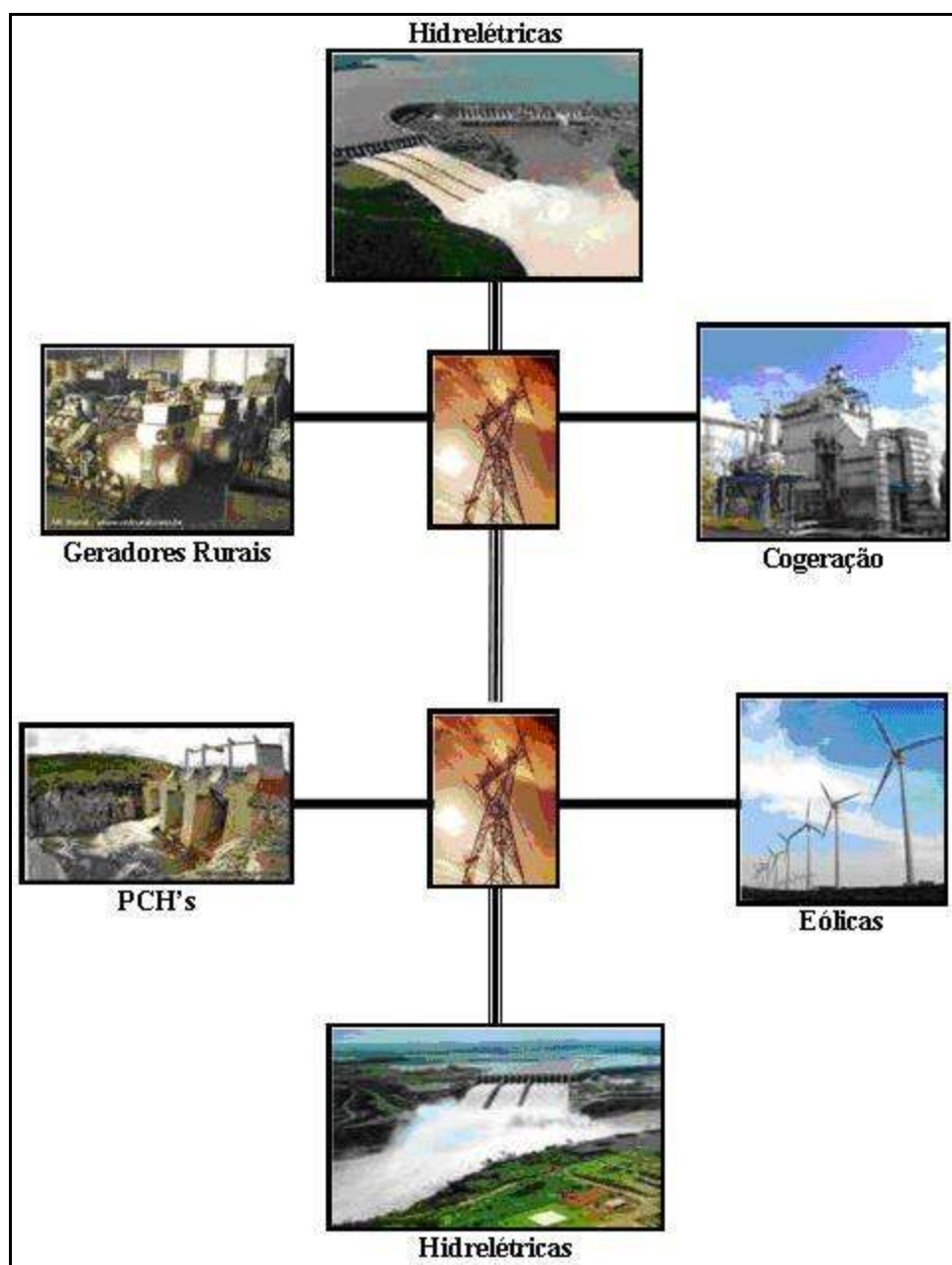
## Capítulo IV

# A Influência de Variações de Frequência no Sistema Elétrico

### 4.1 – Considerações Iniciais

A operação do sistema elétrico fora da frequência de trabalho (50 ou 60 Hz) é normalmente um resultado decorrente de distúrbios no sistema de energia conectado, causando uma sobrefrequência ou uma subfrequência. A instalação de geradores de pequeno e médio porte em redes como característica de Geração Distribuída necessariamente deve ser acompanhada de uma série de estudos técnicos para garantir a operação segura, confiável e eficiente de todo o sistema elétrico observando os quesitos de QEE como já visto no capítulo anterior, sobretudo na ocorrência de uma sobrecarga, falta ou contingências. Dentro dos estudos técnicos, estão aqueles necessários para ajustar os dispositivos de proteção instalados no ponto de conexão entre os geradores distribuídos e o sistema da concessionária. Para esta conexão, as concessionárias de energia estabelecem alguns parâmetros técnicos a serem satisfeitos pelos proprietários dos sistemas de GD a serem instalados. Neste contexto, verifica-se a importância da frequência para o Sistema Elétrico de Potência (SEP), especialmente se esta não respeitar os limites estabelecidos para a sua operação normal. Isto pode acarretar sérios problemas ao funcionamento dos equipamentos conectados a rede elétrica, tais como bancos de capacitores, geradores, motores, turbinas etc. Necessariamente, para a supervisão da frequência do sistema sob determinada condição de operação, faz-se uso de relés de frequência, que acionam os dispositivos de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede fora dos patamares aceitáveis sob o ponto de vista de operação normal do SEP.

Conforme norma da ONS faixa de variação na frequência para a operação do sistema, estabelecida entre  $60 \pm 0,5\text{Hz}$  [44] nos tópicos seguintes será tratado especificamente a influência da variação da frequência nos sistemas de GD mais utilizados, geradores síncronos (PCHs, usinas de açúcar e álcool (Cogeração)), geradores assíncronos (parques eólicos, pequenas unidades rurais). A figura 18 traz como exemplo uma visão dos sistemas utilizados em GD, os quais serão tratados nestes trabalho.



**Figura 18: Principais fontes de energias na Geração Distribuída do Brasil**

## 4.2 – Efeitos da Variação da Frequência nos Gerador Síncrono

A máquina síncrona sempre gira à velocidade síncrona (exceto em condições transitórias ou sob algum tipo de oscilação). A velocidade síncrona é definida pela rotação da máquina primária, a qual fornece a potência ativa para o sistema ligado ao gerador. A frequência da tensão gerada depende assim da velocidade de giro e do número de pólos, de acordo com a equação:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{120} (\text{Hz}) \quad (1)$$

$f$  - frequência (Hz) da tensão gerada.

$p$  - número de pólos da máquina, determinado pela construção da máquina. Ele é escolhido em função da rotação da máquina primária.

$n_s$  - rotação da máquina primária (rpm).

A equação de oscilação da máquina síncrona tendo a ação dos conjugados da máquina e expressa pela equação seguinte:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega_r) \quad (2)$$

Onde:

$H$ = Constante de tempo de inércia do conjunto gerador-turbina

$\omega_r$  = Velocidade angular elétrica do rotor em pu

$t$ = tempo expresso em segundos

$T_m$ =conjugado mecânico em pu

$T_e$ = conjugado elétrico em pu

$D$ = Coeficiente de amortecimento em pu

$$\Delta\omega_r = \omega_r - \omega_s$$

$\omega_s$  = velocidade angular síncrona

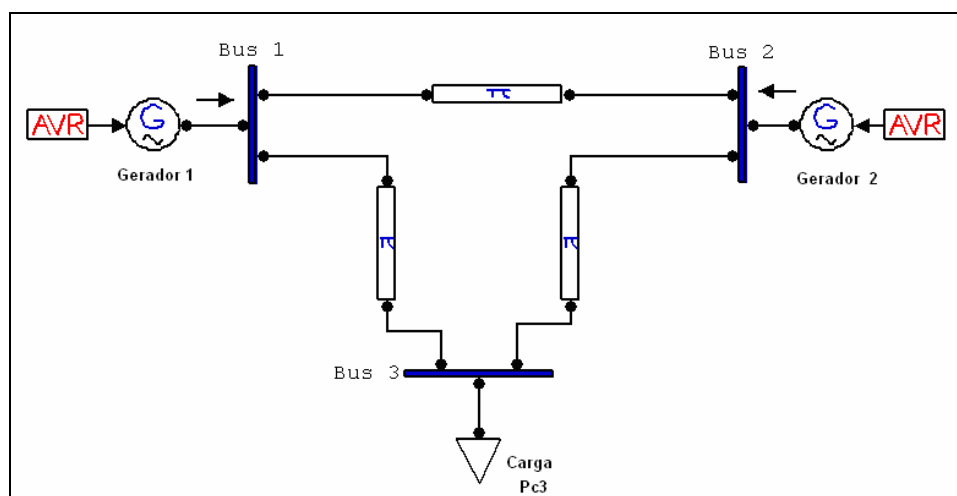
Os efeitos causados em um gerador trabalhando em sobrefrequência não são tão preocupativos quanto este trabalhando em subfrequência. A condição de sobrefrequência é o resultado de excesso de geração, pode ser corrigida rapidamente pelos reguladores de velocidade conectados a máquina primária. Deve-se observar neste caso o limite máximo de tensão gerada, contudo a atuação dos reguladores de tensão devem ser efetivas. Uma subfrequência é causada através de uma sobrecarga, que muitas das vezes não são corrigidas localmente na geração, caso comum é a perda de uma outra unidade de geração conectada ao sistema. Os dados de fabricação do gerador devem ser observados, pois o mesmo fornecerá o tempo máximo de trabalho em sobrecarga ou a capacidade máxima de sobrecarga, o efeito de uma sobrecarga poderá levar o gerador a um sobre aquecimento. [51]

No sistema elétrico de potência as cargas, conectadas ao sistema, variam a cada instante fazendo com que o estado de equilíbrio carga/geração seja sempre modificado. Isto requer um constante restabelecimento de estado de equilíbrio, que é exercido através de sistemas de controle. Para atender os requisitos operativos de tensão e de frequência são utilizadas duas malhas de controle principais, a malha de controle de potência reativa e tensão, e a malha de controle de potência ativa e frequência. No projeto e na operação destas malhas de controle o problema de estabilidade dinâmica tem-se mostrado de crucial importância, e neste sentido os ajustes adequados dos parâmetros dos sistemas de controle permitem um melhor desempenho para o sistema de potência. Na sequência analisaremos como exemplo uma malha de controle  $Pf$  (potência ativa – frequência) apresentando sucintamente seus principais aspectos e conceitos, visto que este tipo de malha é muito utilizado em conjunto com os geradores síncronos.

Segundo [66] na análise de desempenho em regime permanente dos sistemas elétricos de potência costuma-se considerar uma condição operativa, ou seja, uma condição de equilíbrio, tensão e frequência constante. Assim o sistema deve ser dotado de um sistema de controle capaz de detectar variações de carga, as quais provocam alterações nas variáveis de estado, e iniciar em



tempo real um conjunto de variações contrárias, que elimine tão rapidamente e eficientemente quanto possível as variações ocorridas nas variáveis de estado do sistema. É importante que o sistema de controle esteja ajustado, se possível de forma otimizada, no sentido de garantir uma boa margem de estabilidade para a operação do sistema elétrico. Na figura 19 tem-se um exemplo retirado de [66] através de um simples sistema de potência de 3 barras, contendo dois geradores G1 e G2 e uma carga  $P_{c3}$  ligada na barra 3 do sistema, estando o sistema em equilíbrio.



**Figura 19: Sistema Elétrico representativo 3 barras [66]**

Considere uma pequena elevação de carga de  $P_{c3}$  no barramento 3 do sistema. Neste caso ocorre uma condição de déficit de potência ativa, pois instantaneamente a potência consumida passa a ser maior do que a potência gerada pelas máquinas. As novas cargas são prontamente alimentadas, isto porque este novo consumo é na verdade suprido, através da energia cinética armazenada nas massas girantes, fazendo com que haja redução de velocidade das máquinas e conseqüentemente redução de frequência no sistema. Por outro lado, as cargas de um sistema elétrico de potência variam com a frequência, ou seja, normalmente uma redução na frequência do sistema provoca uma redução de carga (atuação de relés de proteção). Este fato demonstra que o sistema apresenta uma capacidade inerente de alcançar um novo estado de equilíbrio, auto-regular-se, mesmo que retirando do sistema cargas.

A característica inerente ao sistema de auto-regular-se, é denominada Regulação Própria do Sistema e se expressa através de um parâmetro  $D$ , denominado de coeficiente de amortecimento, obtido pela expressão:

$$D = \frac{\Delta P_c}{\Delta f} \quad (3)$$

$\Delta f$  = variação da frequência

$\Delta P_c$  = variação da carga

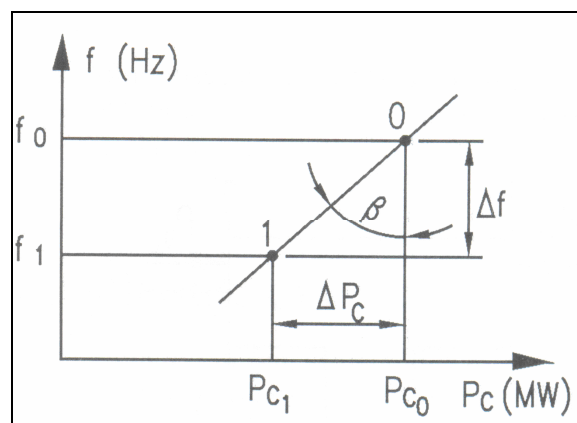
$D$  = coeficiente de amortecimento ou coeficiente de variação carga/frequência

O coeficiente de amortecimento  $D$  pode ser representado graficamente de acordo com a figura 20, onde tem-se:

$$\Delta P_c = P_{c1} - P_{c0}$$

$$\Delta f = f_1 - f_0 \therefore$$

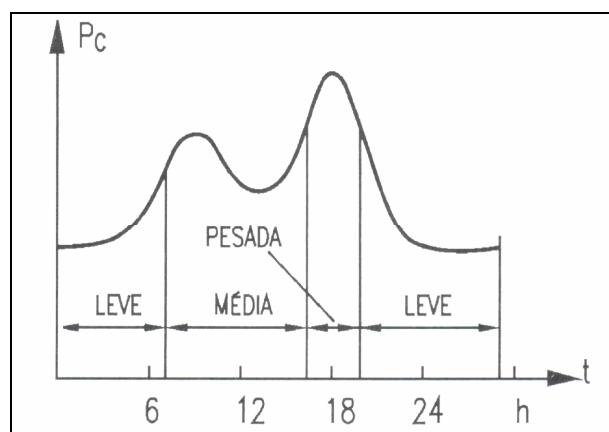
$$D = \frac{\Delta P_c}{\Delta f} = \frac{P_{c1} - P_{c0}}{f_1 - f_0} = \tan \beta \quad (4)$$



**Figura 20: Característica de variação da carga com a frequência [66]**

As variações de carga em sistemas interligados atingem valores consideráveis. Por outro lado, os valores de  $D$  típicos em tais sistemas são da ordem de 1,0 pu. Assim, variações inadmissíveis de frequência poderiam ocorrer caso o sistema dispusesse apenas de sua

capacidade própria. Este fato demonstra claramente a necessidade de se dispor de sistemas de controle apropriados, no sentido de se obter uma operação mais adequada, com a manutenção da frequência dentro de faixas restritivas de operação. Estes sistemas de controle devem promover, portanto, um equilíbrio entre a carga total e a geração. Um dos maiores problemas na definição do controle adequado, diz respeito à variabilidade das características da carga. Seja, por exemplo, a curva de carga  $P_c = f(t)$ , mostrada na figura 21. Observa-se que a carga apresenta, basicamente, três períodos distintos. Para cada um destes períodos a carga possui uma característica, portanto, a variação da carga com a frequência, se manifesta de forma inteiramente diversa, ou seja, no período de carga leve por exemplo, o coeficiente de amortecimento  $D$  é totalmente diferente do correspondente em carga pesada. O desenvolvimento de um sistema de controle, eficiente e confiável, deve considerar fatos desta natureza.



**Figura 21: Exemplo típico de curva diária de carga. [66]**

A equação abaixo mostra um modelo simplificado utilizado por [66] para representação da máquina síncrona ligada ao sistema de potência, este modelo é útil para verificarmos a importância da influência da variação da frequência do sistema, comprovando o exposto neste tópico.

Tendo como base a equação de oscilação do gerador e a equação da característica carga/frequência, pode obter a seguinte expressão em função da frequência:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (\Delta P_m - \Delta P_c - \Delta T - D \cdot \Delta f) \quad (5)$$

Onde:

$\Delta f$  = variação da frequência.

$\Delta P_m$  = Variação da Potência mecânica gerada.

$\Delta P_c$  = Variação da Potência ativa da carga.

$\Delta T$  = Variação da Potência ativa de intercâmbio

$D$  = coeficiente de amortecimento ou coeficiente de variação carga/frequência.

$H$  = Constante de tempo de inércia do conjunto gerador-turbina.

A variável  $\Delta P_c$  corresponde à variação da potência ativa da carga ocorrida no sistema considerado, ou seja, corresponde ao impacto de carga, Já  $\Delta P_m$  é a variação da potência mecânica gerada. Esta variável é obtida através da ação dos reguladores de velocidade sobre as turbinas que elevam ou reduzem a referida potência, conforme a variação de velocidade. A variável  $\Delta T$  corresponde as potências ativas líquidas transferidas para as barras adjacentes do sistema.

Variação constante na frequência provoca um esforço contínuo dos controladores para que o sistema seja estável. Variação brusca de frequência fora dos parâmetros reguláveis provoca a atuação de relés de proteção os estabelecem uma rejeição de carga, o que e uma proteção para o sistema pode-se tornar um prejuízo para Qualidade de Energia.

### 4.3 – Efeitos da Variação da Frequência no Gerador Assíncrono

No contexto de sistemas de Geração Distribuída, o uso de geradores de indução aumenta gradativamente com o avanço da tecnologia a eles utilizados. Estes geradores de indução são

utilizados em parques eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e unidades rurais. De acordo com sua característica tem-se, as máquinas de indução com rotor em gaiola de esquilo e as máquinas de indução duplamente alimentada, sendo que o uso de geradores de indução duplamente alimentados vem aumentando devido à possibilidade de obter um melhor controle do fluxo de potência reativa com a rede, por sua vez apresenta uma configuração complexa comparada com a máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo, portanto, com um custo maior. [45].

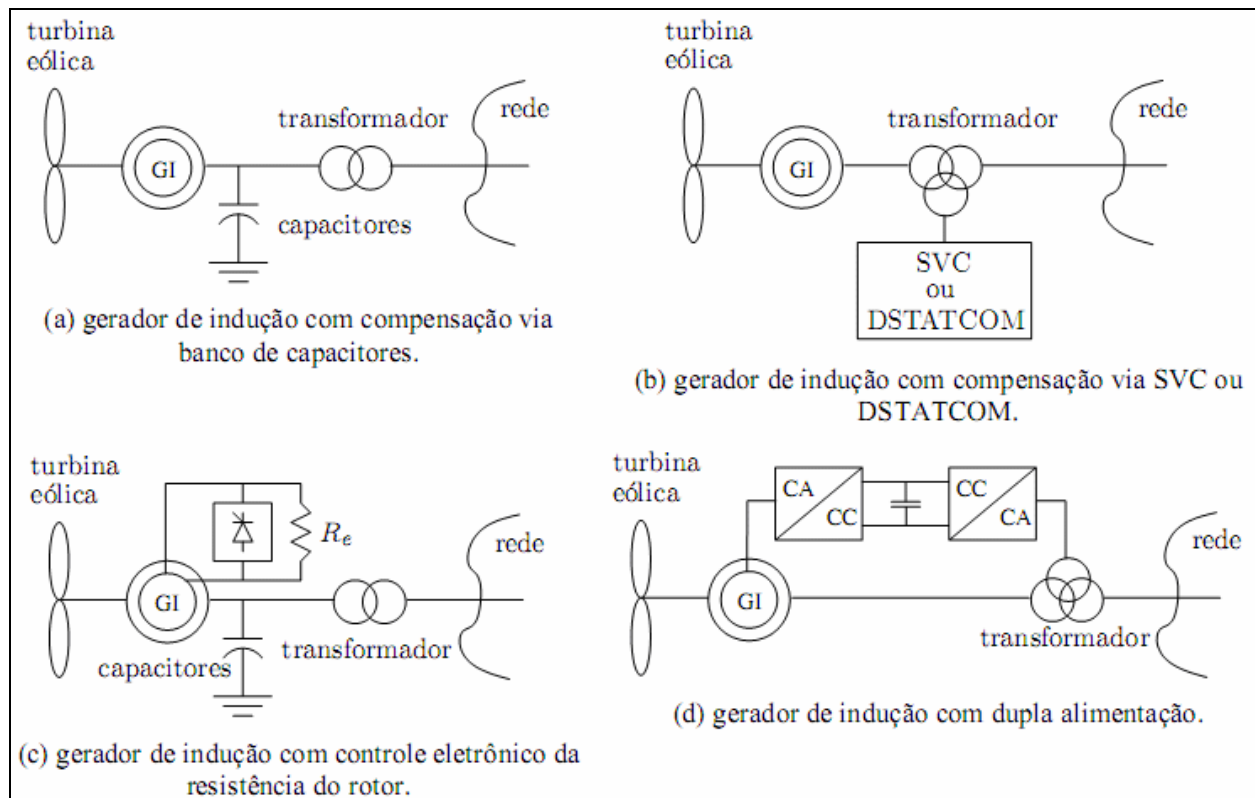
Na referência [67] têm-se uma síntese dos sistemas utilizados com gerador de indução, na sequência tem-se a figura 22, representativa de cada modelo citado.

**•Gerador de indução com compensação via banco de capacitores:** neste caso, utiliza-se um gerador de indução com rotor tipo gaiola de esquilo e parte da potência reativa consumida pelo gerador é fornecida por um banco fixo de capacitores. Esta é a configuração mais simples e barata disponível no mercado. Vários parques eólicos em operação são baseados nesta tecnologia. Tais geradores também são classificados como de velocidade constante. Esta é uma das tecnologias que há mais tempo está sendo utilizada em sistemas de geração eólica conectados em redes de distribuição de energia elétrica.

**•Gerador de indução com compensação via SVC ou DSTATCOM:** este caso é similar ao anterior. A diferença é que a potência reativa consumida pelo gerador é fornecida dinamicamente por dispositivos baseados em eletrônica de potência. O SVC (Estatice Var Compensator) e o DSTATCOM (Distribution Estatice Synchro Synchronous Compensator) são os dispositivos mais comumente empregados neste caso.

**•Gerador de indução com controle eletrônico da resistência do rotor:** neste caso, emprega-se um gerador de indução com o rotor bobinado e parte dos reativos consumidos pelo gerador é fornecido por um banco fixo de capacitores. A velocidade do rotor do gerador é controlada através de uma resistência externa, a qual é variada utilizando-se um conversor estático. Desta forma, é possível variar a velocidade de operação do gerador em uma faixa de 10% em relação ao valor nominal. Por conseguinte, estes geradores são classificados como de velocidade parcialmente variável.

**•Gerador de indução com dupla alimentação:** neste caso, utiliza-se um gerador de indução com o rotor bobinado cujo rotor é alimentado através de dois conversores estáticos ligados back-to-back. Usualmente, a capacidade dos conversores é no máximo 25% da capacidade total do gerador. A velocidade do gerador é controlada variando-se a tensão aplicada no rotor. Por conseguinte, este tipo de gerador eólico é classificado como de velocidade variável.



**Figura 22: Principais tecnologias utilizadas para geração eólica em redes de distribuição.[67]**

A figura 23 retirada da referência [45] representa a curva típica da característica de uma máquina de indução, onde tem-se do lado esquerdo o funcionamento como motor e do lado direito o gráfico representa a dinâmica de um gerador.

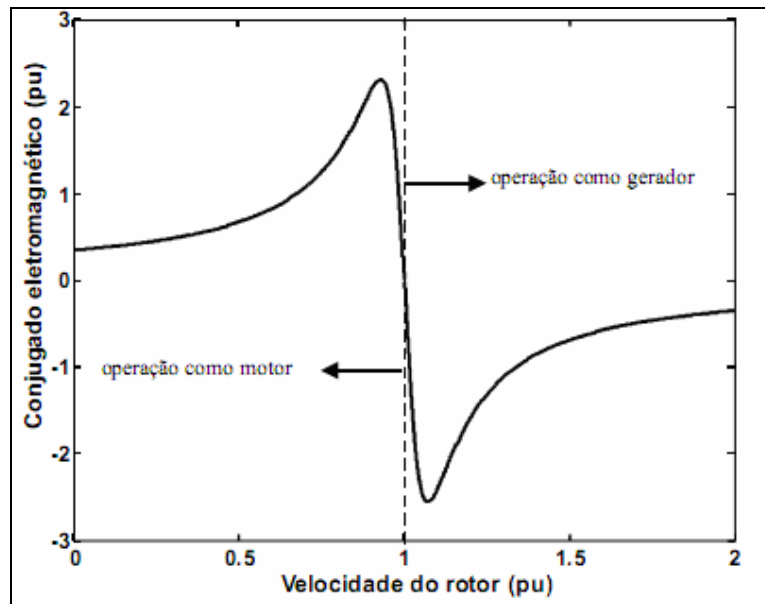


Figura 23: Curva conjugado eletromagnético versus velocidade do rotor de uma máquina de indução.[45]

Para o estudo da operação de um gerador de indução utiliza-se apenas a região da curva em que o conjugado eletromagnético é negativo, conforme é apresentado na figura 24. Nesta curva, os valores de conjugado eletromagnético foram multiplicados por (-1) com o objetivo de facilitar a análise.

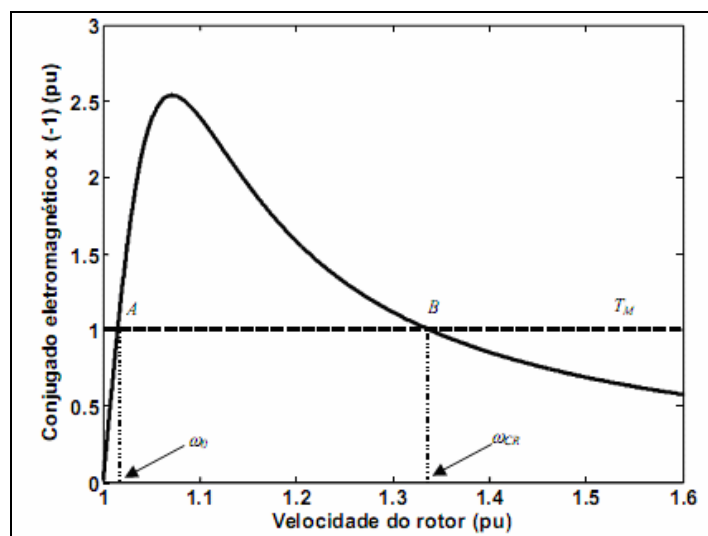


Figura 24: Conceito de velocidade crítica do rotor no plano conjugado versus velocidade.

Com base na figura acima tem-se que o conjugado mecânico  $T_m$  aplicado à máquina intercepta a curva de conjugado eletromagnético  $T_e$  em dois pontos (A e B). Esses pontos correspondem aos pontos de equilíbrio que satisfazem a equação de equilíbrio eletromecânica dada por : [45]

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (T_e - T_m) \quad (6)$$

Onde;

$H$ = Constante de tempo de inércia do conjunto gerador-turbina

$\omega_r$  =Velocidade angular elétrica do rotor em pu

$t$ = tempo expresso em segundos

$T_m$ =conjugado mecânico em pu

$T_e$ = conjugado elétrico em pu

O ponto A é o ponto de equilíbrio estável de operação e o ponto B é o ponto de equilíbrio instável de operação. Assim, a velocidade do rotor em  $\omega_r$  é definido como velocidade de operação (ou velocidade inicial) e  $\omega_{cr}$  é definido como velocidade crítica.

Os cálculos realizados para determinar a potência ativa e reativa de um gerador de indução quando este estiver conectado ao sistema elétrico, são todos baseados na frequência do sistema elétrico 60 Hz, sendo assim existe um ponto de trabalho dentro do gráfico apresentado, que corresponde a velocidade do rotor e ao conjugado eletromecânico  $T_e$ , no caso de uma subfrequência ou sobrefrequência no sistema elétrico, o ponto de trabalho do gerador de indução será modificado, se porventura o gerador estiver trabalhando em um ponto quase crítico, uma variação da frequência da rede pode levar o gerador a instabilidade. Outro fator importante é funcionamento dos bancos de capacitores instalados nos geradores, a função crucial destes capacitores é o fornecimento de potência reativa para o funcionamento do gerador de indução, os seus valores de capacitâncias são calculados para uma frequência de trabalho de 60 Hz, variações



na frequência do sistema levará os bancos de capacitores trabalharem fora da resposta esperada para o fornecimento de potência reativa.

#### **4.4 – Efeitos da Variação da Frequência em Turbinas a vapor**

Especial atenção tem sido dada à operação dos turbogeradores sob condições de operações em sobrefrequência e ou subfrequências. Em particular, sobre os possíveis danos a que estão sujeitas as turbinas a vapor quando em prolongada operação sob condições de subfrequência, durante uma severa condição de sobrecarga imposta ao sistema quando há uma perda de geração.

Uma turbina a vapor é constituída de vários grupos de palhetas (lâminas) de vários tamanhos e configurações, sendo que cada uma possui sua característica construção relacionada a frequência natural própria. As turbinas são cuidadosamente projetadas para que as frequências de ressonância das palhetas, para a rotação nominal, sejam suficientemente defasadas, de forma a evitar vibrações e excesso de “stress” ou fadiga. A figura 25 ilustra o fenômeno que envolve operações das turbinas fora da frequência nominal (“off-frequency operation”), mostrando a amplitude de fadiga das vibrações para um conjunto de estágios de palhetas de uma turbina em função da frequência nominal. Observa-se que quando a turbina opera fora de sua frequência nominal, a amplitude de “stress” aumenta e algum dano é acumulado. Três níveis de “stress” A, B e C são mostrados figura 25: [27]

- a) Operações das turbinas abaixo do nível **A** ( $f > 59,4$  ou  $f < 60,6$  Hz) produzem pequenas amplitudes de fadiga, devido as vibrações, tal que as palhetas podem operar indefinidamente sem qualquer dano.
- b) Operações entre os níveis **A** e **B** poderão produzir danos em 10000 ciclos de vibrações;
- c) Operações entre os níveis **B** e **C**, poderão ocorrer danos para 1000 ciclos de vibrações. [68]

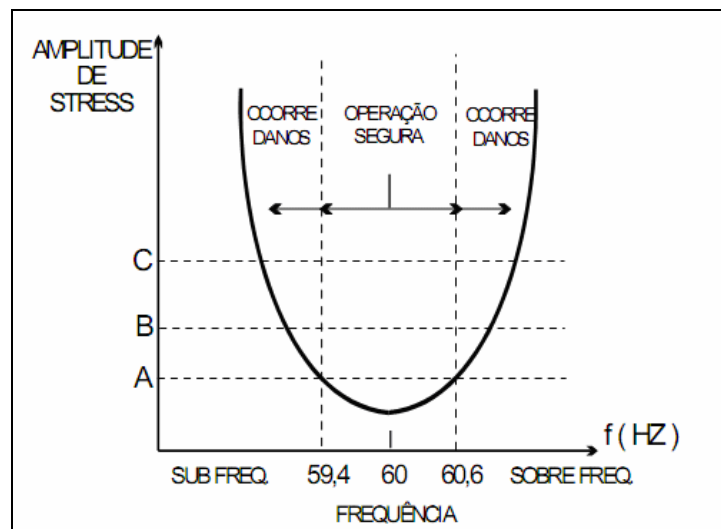


Figura 25: Frequência x Amplitude de 'stress' (fadiga) para turbinas a vapor [27]

Pesquisas de uma grande quantidade de dados de frequências de vibrações e seus tempos limites recomendados para operações fora da frequência nominal e para diferentes turbinas a vapor estão representadas na figura 26 [27].

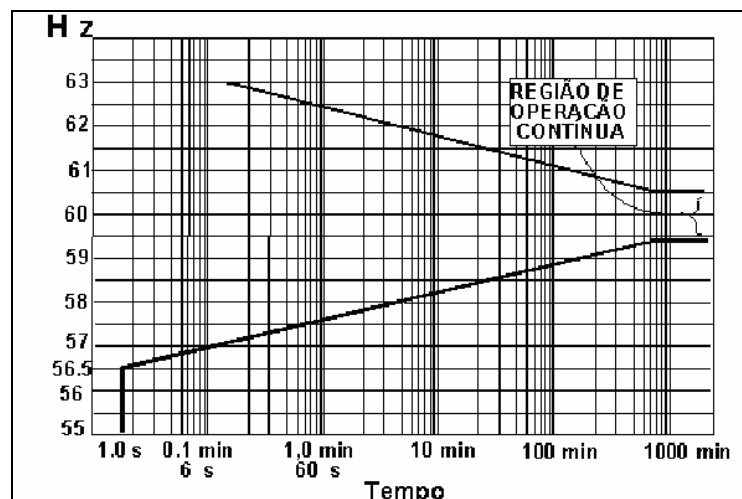


Figura 26: Limites de frequência de operação de uma turbina a vapor [27]

O diagrama da figura acima representa o tempo mínimo estimado para se quebrar alguma parte da estrutura das palhetas, ilustrando os limites de tempo para operação da turbina a vapor

tanto para a subfrequência quanto para a sobrefrequência. O diagrama da figura 26 mostra que para um desvio de frequência de 5% ou mais, o tempo de dano torna muito pequeno e que não é prático um sistema operar mais que poucos segundos nesta faixa. Como pode ser visto, para o limite inferior de frequência, isto é, 56,5 Hz o tempo mínimo permissível é de um segundo, e para frequências próximas da nominal, o tempo é indefinido de forma que uma variação de frequência de 1% (59,4 ou 60,6 Hz), não terá qualquer efeito danoso sobre as palhetas. É importante ressaltar, que o efeito de operações fora da frequência nominal é acumulativo, ou seja, meio minuto de operação a plena carga em 57,6 Hz hoje, deixa somente meio minuto de outra operação em 57,6 Hz por toda a vida útil da unidade. A partir da figura 26 analisada, tem-se os dados na tabela 4 abaixo, que mostra os valores de tempo máximo de operação de uma turbina a vapor de acordo com sua frequência. Sendo a condição encontrada mais frequentemente corresponde a sobrefrequência nas turbinas [27] [68].

**Tabela 4: Tempo máximo de operação de uma turbina a vapor de acordo com sua frequência de operação**

<b>Frequência a plena carga</b>	<b>Tempo Máximo de Operação</b>
59,4 Hz	Continuamente
58,8Hz	100 minutos
58,2Hz	10 minutos
57,6 Hz	1 minuto
57,0Hz	0,1 minuto
56,5 Hz	1 segundo

Na realidade, a predição do tempo para fadiga e ou perda da turbina é difícil. O tempo de stress é relacionado diretamente à frequência, mas a determinação deste tempo depende da curva de ressonância referente a frequência natural das lâminas. Podemos dizer que cada lâmina

possui uma construção, ou seja, não são exatamente todas iguais, devido a tolerâncias industriais. Outra variável é que, a fadiga também é reduzida por operações anormais não relacionadas a operação de variações de frequência. O fabricante das turbinas deve especificar os dados relacionados com fadigas, pois estes limites variam dramaticamente entre fabricantes. Abaixo a figura 27 de referência do [68], (*IEEE Guia para Proteção para Plantas Geradoras com variações de Frequência*) mostrando quatro diferentes tipos de turbinas e o limite de trabalho relacionado com variações de frequência. Basicamente, há três zonas que caracterizam as possibilidades de operação de uma turbina: (a) *zona de operação permitida*: região em que o conjunto turbina-gerador pode operar por tempo indeterminado sem risco de danos; (b) *zona de operação por tempo restrito*: região em que o conjunto turbina-gerador pode operar por determinado tempo sem risco de danos; (c) *zona de operação proibida*: região em que o conjunto turbina-gerador não pode operar porque causaria danos a eles. Esses valores são utilizados para a determinação dos ajustes dos relés de sobrefrequência e subfrequência de proteção do gerador [68].

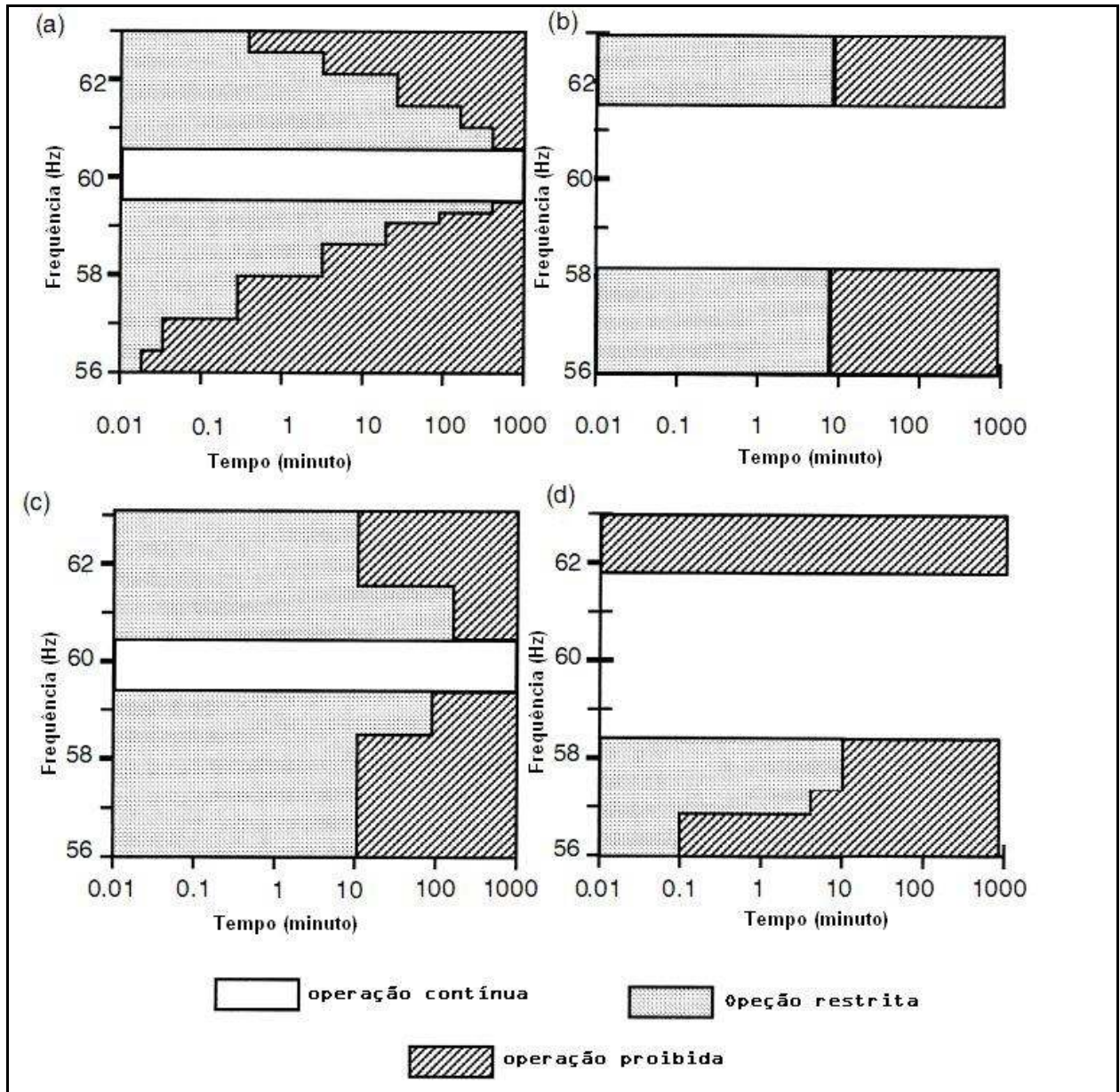
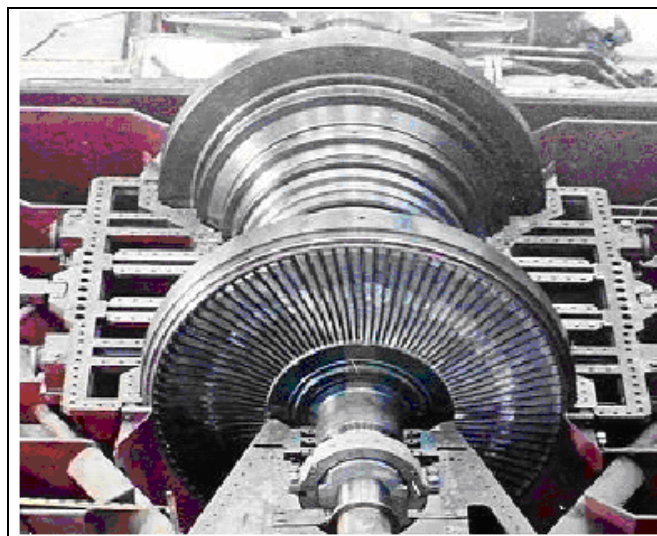
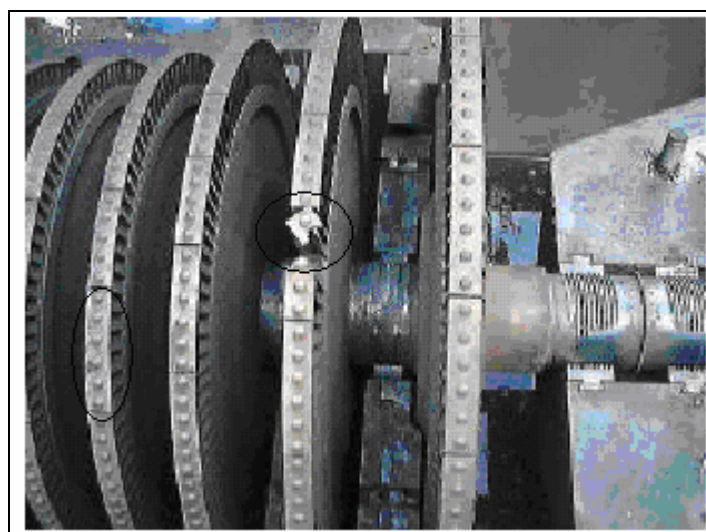


Figura 27: Tempo máximo de operação de turbinas operando fora da frequência nominal [68]

Na sequência as figuras 28, 29 e 30 representativas de turbinas, com destaque para as palhetas, figuras retiradas da referência [46].



**Figura 28: Vista geral de uma turbina a vapor [46]**



**Figura 29: Vista lateral de uma turbina a vapor- Palhetas danificadas [46]**

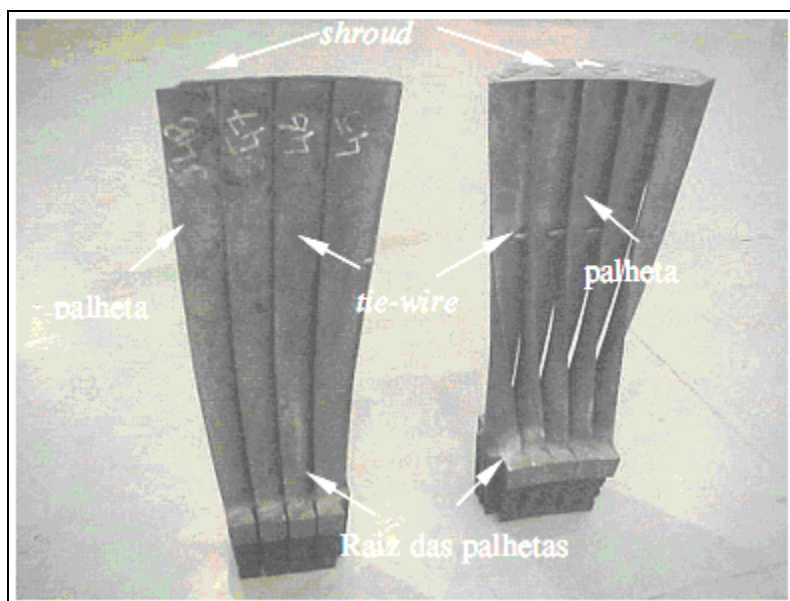


Figura 30: Palhetas de turbina a vapor, tie-wire = presilha , shroud= chapa de junção [46]

#### 4.5 – Efeitos da Variação da Frequência em Turbinas a gás e hidráulicas

O efeito de ressonância nas palhetas das turbinas de combustão também é considerado. A combustão realizada com gás produz excitação vibratória semelhante a vibração das turbinas a vapor. Contudo as turbinas de combustão em geral, possuem palhetas com maior tolerância para operação em subfrequência. Estas turbinas podem operar até 57 ou 58 Hz para períodos estendidos de tempo. Novamente, deve-se consultar o fabricante da turbina para verificar suas limitações exatas.

Uma consideração principal em operação de subfrequência, é a perda dramática de capacidade de produção devido a corrente de ar reduzida pela turbina, cerca de 17% com frequência de trabalho de 55 Hz [51].

Não há preocupações específicas relacionadas com a operação em subfrequência de uma turbina hidráulica. No caso de Sobrefrequência, ou, mais precisamente excesso operação, há uma restrição, uma súbita perda de carga em uma usina hidrelétrica irá aumentar o ciclo de rotação das turbinas de 130-150% devido ao excesso de massa e alta energia cinética da represa. Em qualquer gerador uma perda de carga irá desencadear uma sobre-velocidade. Sem

carga, toda a energia de entrada para a turbina é convertida em aceleração da turbina. Caso isto aconteça em uma turbina a vapor, a sobre-velocidade é sentida e válvulas de escape atuam rapidamente, no sentido de diminuir a aceleração da turbina. Em uma turbina hidráulica, a entrada de energia é uma grande massa de água com uma velocidade significativa. O rápido fechamento das comportas não é possível (comparando-se as turbinas a vapor). Evidentemente que todos os dispositivos de controle e proteção estão interligados, como os reguladores de velocidades, reguladores de tensão e outros.

A proteção das turbinas é um problema crítico. O regime de proteção deve operar para cada tipo de fabricante conforme as características das palhetas. As proteções também devem ter um atraso suficiente para permitir coordenação com sistemas automáticos de rejeição de carga sobre a rede elétrica. Além disso, o estresse é cumulativo, e o tempo permitido para uma determinada frequência anormal deve ser em função do histórico da turbina. No caso de sobrefrequência a proteção não é aplicada, porque esta condição pode ser corrigida localmente pela ação dos reguladores de velocidade e tensão.

## **4.6 – Relés de Frequência**

O relé de frequência é um dispositivo utilizado para a supervisão da frequência de um sistema elétrico e a proteção preventiva. Como exemplo, os relés de subfrequência são utilizados para efetuar a operação de rejeição de carga, separação das linhas de distribuição entre os centros de cargas. Dentre as características de especificação dos relés de frequência, salienta-se a restrição de tensão para a operação do relé, a razão disto é, que os relés de frequência devem atuar para condição de sobre ou sub-carga e não devem atuar para as perturbações que caracterizam uma falta no sistema elétrico. Exemplificando, quando ocorre um curto circuito haverá variação na tensão, corrente, frequência, etc. Porém, os relés de tensão ou de corrente



deverão atuar antes dos relés de frequência, caso contrário haverá rejeição ou restauração de carga indevidamente.

Estes relés, assim como os demais, evoluíram desde os modelos eletromecânicos, estáticos aos 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.

Entre os tipos de relés de frequência têm-se, os eletromecânicos, estáticos e os digitais microprocessados. Na sequência tem-se de forma clara e sucinta os conceitos fundamentais entre os tipos de relés de frequência:

**Relés de Frequência Eletromecânicos:** A primeira base tecnológica aplicada ao projeto e construção de relés de proteção foi a eletromecânica, nos idos de 1900, sendo, portanto, a precursora das demais tecnologias aplicadas à proteção. Pode-se definir o relé eletromecânico como sendo aquele no qual a operação lógica é produzida pelo movimento relativo de elementos mecânicos, sob ação de uma grandeza elétrica nos circuitos de entrada [15]. Os relés de subfrequência eletromecânicos são do tipo “copo de indução”, consistindo portanto de um relé de alta velocidade. Seu princípio básico de operação 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. 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. Assim, quando ocorre um decréscimo na frequência ocorre um acréscimo no deslocamento angular, aumentando o torque produzido, e quanto mais rápido for este decréscimo na frequência, menor será o tempo para se fechar os contatos. Conclui-se, daí, que o tempo de operação deste tipo de relé é função da taxa de variação da frequência [27].

**Relés de Frequência Estáticos:** Estes empregam 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, em conjunto com outros circuitos lógicos, determina a frequência do sistema pela contagem do número de pulsos de 2 MHz que ocorreu durante um ciclo completo (um período) da tensão do sistema de potência. Para qualquer 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, ou seja, se o número de pulsos é maior, a frequência está abaixo do ajuste fixado.

A figura 31 trás o diagrama de blocos do princípio de funcionamento de um relé estático. Este, por razões de segurança, ao detectar uma subfrequência, confere este fato por três ciclos consecutivos antes de produzir um sinal de saída no relé [27]

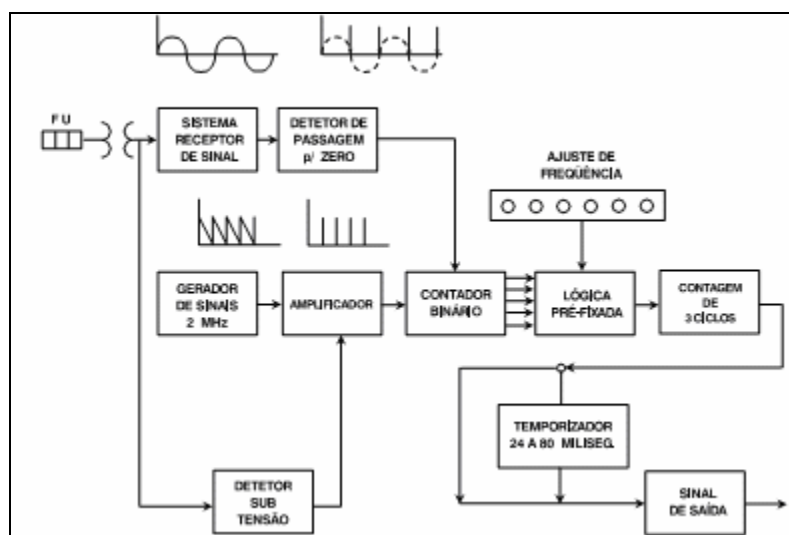
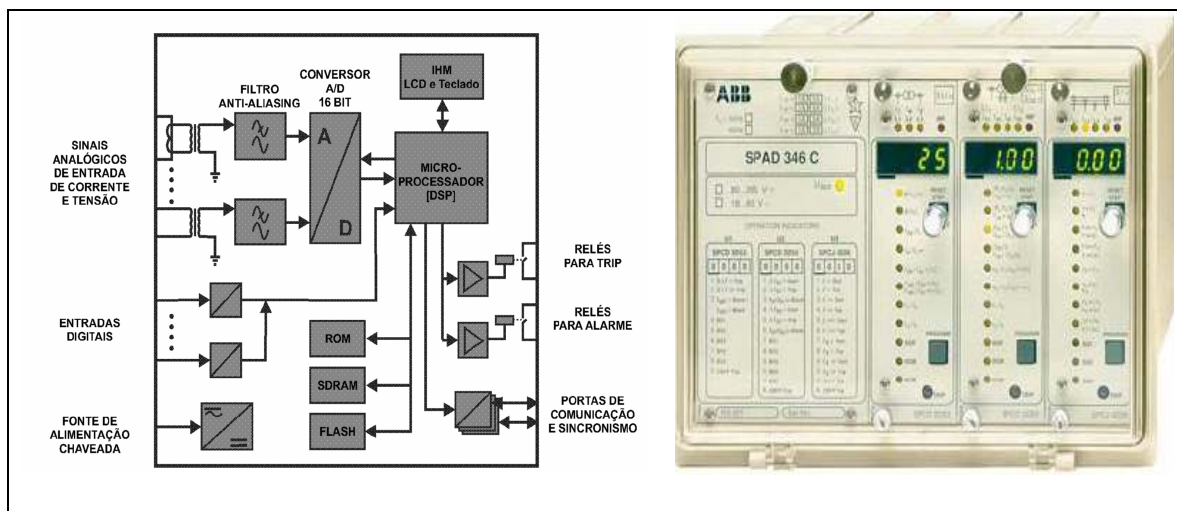


Figura 31: Diagrama de blocos de um relé de frequência tipo estático

**Relés digitais microprocessados:** Com o desenvolvimento do hardware computacional e dos algoritmos para fins de proteção, a tecnologia digital, neste princípio de século, tornou-se a base da maioria dos sistemas de uma subestação, atuando nas funções de medição, comunicação, proteção e controle. Desta forma, o relé digital pode ser aplicado para desempenhar outras

tarefas no ambiente de uma subestação. Sua principal característica se fundamenta na possibilidade de implementação de algoritmos computações e utilização de operações matemáticas, as quais são utilizadas em computadores comuns. A figura 32 ilustra o aspecto construtivo geral dos relés digitais [15].



**Figura 32: Exemplo ilustrativo da Arquitetura interna e externa de um relé digital [15]**

As características dos relés digitais de proteção a partir de um ponto de vista funcional, possuem 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, a qual em geral, é composta pelo conjunto hardware e software, onde as informações de entrada e ou saída, providas por qualquer uma das vias de acesso do equipamento, entradas e ou saídas digitais, interfaces de comunicação e valores analógicos de medida. Todos os dados estão disponíveis para uso por qualquer uma das funcionalidades do relé. Essa característica multifuncional é marcante, pois, o que distingue das tecnologias prévias aplicadas a construção de relés de proteção entre os fabricantes é esta característica multifuncional. A figura 33 mostra um bloco multifunção de um relé.

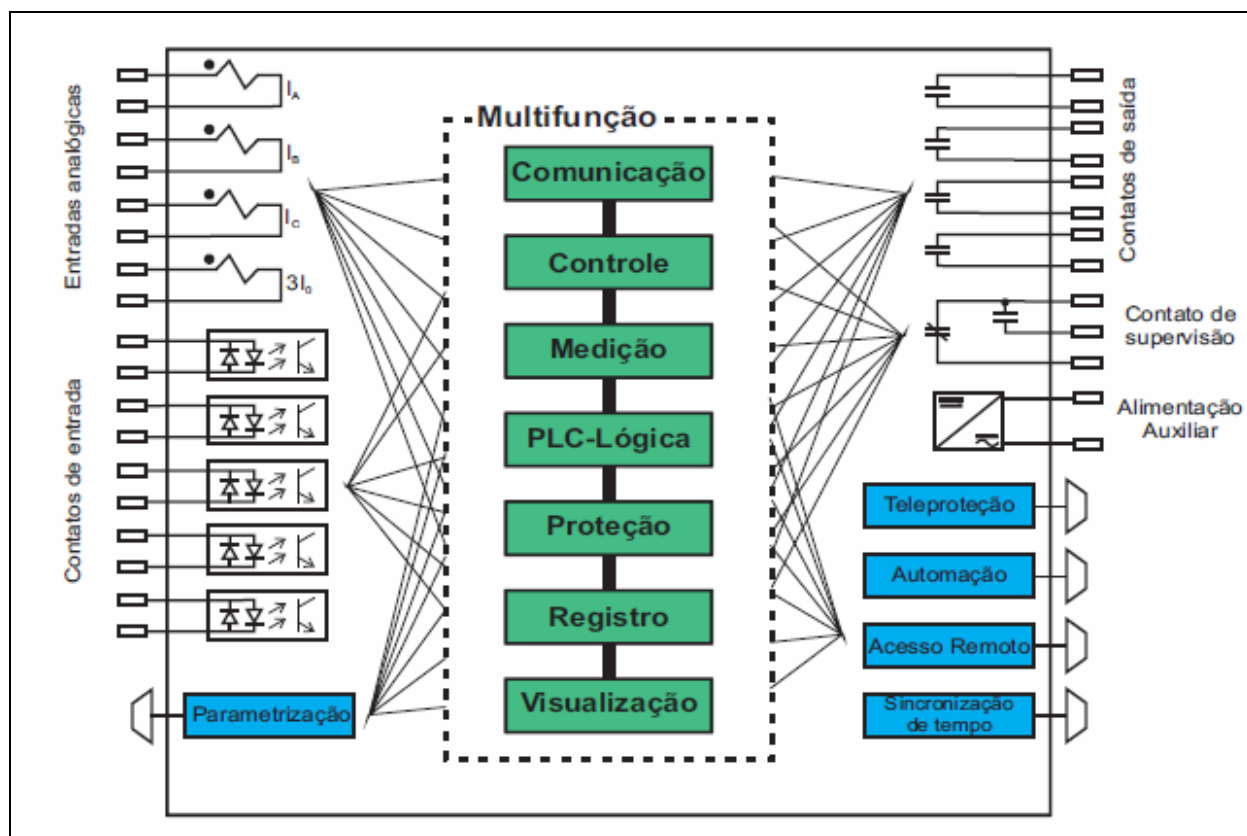


Figura 33:Exemplo de um bloco multifunção de um relé digital [15]

Os procedimentos auxiliares de auto-checagem e os modernos algoritmos de avaliação incorporados aos relés atuais permitem uma alta exatidão no cálculo da frequência, em torno de  $\pm 0,5\%$  de erro. Além disso, eles possibilitam a manutenção preventiva do mesmo, evitando problemas mais graves. Possuem facilidades de operação e manutenção proporcionadas pela utilização dos circuitos integrados, a unificação de diferentes funções de proteção, tais como a sobre ou subfrequência, e o gerenciamento automático dos procedimentos de restauração e rejeição de cargas em um único aparelho, possibilitaram o aumento da confiabilidade do sistema e melhores padrões na qualidade da energia elétrica. [7]

Como estes relés estão em expansão cabe aqui citar algumas vantagens e desvantagens dos relés digitais citados por [15].

Uma proteção digital possui algumas características vantajosas, dentre elas pode-se citar:

- Auto-checagem e confiabilidade - pode monitorar continuamente os subsistemas de hardware e software, de modo a detectar imediatamente possíveis falhas.

- Integração de sistemas digitais - os sistemas digitais possibilitam uma maior integração entre seus componentes, o que permite 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 são:

- Sensibilidade a surtos - necessitam de proteção especial contra surtos e interferências eletromagnéticas.

- Sensibilidade a temperatura - sensíveis a altas temperaturas, necessitam portanto, de dispositivos especialmente desenvolvidos para essa condição.

- Software não portátil - os algoritmos desenvolvidos para um hardware específico, em geral, não são aplicáveis a outro.

- Adoção relativamente recente aos sistemas elétricos de potência , estando em processo de assimilação desta base tecnológica, o que implica em mudança de paradigma e atualização de profissionais desta área.

Para a supervisão da frequência do sistema sob determinada condição de operação, freqüentemente faz-se uso de relés de frequência digitais, que acionam os dispositivos de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede fora dos patamares aceitáveis sob o ponto de vista de operação normal do sistema elétrico. Com o avanço tecnológico das últimas décadas e o aumento considerável da utilização de sistemas eletrônicos em equipamentos e máquinas, 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. Com isso,

observa-se 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, filtros de Kalman, filtros adaptativos etc. Todas estas técnicas citadas acima e outras estão sendo utilizadas e pesquisadas para o melhor desempenho dos relés digitais microprocessados no sistema elétrico de potência.

A título de exemplo a figura 34, representativa do diagrama de bloco de um relé digital de frequência, o autor do projeto propôs em sua pesquisa a implementação da técnica de medição de frequência utilizando filtros adaptativos em relés digitais [7].

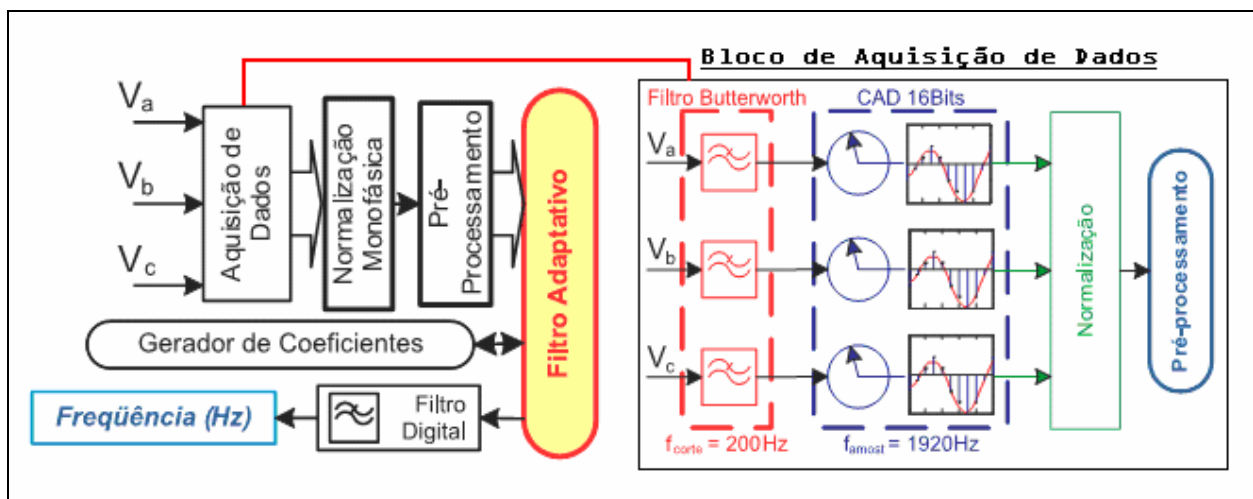


Figura 34: Diagrama de funcionamento básico do relé [7]

#### **4.7 – Considerações finais**

Através de uma visão panorâmica foi possível neste capítulo verificar a influência de variações de frequência no sistema elétrico. Um enfoque foi dado aos geradores síncronos e assíncronos e principalmente as turbinas a vapor, evidenciando a proposta desta dissertação.

O próximo capítulo apresenta fundamentação histórica, conceitos e técnicas de utilização da Transformada Wavelet, ferramenta proposta para detecção de distúrbios relacionados a frequência do sistema elétrico.

## **Capítulo V**

# **Transformada Wavelet**

### **5.1 – Considerações Iniciais**

Historicamente, a análise wavelet é uma técnica recente, no entanto seus fundamentos matemáticos apontam para o trabalho de Joseph Fourier no século XIX. Os tópicos seguintes deste capítulo tratará de forma conceitual os fundamentos básicos da técnica de wavelet , uma descrição sobre wavelet contínua e discreta, a técnica de Análise Multiresolução (AMR) tratada de uma forma bastante prática, exemplos das famílias Wavelets e finalizando com um tópico sobre aplicações da Transformada Wavelet em Sistemas Elétricos de Potência.

### **5.2 – A Transformada Wavelet**

Em síntese, a análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência é o que compõe a utilização da teoria Wavelet. J. Morlet introduziu o termo “Wavelet”, tendo a base matemática de suas idéias formalizada pelo físico teórico Alex Grossmann. 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. Diferentemente 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 [20] [55] .

A técnica de Wavelet ultrapassa as limitações dos métodos de Fourier pelo emprego de funções de análise, no tempo e na frequência. A transformada wavelet é excelente 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 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, melhora-se a análise de sinais caracterizados por impulsos e oscilações localizadas, particularmente na presença da componente fundamental e dos componentes harmônicos de baixa ordem [32].

A TW pode ser encontrada em 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.

### 5.2.1 – A Transformada Wavelet Contínua - TWC

A ferramenta para análise de sinais mais conhecida é a Transformada de Fourier (TF), que divide as informações contidas em um sinal em diferentes frequências através de funções bases senoidais, sendo a TF uma técnica de transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. A TF é muito utilizada para estudo de vários tipos de sinais, uma vez que o conteúdo de frequência é importantíssimo. Uma desvantagem desta técnica é a perda de informações referentes ao domínio do tempo quando o sinal é transformado para o domínio da frequência. Quando o sinal não possui muitas variações no domínio do tempo, as informações perdidas na transformação do sinal utilizando a TF não representam perdas significativas. Entretanto, muitos sinais contêm características não estacionárias (*ver figura 35*). Dennis Gabor adaptou a TF para analisar apenas uma pequena porção de tempo do sinal, originando a chamada

“*Short-Time Fourier Transform*” (STFT), transformada de Fourier dependente do tempo ou também dita como transformada janelada de Fourier contínua, que faz o mapeamento de um sinal unidimensional em duas dimensões tempo e frequência. Por utilizar uma forma de transformação muito limitada, uma vez que esta utiliza 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, a STFT possui uma precisão também limitada de suas informações (ver figura 36). [16] [31] [40].



Figura 35: Transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência usando FT [40]



Figura 36: STFT Transformada Janelada de Fourier contínua [40]

A Transformada Wavelet descrita por [6] apresenta uma técnica de “janelamento” variável. Esta Transformada permite o uso de uma janela de tempo maior para analisar informações de baixa frequência de forma mais precisa, e pequena janela para informações de alta frequência (ver figura 37).

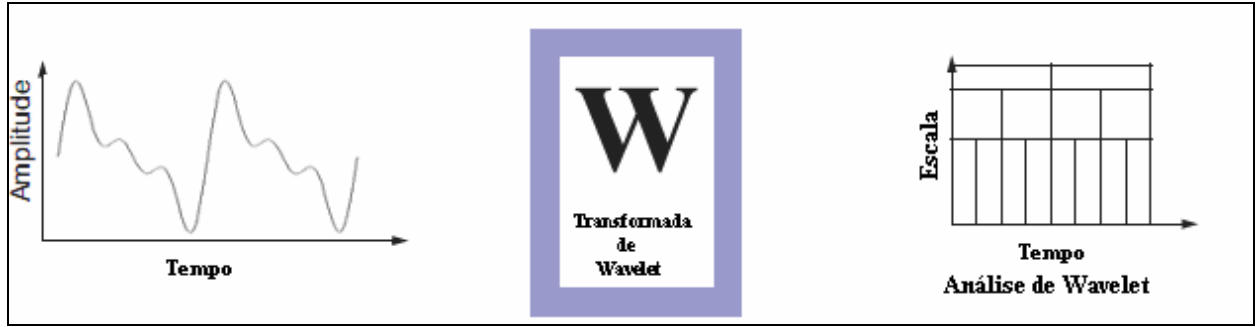


Figura 37: A TW analisa as baixas frequências, altas frequências e o tempo [40]

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  $a \in \mathfrak{R}$ ,  $a \neq 0$ , onde tem-se.

$$\psi_a(x) = |a|^{-p} \psi\left(\frac{x}{a}\right) \quad (7)$$

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  $\psi_a(x)$ , introduz-se o fator  $b \in \mathfrak{R}$ . Sendo assim tem-se:

$$\psi_{a,b}(x) = \psi_a(x-b) = |a|^{-p} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (8)$$

Matematicamente, a Transformada Wavelet Contínua (TWC) de um dado sinal  $x(t)$  em relação à wavelet-mãe  $\psi(t)$  é definida por:

$$TWC(a,b) := \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (9)$$

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

A equação 9 mostra que o sinal unidimensional original no domínio do tempo  $x(t)$  é mapeado para uma nova função, em um espaço bidimensional, por meio dos fatores de escala  $a$  e translação  $b$  pela TW.

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 wavelet-mãe é como uma função de janela percorrendo o sinal. Como mostra a figura 38 o fator de escala  $a$  e o tamanho da função janelada são interdependentes, desse fato decorre que menores escalas implicam em menores janelas. Com isso, analisa-se 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 [6] [32]. Isto é ilustrado na figura 38 extraída da referência [40].

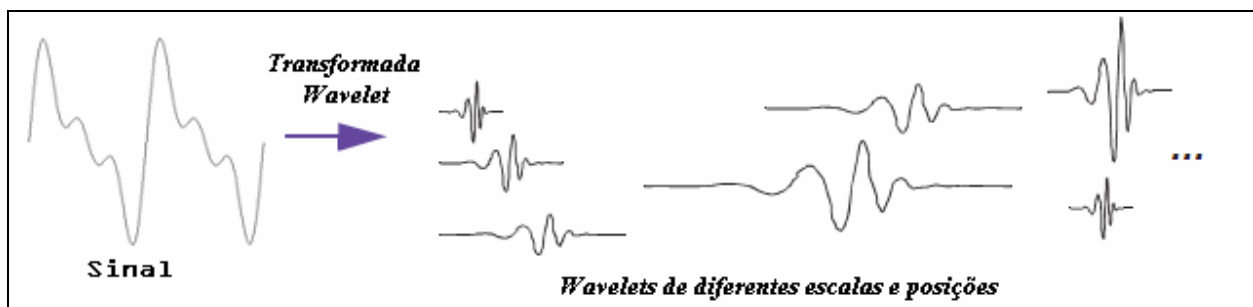


Figura 38: Representação de um sinal em diferentes escalas e posições [40]

### ***Escalamento e translação de funções Wavelets***

Escalar uma Wavelet significa simplesmente dilatá-la ou contraí-la, os efeitos são representados pelo fator de escala que é usualmente denotado pela letra  $a$ . Como exemplo, os segmentos de uma senóide, o efeito do fator de escala é muito facilmente observado, o que é ilustrado na figura 39, onde a diminuição do fator de escala “ $a$ ” contrai o gráfico da função [40].

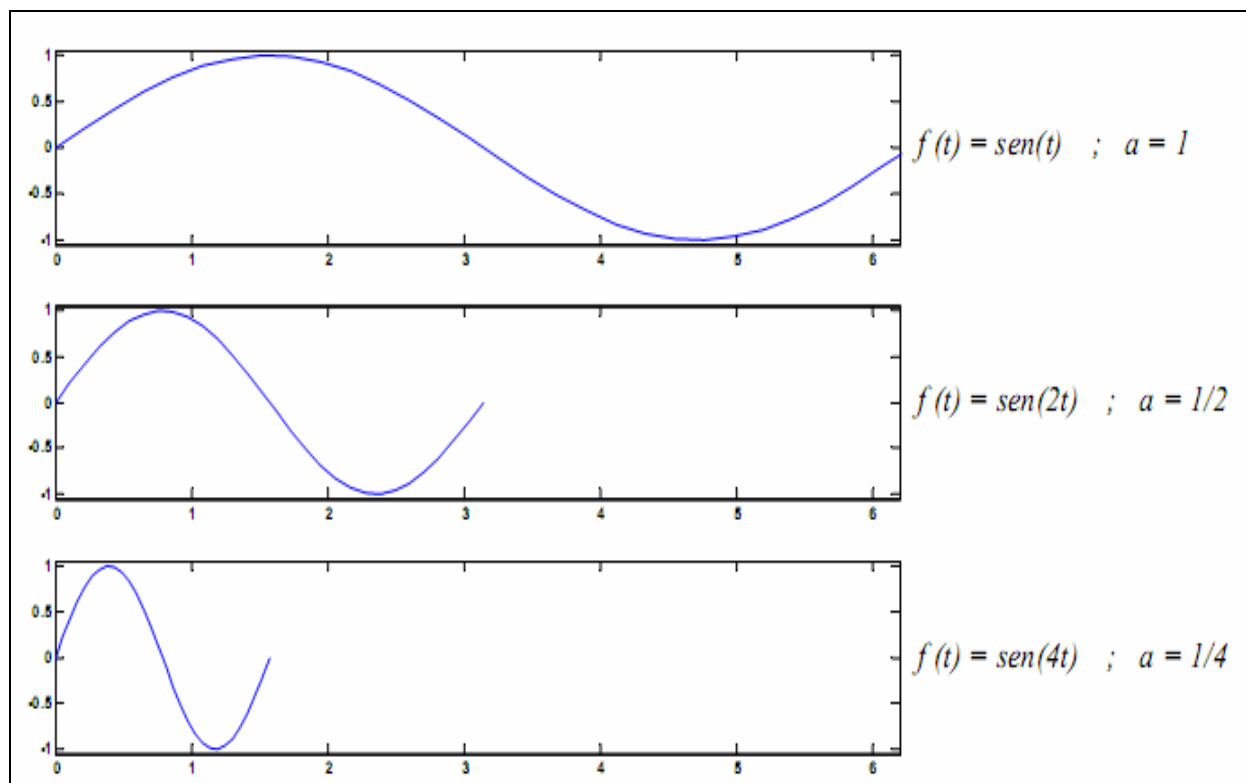


Figura 39: Exemplo do fator de escala em uma função seno

Conclui-se que quanto menor o fator de escala, mais “contraída” será a Wavelet. A figura 40 mostra o fator de escala atuando com funções Wavelets.

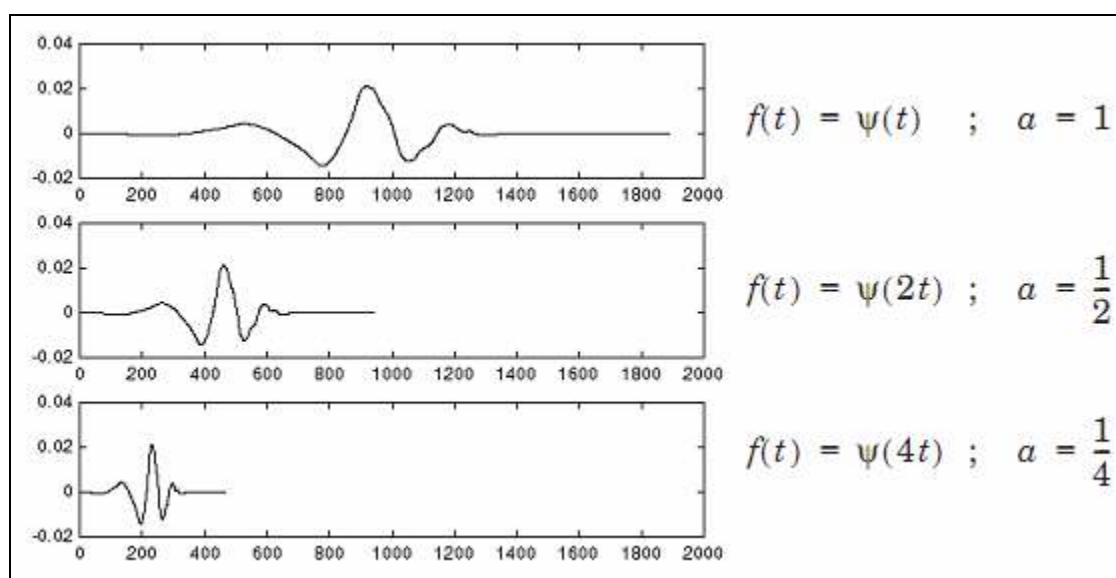


Figura 40: Exemplo do fator de escala em uma função Wavelet.

O exemplo da senoide mostra que para o segmento  $\sin(\omega t)$ , o fator de escala  $a$  é relacionado (inversamente) com a frequência em radianos  $\omega$ . Com a análise Wavelet, a escala é relacionada com a frequência do sinal. O que corresponde a:

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

Transladar uma Wavelet significa atrasá-la ou adiantá-la em relação ao eixo das abscissas, matematicamente escreve-se  $f(x-k)$  como um atraso na função  $f$  de um fator  $k$ , como pode ser visto abaixo na figura 41.

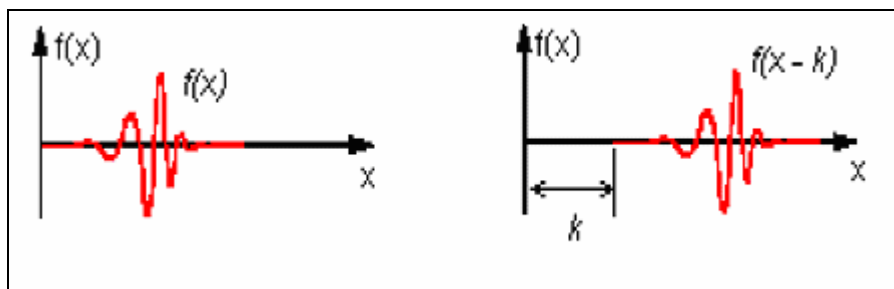


Figura 41: Translação aplicada a uma Wavelet.

### 5.2.2 – A Transformada Wavelet Discreta – TWD

Para se obter a Transformada Wavelet Discreta utilizam-se dois métodos: a aplicação da TWC com parâmetros de escala e translação discretos, e a técnica de multiresolução, [6].

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

Deve-se observar inicialmente que se necessita 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  $f(x)$ . Como a largura da Wavelet muda com a mudança da escala, precisa-se correlacionar as discretizações dos fatores  $a$  e  $b$ . Para se obter a correta 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, a forma da Wavelets não muda.

A Transformada de Fourier (TF) pode ser encontrada em duas versões diferentes, a contínua e a discreta (TDF). De maneira análoga, a Transformada Wavelet Contínua tem uma versão digitalmente implementável, chamada de Transformada Wavelet Discreta (TWD) que é definida como:

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

onde  $\psi$  é a Wavelet mãe,  $x(n)$  e 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  $b = nb_0 a_0^m$ . Estes parâmetros são usados para gerar a família das funções Wavelets, as Wavelets filhas.  $k$  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,  $1, 1/a_0, 1/a_0^2 \dots$ .

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 [6] [33].

### 5.2.3 – A TWD - Análise Multiresolução

O efeito 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 aplicar a transformada Wavelet [35].

O processo de filtragem utilizado apresenta uma forma de realização da técnica de Análise Multiresolução (AMR) de uma forma bastante prática. 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.

Considerando-se a Transformada Wavelet em suas formas Contínua e Discreta, fala-se usualmente 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: as componentes **de alta frequência**. O processo de filtragem é mostrado abaixo (*ver figura 42*), em uma forma simplificada, considerando-se somente o primeiro nível de filtragem:

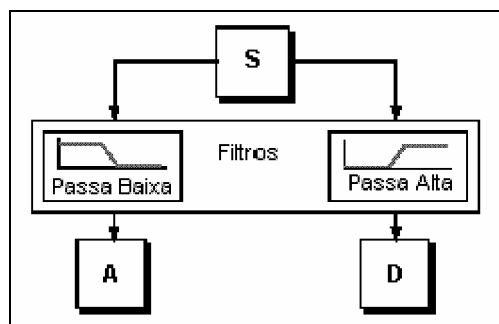


Figura 42: Processo de filtragem de um sinal



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. Assim considera-se dados intercalados, ou seja, considera-se o primeiro dado, rejeita o segundo, e assim por diante. Este operador é necessário devido ao caso de utilizarmos um sinal digital real, sem o “downsampling” teremos duas vezes mais a quantidade de dados em relação aos dados iniciais. Suponha que o sinal original  $S$  consista de 1000 amostras de dados. Sendo assim as versões de aproximação ( $A$ ) e de detalhes ( $D$ ) do sinal original terão 1000 amostras cada um, totalizando 2000 amostras. A figura 43 ilustra a operação do operador “downsampling” com e sem o estágio de diminuição do número de amostras. [40]

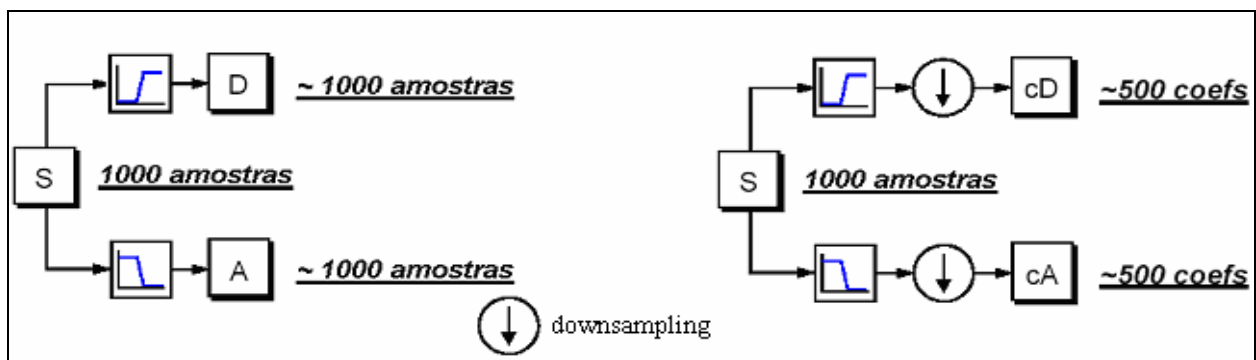


Figura 43: Processo de diminuição do número de amostras do sinal. Downsampling [40].

O processo da direita, que inclui diminuição de amostras, produz os coeficientes  $cD$  e  $cA$  referentes a TWD. Para se obter uma maior apreciação deste processo, é apresentado um exemplo, na Figura 44, com desenvolvimento da TWD de um sinal. O sinal utilizado para análise consiste em uma senóide com ruído de alta frequência adicionado a ela. 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.

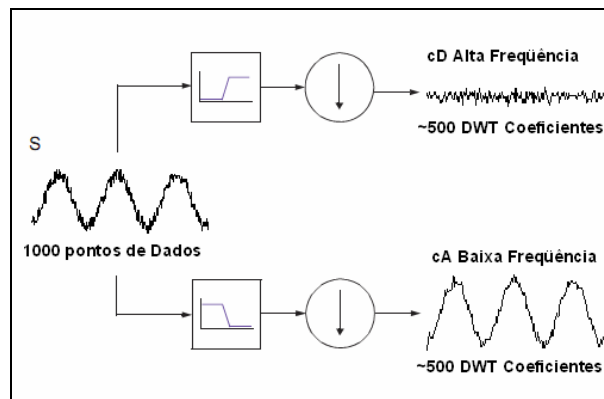


Figura 44: Exemplo de filtragem com downsampling de um sinal senoidal ruidoso [40]

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. Obtendo-se uma árvore de decomposição da wavelet em sub-bandas que pode ser vista sendo uma estrutura de banco de filtros (chamados de Filtros de Quadratura - *Quadrature filter (QF)*), conforme ilustra a figura 45. [53]

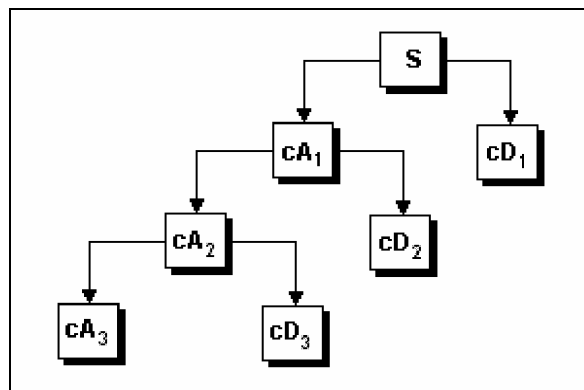
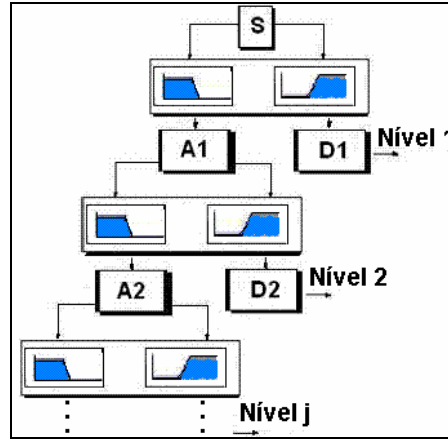


Figura 45: Ilustração do processo sucessivo de decomposição de um sinal em AMR [40]

A visualização da árvore de decomposição em coeficientes Wavelets, como mostrado na Figura 46, pode fornecer várias informações.



**Figura 46: Exemplo de decomposição sucessiva de um sinal [40]**

Uma vez que o processo é iterativo, na teoria pode-se decompô-lo indefinidamente. Na realidade, 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.[6]

Para que a decomposição em coeficientes Wavelets seja possível é necessário a aplicação de uma função de escalonamento  $\Phi(t)$  no sinal. A referência [53] descreve a funcionalidade deste escalonamento, baseada em equações.

Esta função de escalonamento deve ser contínua, geralmente real e ainda satisfazer a condição de admissibilidade, de acordo com a equação:

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

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 diática ( $2^n$ ), assim tem-se:

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

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 abaixo.

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

Para calcular a wavelet através da AMR, a equação abaixo mostra o processo de calculo:

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

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 abaixo:

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

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

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 seqüência 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 [53].

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

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

Resumindo, a idéia 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.

As famílias wavelets freqüentemente mais usadas 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. Apesar de não existir um critério definido para a escolha das wavelets, a melhor escolha é uma wavelet, que melhor caracteriza o fenômeno ou o problema a ser estudado [32].

Uma outra etapa 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, o fazemos a partir dos coeficientes Wavelets , como ilustrado na figura 47.

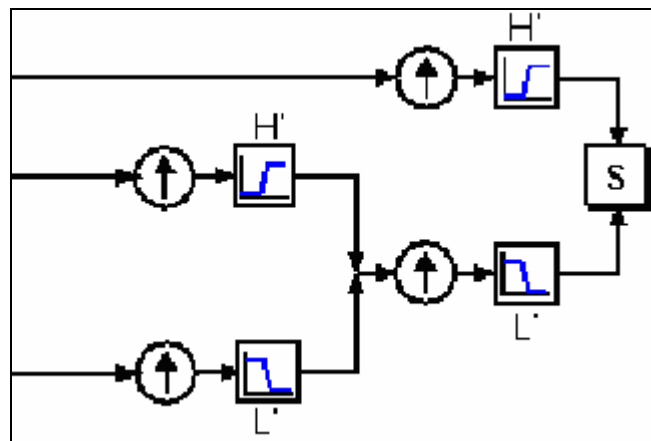
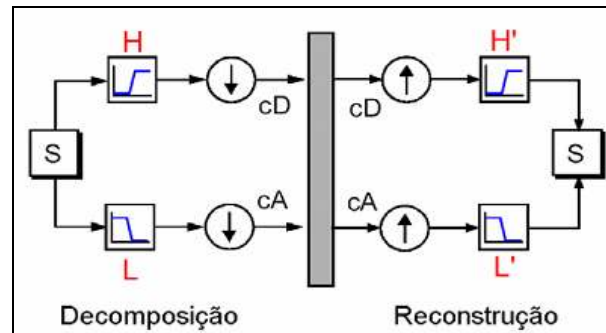


Figura 47: Processo de reconstrução de um sinal filtrado [40]

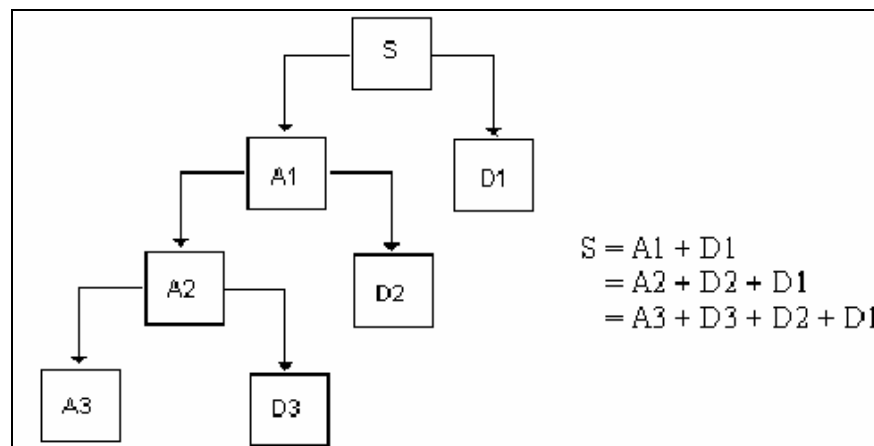
Como a análise Wavelet envolve filtragem e diminuição do número de amostras, a reconstrução Wavelet consiste em aumentar o número de amostras na filtragem. Aumentar o número de amostras é o processo de elevar o número de componentes do sinal pela inserção de zeros entre as amostras. A parte de filtragem 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. O processo de diminuição do número de amostras do sinal introduz neste, distorções de *aliasing* que podem ser canceladas pela escolha correta do filtro de reconstrução. Sendo uma descoberta feita pelo trabalho de Ingrid Daubechies como descrito em [40], (ver figura 48).



**Figura 48:** Processos de decomposição e reconstrução de um sinal Ingrid Daubechies [40]

Também é possível reconstruir as aproximações e detalhes em si, a partir dos vetores de coeficientes (ver figura 49) .



**Figura 49:** Reconstrução do sinal a partir de seus coeficientes [40]

Este processo produz a reconstrução do sinal de aproximação A1, que possui o mesmo tamanho que o sinal original S, sendo uma aproximação real. Similarmente, podemos reconstruir o primeiro nível de detalhe D1, usando o processo análogo, como na figura acima. Os detalhes e

aproximações reconstruídos são verdadeiramente constituintes dos sinais originais. Encontram-se isto quando combinamos  $A1 + D1 = S$ . Os vetores de coeficientes  $cA1$  e  $cD1$ , por serem produzidos pela diminuição do número de amostras, contêm distorção *aliasing*, e suas dimensões são somente a metade da dimensão do sinal original. Assim, não podem ser combinados diretamente para reproduzir o sinal original. É necessário reconstruir as aproximações e detalhes antes de combiná-los. Existem diferentes formas para se reconstruir o sinal a partir de seus coeficientes [40] [62].

### 5.3 - Famílias Wavelets

Existe um grande numero de funções que podem ser eleitas como wavelets mãe. A seguir são apresentadas algumas wavelets com a finalidade de ilustrar simplesmente a variedade dos formatos de algumas poucas wavelets, sem apresentar detalhe formal. As figuras das wavelets mães foram retiradas do guia do usuário do Wavelet Toolbox do matlab [40].

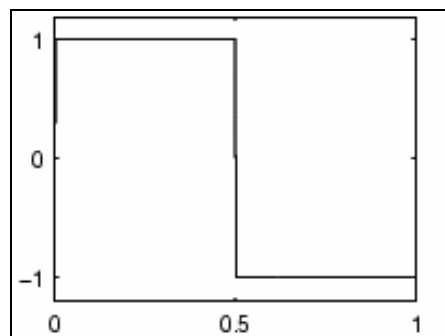
Segundo [57] um dos fatores que alavancou a utilização da teoria de wavelets, foi os estudos que introduziram funções ou famílias de funções apropriadas para serem utilizadas como wavelets. As famílias de funções são comumente representadas pela abreviação do pesquisador que as desenvolveram (“coif” para Coifman ou “db” para Daubechies) ou de alguma denominação dada (“sym” para Symlets), seguido por um número que costuma representar uma característica da função.

Como característica geral, observa-se que todas as funções decaem 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. As funções wavelet oscilam mais que suas escalonadoras associadas. A wavelet coif2 exhibe alguns pontos angulares. As wavelets db6 e sym6 são bastante suaves. Há diferentes tipos de famílias de funções wavelet, cujas qualidades variam de acordo com diversos critérios.

Um dos aspectos relevantes é o comprimento (também chamado de “suporte”) das funções wavelet e 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 [57].

- **Wavelet de Haar.**

A Wavelet com os mais simples coeficientes no espaço  $L^2(\mathbb{R})$  é denominada Wavelet de Haar (*ver figura 50*). Uma propriedade da Wavelet de Haar é que ela tem suporte compacto, contudo ela não é continuamente diferenciável, o que de certa forma limita suas aplicações.



**Figura 50: Wavelet mãe Haar**

- **Wavelet de Daubechies**

Ingrid Daubechies, criou o que é chamado de “wavelet ortogonal 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 desta wavelet mãe. Abaixo (*ver figura 51*) 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.



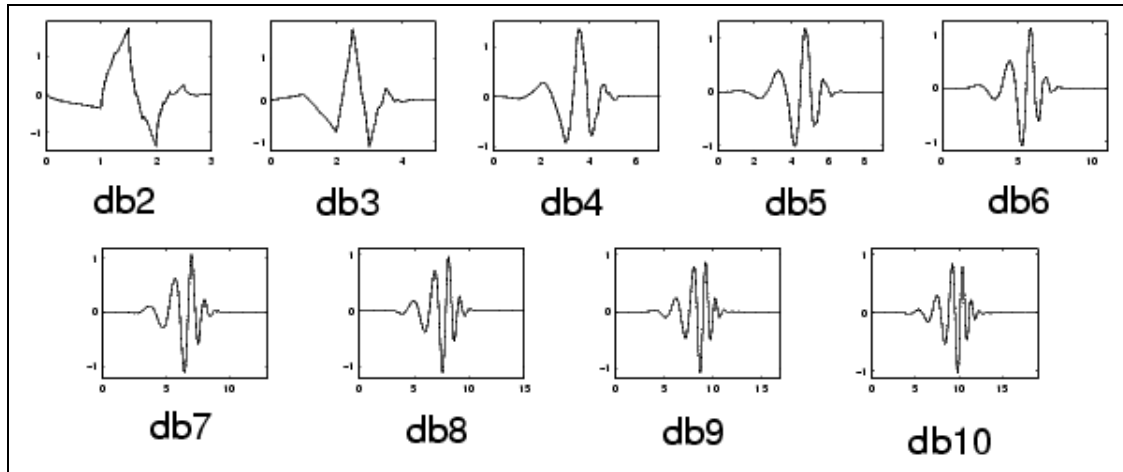


Figura 51: Wavelet mãe Daubechies

- **Wavelets tipo Coiflets**

Estas wavelets foram definidas por I. Daubechies e R. Coifman, pesquisadores na área de Teoria Wavelet, em 1989. As coiflets (*ver figura 51*) 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 destas. Porém alguns autores usam 2N no lugar de N.

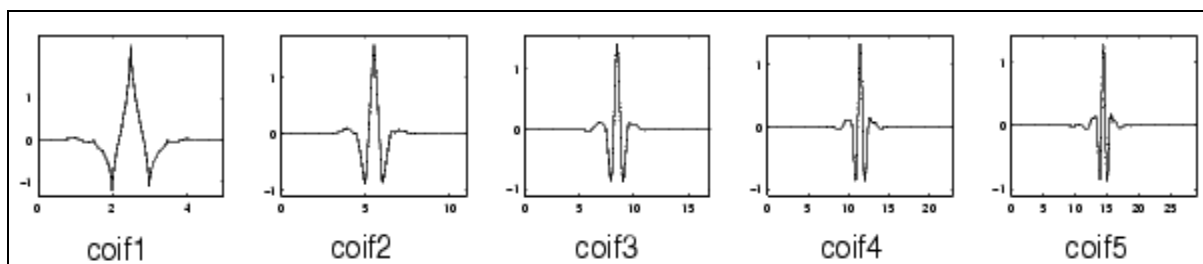


Figura 52: Wavelet mãe Coiflets

- **Wavelets tipo Symlets**

Uma da wavelets 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 que wavelets que possuem variações bruscas, ou descontinuidades, como a wavelet de Haar, a sym2 ou a db2. As wavelets mães da família Symlet apresentam-se em vários modelos, variando da sym2 à sym45. Na figura 53 apresenta-se alguns destes modelos. Esta família apresenta algumas características gerais, tais como: possui suporte compacto com menor número de assimetria e maior número de decaimento para uma largura dada em relação à família Daubechies.

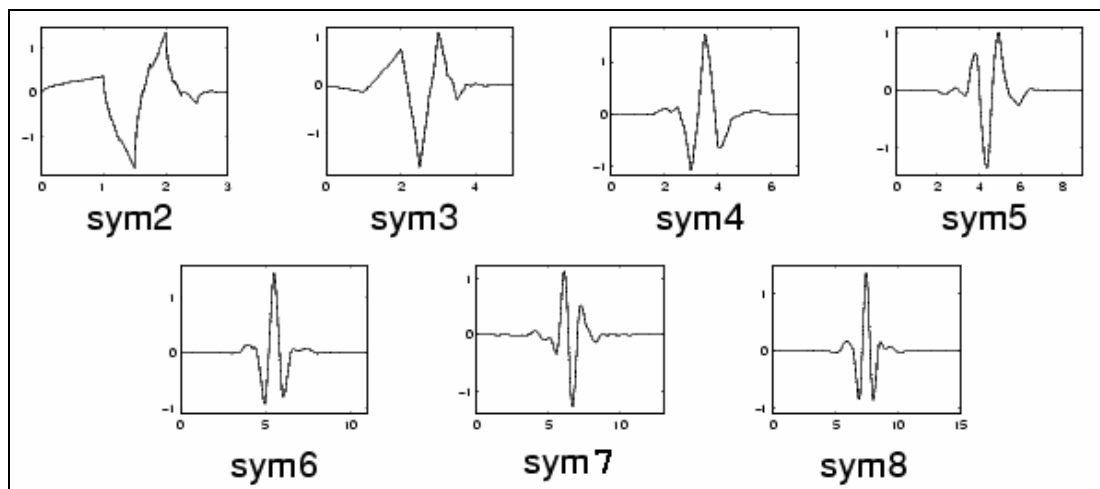


Figura 53: Wavelet mãe Symlets

- **Wavelets Biortogonais**

A família de wavelets biortogonais exibe a propriedade de fase linear, a qual é necessária para a reconstrução do sinal. Usa 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 (*ver figura 54*).

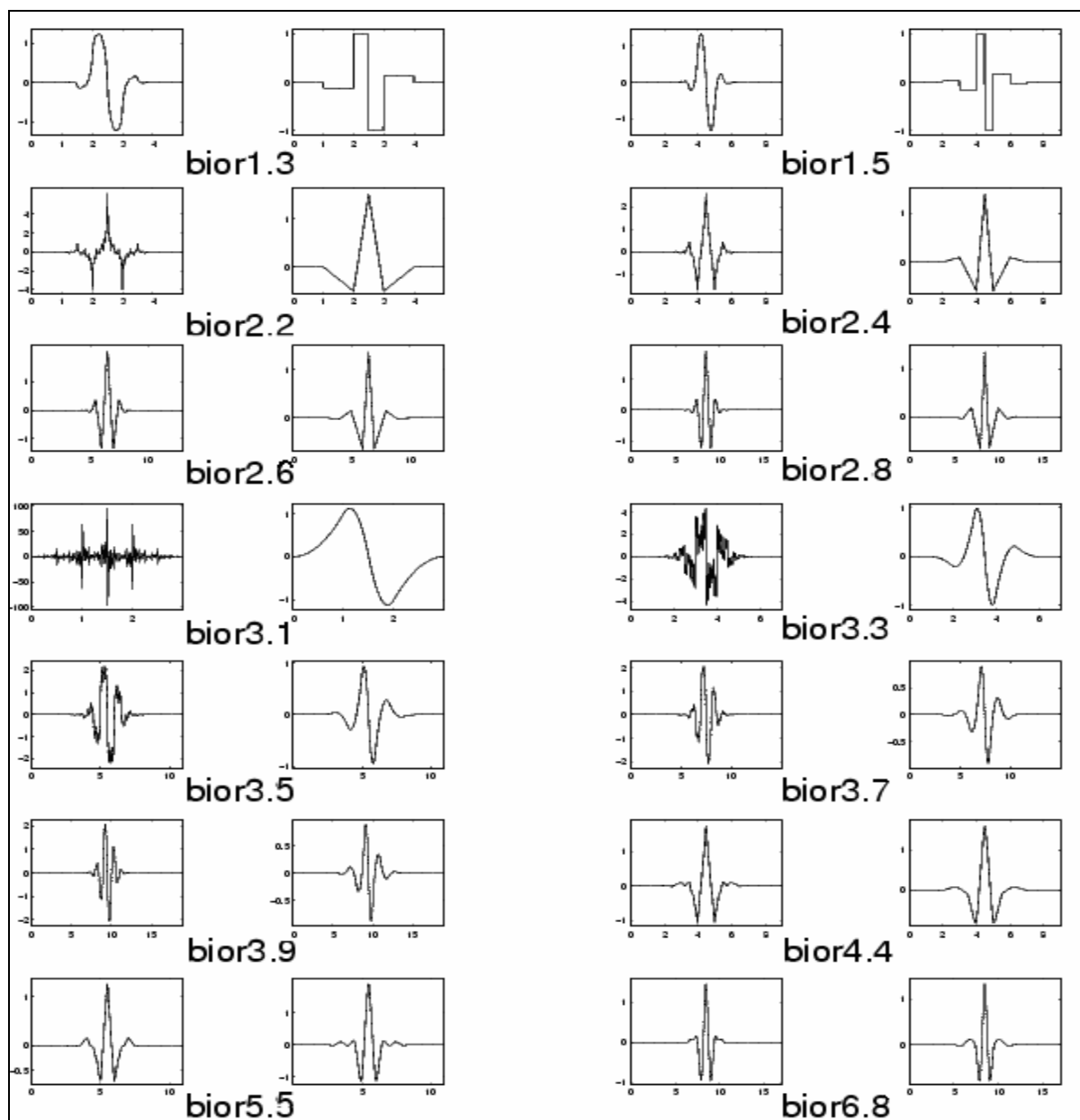


Figura 54: Wavelets mãe Biortogonais

## 5.4 – Aplicações da Transformada Wavelet em Sistemas Elétricos de Potência

O número de publicações sobre a aplicação da TW em sistemas elétricos de potência tem expandido nos últimos anos. Diferentes aplicações são propostas, principalmente na área de qualidade da energia, destacando neste contexto o trabalho de desbravador de [55]. No ano de 2001, [32] demonstrou através de uma pesquisa que na década de noventa 45% dos trabalhos realizados com wavelet em sistemas elétricos são relacionados à qualidade de energia elétrica, 23% relacionados proteção de sistemas de potência, 11% em estudos de transitórios em sistemas de potência, 9% em descargas parciais, 6 % em transformadores, 4% em sistemas de medição e 2% em sistemas de monitoramento. Exemplificando o emprego da TW em relés digitais, na detecção, classificação e monitoramento têm-se a o trabalho de [62]. Esta pode ser implementada através do 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” incluído no software Matlab.

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. Segundo [6], wavelets mais suaves indicam melhor resolução em frequência que wavelets que possuem variações bruscas como a wavelet de Haar, sendo o oposto aplicado para resolução no domínio do tempo. As funções: Haar, Daubechies (dbN,  $N = 2, 3, \dots, 8$ ), Symlets (symM,  $M = 1, 2, \dots, 8$ ) e Coiflets (coifP,  $P = 1, 2, \dots, 5$ ), formam o grupo de vinte e uma bases ortogonais as quais podem ser submetidas a testes com o objetivo de monitorar, detectar e

localizar distúrbios relacionados com a QEE. Em sua dissertação [6], verificou que aumentando a ordem das wavelets mães ortogonais, seus comportamentos em suavidade oferecem melhor resolução em frequência. Sendo assim, as wavelets de Daubechies e Symlet de ordem superior a três e Coiflets de ordem superior a dois oferecem melhores resultados em relação às bases wavelets ortogonais utilizadas para análise de distúrbios ligados à QEE. Tal resultado, associado à facilidade de cálculos que a envolve, justifica a ampla utilização da Wavelet Daubechies de quarta ordem (db4) para análises em sistemas elétricos de potência. No entanto, por apresentarem comportamentos com menor suavidade, as demais bases (dbN,  $N = 1, \dots, 3$ , symM,  $M = 1, \dots, 3$  e coifP  $P = 1$  e  $2$ ) serão analisadas neste trabalho para verificar a eficiência destas no monitoramento da variação frequência do sistema.

#### 5.4.1 Aplicação da Técnica de AMR

A técnica de AMR, como já descrita anteriormente, consiste na decomposição do sinal a ser analisado (S) em dois outros sinais, uma versão que contém os **detalhes** do sinal e outra atenuada (ou de **aproximação**), através de filtros **passa alta** (A1) e **passa baixa** (D1) 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**. Suponha-se que estes novos sinais decompostos indiquem, diretamente, a existência de algum distúrbio. Tal procedimento de análise é ilustrado nas figuras 55 e 56, onde o sinal (S)  $f(x)$  é submetido ao processo de decomposição em AMR.

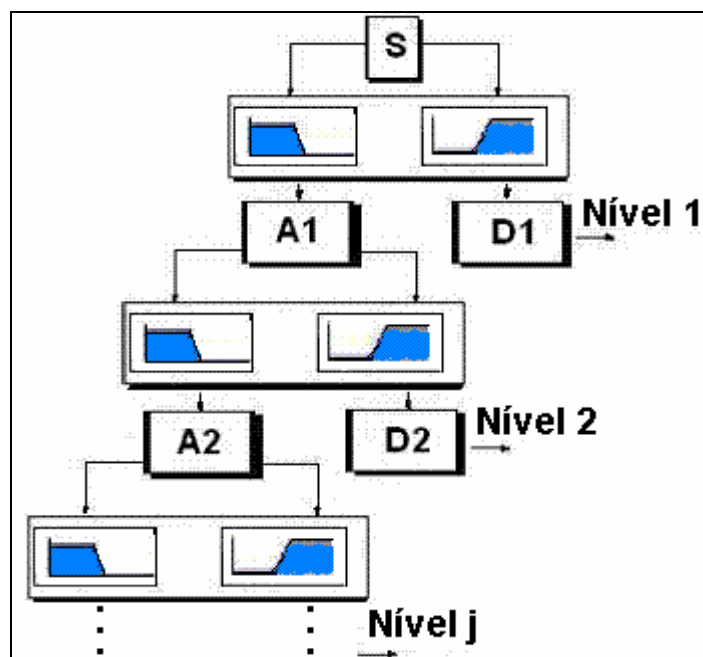


Figura 55: Exemplo de decomposição sucessiva de um sinal [40]

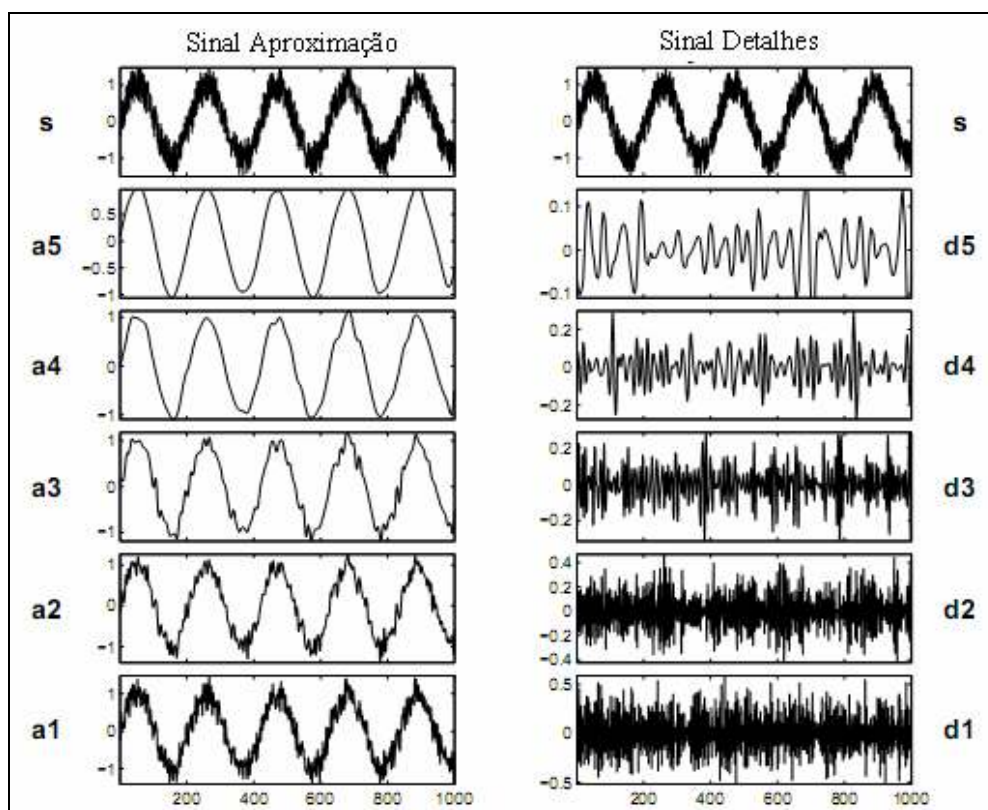


Figura 56: Exemplo de decomposição de um sinal com aproximação e detalhes [40]

Utilizando-se a técnica descrita, serão analisadas situações de distúrbios relacionados com a frequência do sistema elétrico. O objetivo é detectar variações de frequência, verificar sua duração e quantificar a os momentos de variações de frequência. Espera-se que com esta metodologia ter-se uma informação pertinente de quanto tempo o sistema elétrico ficou fora da frequência nominal e quais os valores desta variação de frequência.

## **5.5 Considerações Finais**

A ferramenta matemática transformada de wavelet é muitíssimo abrangente, sendo esta utilizada deste estudos geográficos, imagens, eletrocardiogramas, sinais elétricos e outros, visto que neste capítulo abordou-se de forma concisa a sua aplicação e definição. Através do levantamento bibliográfico fica claro que a utilização da técnica de multiresolução em análise de sinais elétricos e bastante utilizada e demonstrando ser uma ferramenta eficiente na obtenção de informações dos sinais analisados, ressaltando que as famílias de wavelet mais utilizada para análise de sinais no sistema elétrico são as Daubechies, Symlet e Coiflets por serem wavelets mais suaves e indicam melhor resolução em frequência.

A transformada wavelet se destaca no estudo de análise de sinais, comparando-a com a transformada de Fourier, por decompor o sinal em níveis de frequência e tempo, característica que faz da transformada de wavelet um ferramenta inovadora e bastante utilizada nos dias atuais.

O próximo capítulo apresenta a aplicação da técnica de AMR nos estudos de caso, propostos, a descrição do algoritmo implementado como ferramenta para detecção de distúrbios relacionados a frequência do sistema elétrico.

## Capítulo VI

# Fundamentos e Implementação do Algoritmo Proposto

### 6.1 – Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta brevemente a ferramenta computacional utilizada para realizar as simulações de transitórios eletromagnéticos contidas nesta dissertação, bem como os modelos computacionais empregados para representar os principais componentes de rede juntamente com uma descrição do sistema industrial adotado.

Para que este estudo atendesse às situações reais frequentemente encontradas em campo, utilizou-se a modelagem de um sistema de distribuição ou modelo IEEE do software PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) [36]. Não foi realizada nenhuma pesquisa em campo para obtenção de dados reais medidos junto às concessionárias, indústrias e usinas da região, fez-se uso de simulações computacionais via software específico, neste caso os softwares PSAT e o MATLAB que serão citados a seguir.

Neste capítulo tem-se a descrição do algoritmo proposto para obter os resultados, sendo este algoritmo o objetivo central desta dissertação que é a obtenção de dados referente às variações de frequência no sistema elétrico, as quais podem provocar danos principalmente no conjunto gerador turbina a vapor.

Finalizando o capítulo, têm-se as conclusões e considerações finais relativas aos resultados obtidos.



## 6.2 – Sistema Elétrico Proposto

Com o propósito de simular um sistema, o qual possa representar a realidade nacional e, também expor a necessidade real de monitoramento da frequência da rede elétrica para fins de manutenção preditiva, utilizou-se para fins de simulação um sistema elétrico de 14 barras, modelo comumente utilizado em artigos do IEEE, e também utilizado na biblioteca do software PSAT. Com o intuito de investigar as variações de frequência em virtude de perturbações ocorrentes no sistema elétrico, e os danos que estas variações podem causar nas turbinas a vapor (*fadiga nas palhetas, como explicado no capítulo 4*), optou-se por este sistema o qual pode muito bem representar ( *para efeitos de simulações* ) as usinas de açúcar e álcool (ver a figura 57, exemplo representativo).

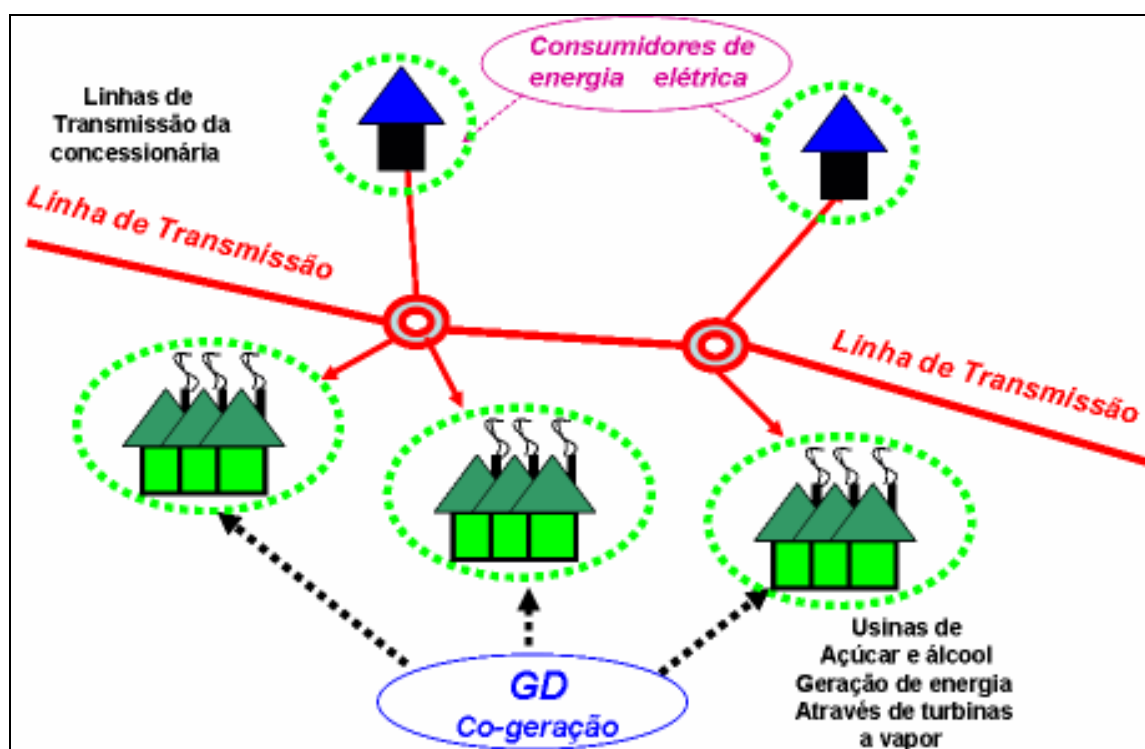


Figura 57: Usinas de açúcar e álcool, representação de um sistema de GD

Todo o sistema elétrico, desde a geração até a carga a qual está conectada por meio de sistemas de transmissão e distribuição, deve operar em equilíbrio, tanto de frequência como de

tensão. Esse equilíbrio é conseguido mantendo-se valores de tensão e frequência dentro de níveis pré-estabelecidos, ao longo de toda a rede elétrica. O sistema elétrico do Brasil é de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional, é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Como o sistema é quase todo interligado, o equilíbrio deve ser mantido, pois falhas em uma área podem acabar prejudicando todo o sistema.

Na interligação dos cogeneradores ao sistema elétrico, uma das primeiras decisões a ser tomada é a escolha da tensão na qual o cogenerador irá se conectar com a distribuidora de energia. Essa decisão envolve parâmetros técnicos que devem ser analisados, pois para inserir um montante de energia na rede de distribuição, o gerador deve entrar em paralelismo e sincronismo com a concessionária local. Normalmente, a tensão da rede básica de distribuição é de 13,8 kV, 34,5 kV, 69 kV ou 138 kV, dependendo de cada região. A geração descentralizada a partir de bagaço de cana é feita, na maioria das vezes, em 13,8 kV, devido às características dos geradores usados nestas instalações. Entretanto, não é porque ela é gerada em 13,8 kV que essa energia tem que ser distribuída nos mesmos 13,8 kV. O transporte de energia em tensões mais elevadas, como é o caso de 69 ou 138 kV, permite o transporte de grandes quantidades de energia, acima de 5 MW, a longas distâncias. Assim, a opção por uma tensão de 13,8 kV somente se mostra viável para potências inferiores a 5 MW e distâncias pequenas, em torno de um quilômetro [11].

As variáveis do sistema elétrico, frequência e tensão, estão relacionadas com dois controles dos geradores e dos sistemas: o controle de carga e frequência e o controle de tensão. Toda carga precisa consumir potência ativa para realizar trabalho ou produzir calor, as máquinas geradoras do sistema elétrico que alimentam tais cargas, quando em operação normal, trabalham orientadas para uma mesma frequência. Assim, qualquer alteração de carga irá se refletir na frequência do sistema. Se há um aumento da carga, tende-se a ter uma diminuição da frequência, pois a carga irá buscar a energia necessária nos geradores do sistema. Ou seja, a velocidade

destes geradores precisa ser aumentada, o que é conseguido por atuação dos controladores de velocidades dos geradores, que atuam para que sua velocidade cresça de forma a manter a frequência. O inverso também ocorre, ou seja, quando há uma diminuição da carga, os geradores precisam ter sua velocidade diminuída.

A frequência do sistema elétrico normalmente é 60 Hz, mas observa-se uma constante variação em torno dessa referência, causada pela constante variação da carga. No caso do sistema interligado brasileiro, que é muito grande, as variações de carga são absorvidas pelo sistema, e acabam não sendo percebidas pelo consumidor. Porém, se o sistema é isolado ou de pequeno porte (tal como uma usina de açúcar e álcool com geração própria), uma variação de carga pode provocar alteração na frequência, podendo causar subfrequência ou sobrefrequência.[11]

O PSAT é um programa computacional utilizado para fazer análises estáticas, dinâmicas, e de controle de sistemas elétricos de potência. Nele inclui-se 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 [36]. Trata-se de uma ferramenta desenvolvida em linguagem Matlab.

O método de Newton-Raphson foi escolhido no PSAT para resolver as equações de fluxo de potência do sistemas teste estudado. 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 obter uma solução analítica explícita. Sendo então necessário métodos de integração numérica, que fornecem a obtenção de soluções aproximadas para tais equações.

O PSAT dispõe de dois métodos implícitos que são: O Método de Euler Implícito e o Método Trapezoidal Implícito, esses métodos são baseados em algoritmos que utilizam a matriz Jacobiana completa. Para a realização das simulações presentes nesta dissertação, foi escolhido

o Método Trapezoidal Implícito, o qual, apesar de ser considerado um método de implementação mais simples, demonstra ser mais robusto e confiável para vários casos testados.

Na sequência tem-se a descrição dos modelos dos equipamentos utilizados na composição dos sistemas teste estudado, no anexo B temos a descrição dos equipamentos utilizados com mais detalhes e também os dados técnicos do diagrama teste utilizado, bem como o fluxo de carga do mesmo.

### ***Máquina síncrona (G):***

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. (Milano F. 2007). O modelo de 6º 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”, os detalhes do modelo de gerador utilizado estão descritos no anexo B [36].

### ***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. O seu modelamento matemático, assim como os parâmetros utilizados estão no anexo B. [36]

### ***Regulador de Turbina (TG):***

De grande utilidade para turbinas a vapor, o regulador de turbina controla a velocidade da máquina rotativa, o PSAT possui dois modelos, sendo utilizado neste trabalho o modelo número 2, com seus parâmetros descrito no anexo B [36].

***Linha de Transmissão ( $\pi$ ):***

A linha de transmissão é representada com seus parâmetros fixos, resistência, reatância e capacitância, por meio de um modelo equivalente  $\pi$  [36]. Os dados utilizados aqui estão dispostos no Anexo B.

***Cargas:***

O modelo de 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.

***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. No anexo B encontra-se os valores dos parâmetros utilizados nas simulações [36] .

### **6.2.1 Descrição do sistema utilizado**

No sistema proposto (*ver figura 58*), encontra-se ligado ao barramento B1 um gerador síncrono de 615 MVA o qual representa uma unidade geradora hidráulica. Este possui um regulador de Tensão e um estabilizador (AVR e PSS). Neste barramento têm-se a representação de um barramento infinito (*stack*) simbolizando um equivalente de todo o sistema elétrico. Nos barramentos B2 e B3 como citado anteriormente, têm-se duas unidades geradoras de 60 MVA, nos barramentos B6 e B8 duas unidade geradoras de 25 MVA. Todas estas unidades de menor potência simbolizam sistemas de GD de usinas de açúcar e álcool, todas com turbinas a vapor.

Como o objetivo principal é analisar o comportamento da frequência no sistema proposto, pois a sua variação pode causar danos nas palhetas das turbinas, criou-se três situações hipotéticas:

- Caso 1 - Simulação de um curto circuito trifásico localizado na barra 2;
- Caso 2 – Simulação de rejeição de carga localizada entre as barras 2 e 4;
- Caso 3 – Simulação de ilhamento do gerador G2 localizado na barra 2;

Para cada um dos estudos propostos tem-se uma situação de análise da dinâmica da frequência do sistema. No caso 1, sabe-se que, em virtude do curto circuito, tem-se um súbito afundamento de tensão. No caso 2, tem-se uma elevação de tensão devido a rejeição de carga, e no caso 3, se configura um caso especial onde a unidade geradora G2 ficará desconectada 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 frequência.

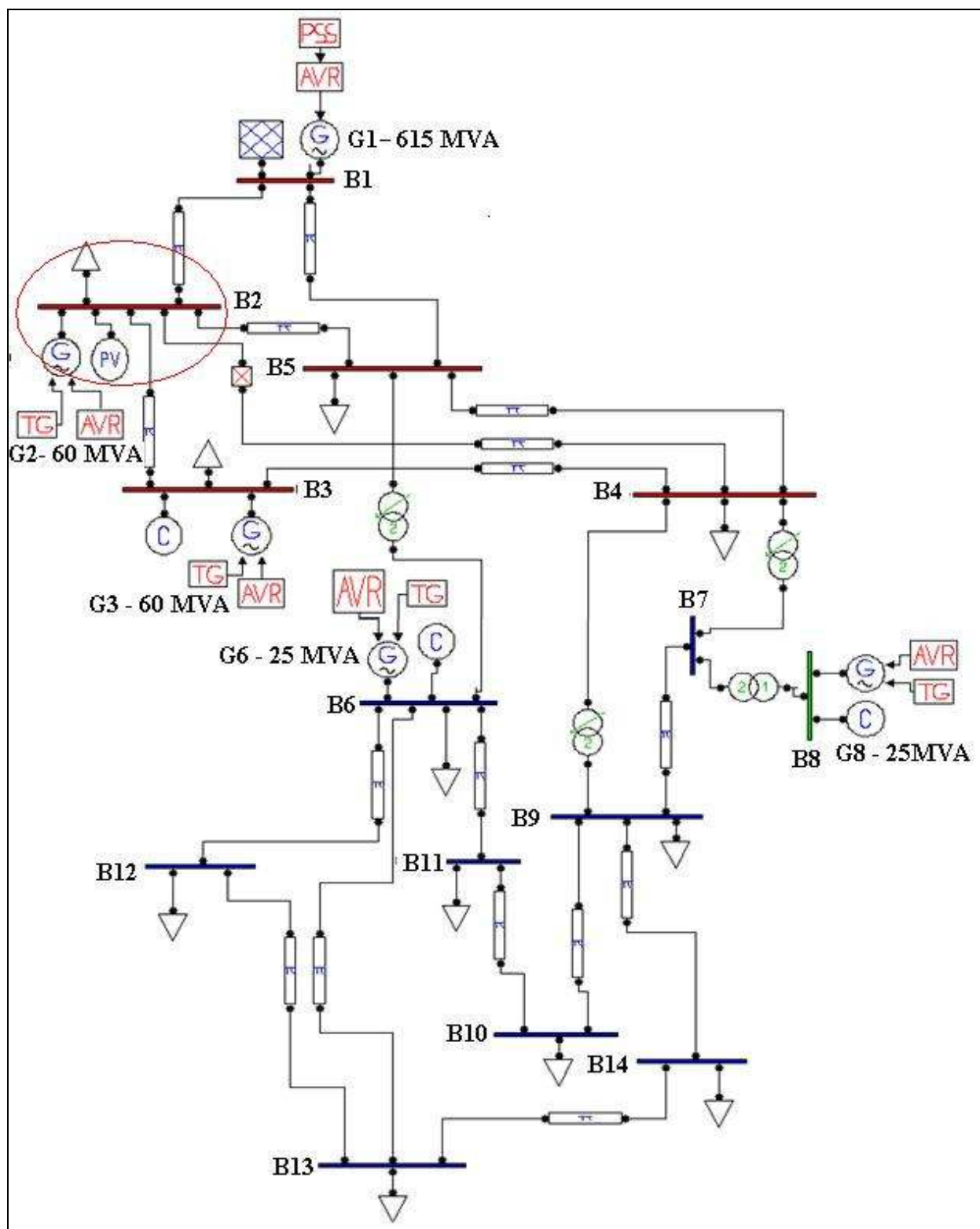


Figura 58: Sistema Elétrico Proposto-Destaque Barramento B2 [36]

No anexo B temos a descrição do fluxo de carga do sistema elétrico proposto da figura 58

### 6.2.2 Lógica Computacional Proposta

Neste tópico são apresentadas as etapas de detecção e estimação dos valores de subfrequência e sobrefrequência, bem como o tempo em que o sistema permaneceu nestas duas condições. Para o módulo de detecção de sub ou sobrefrequência utilizou-se a técnica de Wavelet AMR descrita no capítulo 5. O fluxograma abaixo (*figura 59*) mostra de forma global a lógica computacional proposta.

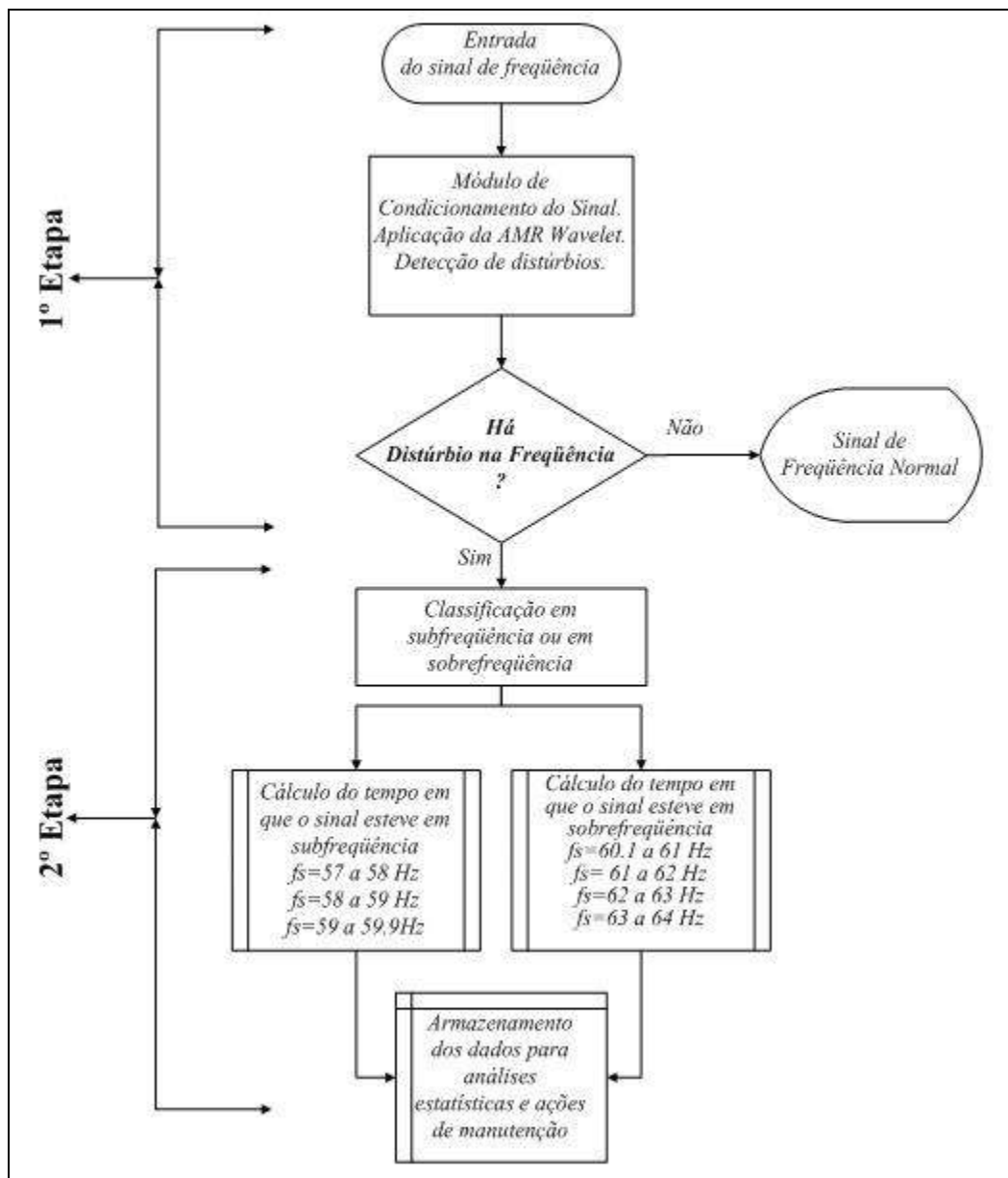


Figura 59: Fluxograma do Algoritmo proposto



A lógica computacional é uma proposta para um módulo de um relé digital de frequência, pressupondo que este já está no sistema em questão, disponibilizando os dados referentes aos valores de frequência. As figuras 60 e 61 visam demonstrar de forma simples a funcionalidade do relé.

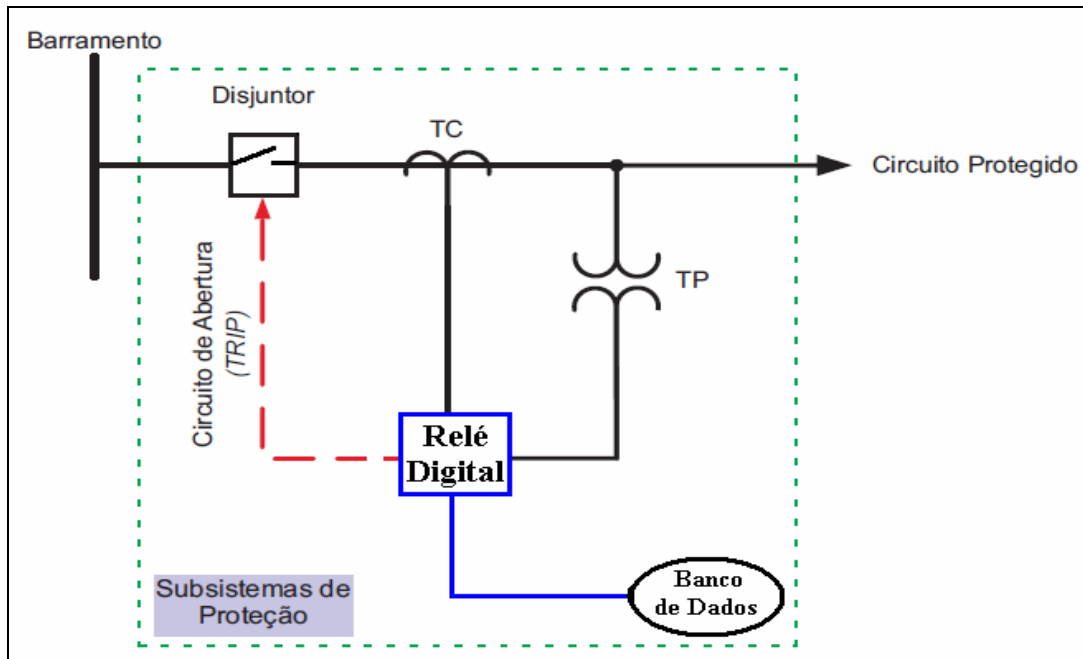


Figura 60: Ilustração básica da funcionalidade de um relé digital

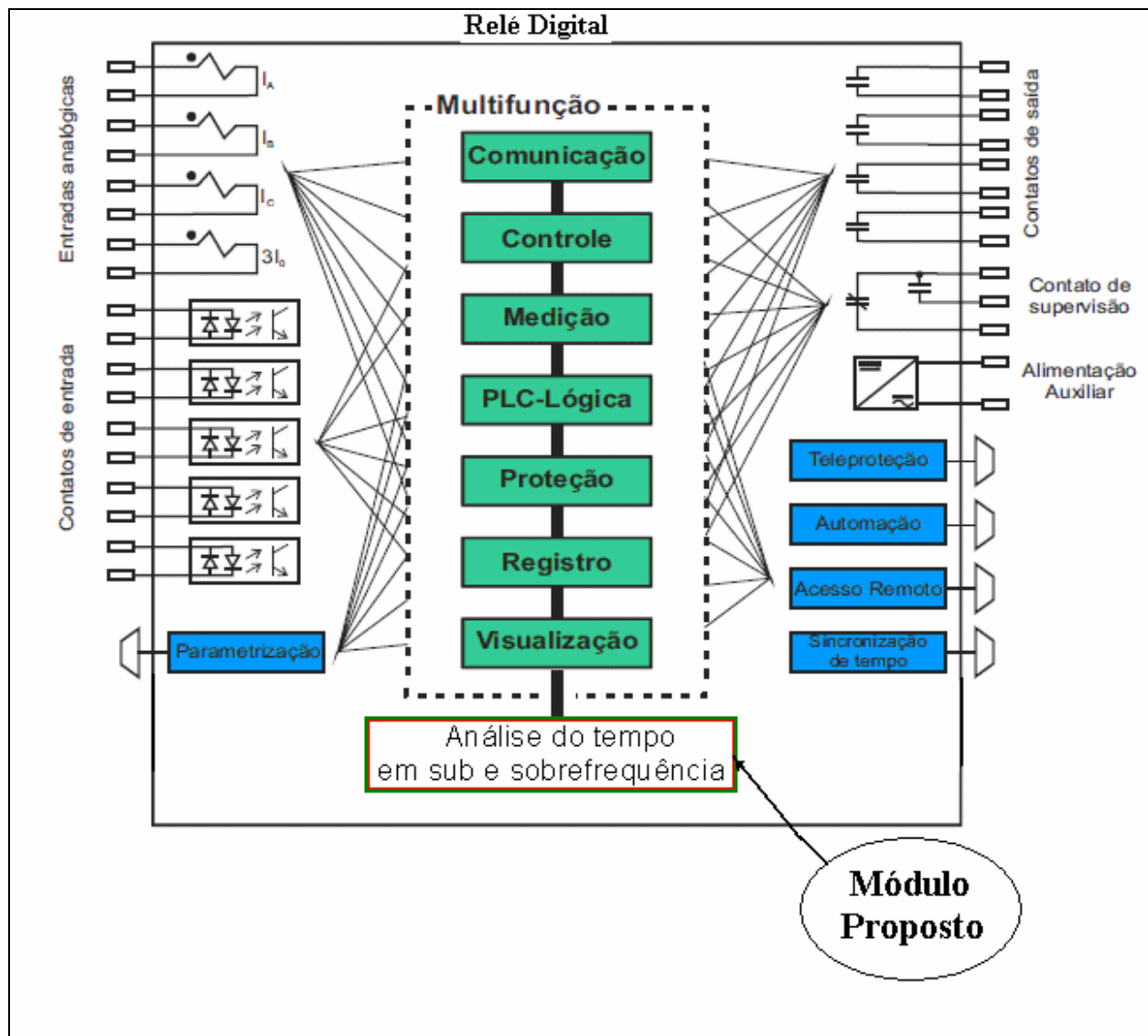


Figura 61: Ilustração do módulo proposto para um relé digital

Para implementação do algoritmo proposto utilizou-se o ambiente de linguagem de programação do software matlab, visto que o sistema elétrico também foi simulado na mesma plataforma. Nota-se que no caso de uma implementação real em relés digitais a linguagem de programação do matlab não seria adequada. Sendo o algoritmo proposto de cunho científico acadêmico, possibilitando futuras implementações reais.

Para o bom entendimento do algoritmo, dividiu-se o mesmo em duas etapas sequenciais:

***1ª etapa - Condicionamento do sinal e análise wavelet AMR***

**Etapa 1.1** Nesta etapa o sinal é recebido, em um vetor contendo os valores referentes a frequência do sistema (pressupondo que este sinal foi disponibilizado por outro modulo de medição de um relé digital ou qualquer outro equipamento de medição de frequência).

**Etapa 1.2** O vetor sinal é dimensionado conforme a frequência de amostragem a qual originou o sinal (esta frequência de amostragem é proveniente da conversão do sinal de frequência da rede, visto que estamos obtendo um sinal discreto através de um sinal analógico, nas simulações utilizou-se uma frequência de amostragem de 1kHz). Quanto maior a frequência de amostragem da medição da frequência, maior será o detalhe referente à resolução da frequência medida. Nesta etapa também padroniza-se o tempo em que o sinal de frequência será analisado. Este tempo de análise é referente a frequência de amostragem do sinal medido. Nos estudos de casos simulados utilizou-se um tempo de simulação de 3 segundos, ou seja, a cada 3 segundos o sinal de frequência é analisado.

**Etapa 1.3** Nesta etapa a técnica de wavelet AMR é aplicada ao sinal, para detecção de um distúrbio.

***A escolha da função base Wavelet***

Como exposto no capítulo 5 existem várias wavelets mães, a escolha de uma base para a análise de fenômenos relacionados com sistemas elétricos de potência deve considerar sua capacidade de distinção entre o nível de frequência do sinal original e o nível de frequência dos distúrbios. Conforme o trabalho descrito em [6], pôde ser observado que aumentando a ordem das Wavelets mães ortogonais, seus comportamentos em suavidade oferecem melhor resolução em frequência. Sendo assim, as Wavelets de Daubechies e Symlet de ordem superior a três e Coiflets de ordem superior a dois oferecem melhores resultados em relação às outras bases. Tal resultado, associado à facilidade de cálculos que a envolve, justifica a ampla utilização da

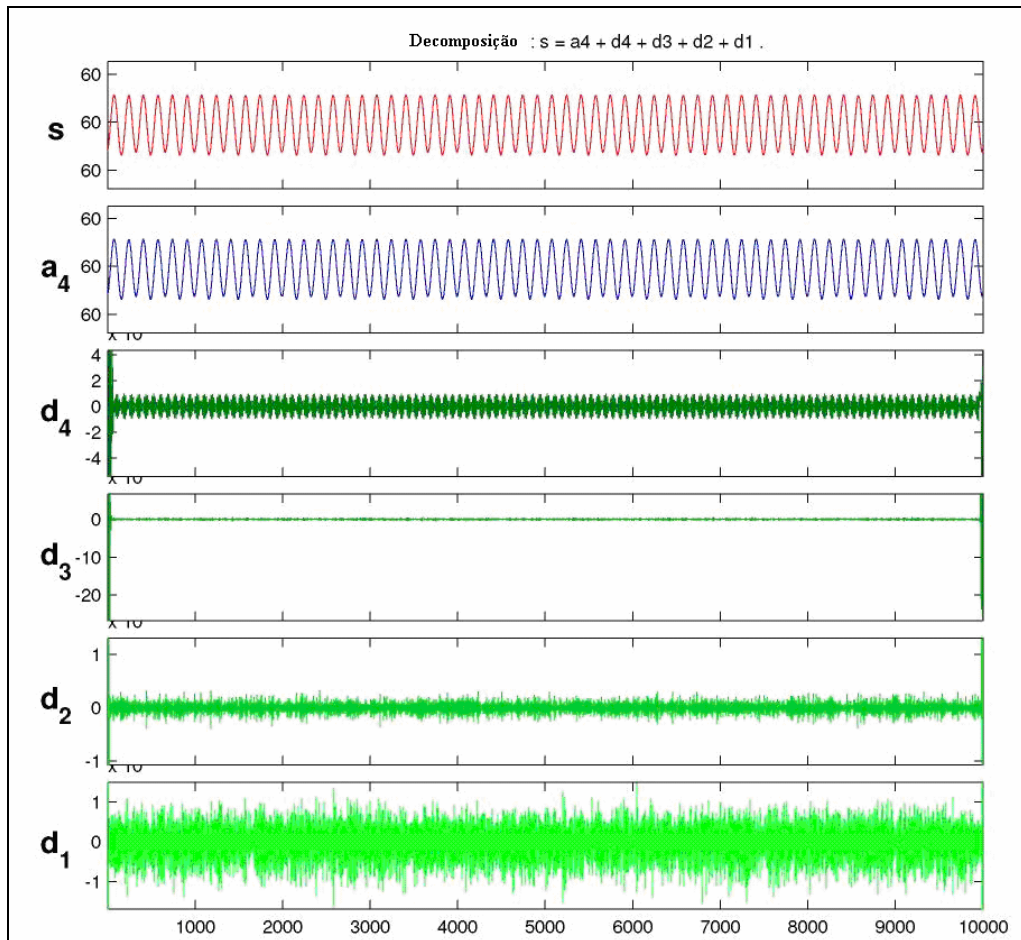
Wavelet de Daubechies de quarta ordem (db4) para análises em SEP. Nesta dissertação a Wavelet mãe db4 de nível 5 foi utilizada para as eventuais análises.

Para a escolha da Wavelet mãe adequada, ou seja, uma função base Wavelet que melhor se adeque à análise dos distúrbios relacionados a um SEP, diversos testes foram realizados com várias bases. Estes testes consistiram em submeter os distúrbios simulados, (curto-circuito, rejeição de carga, elevação de tensão, distorções anormais na frequência) aos vários tipos de wavelets mãe, analisando os níveis de detalhes e aproximações, com o objetivo de obter uma informação capaz de caracterizar da melhor forma o distúrbio. As principais funções utilizadas submetidas a testes foram: Haar, Daubechies (dbN), Symlets (symM,) e Coiflets (coifP), todas estas formando grupos de bases ortogonais submetidas a testes.

Salienta-se que o objetivo da análise foi a de escolher uma função base adequada para o desenvolvimento de um algoritmo capaz de detectar, distúrbios anormais na frequência do SEP, automaticamente. Para tanto, uma função base será adequada quando esta for capaz de diferenciar todos os distúrbios entre o sinal de frequência normal através de características ilustradas nas versões de detalhes em seus níveis de decomposição. Pôde ser observado que aumentando a ordem das Wavelets mães ortogonais, seus comportamentos em suavidade oferecem melhor resolução em frequência. Sendo assim, as Wavelets de Daubechies e Symlet de ordem superior a três e Coiflets de ordem superior a dois oferecem melhores resultados em relação às bases Wavelets ortogonais utilizadas para análise de distúrbios nos estudos de casos deste trabalho.

Aplicação da técnica de AMR, como já descrito no capítulo 5, consiste na decomposição do sinal a ser analisado em dois outros, uma versão que contém os detalhes do sinal e outra atenuada (ou de aproximação), através de filtros passa alta (h1) e passa baixa (h0) 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**

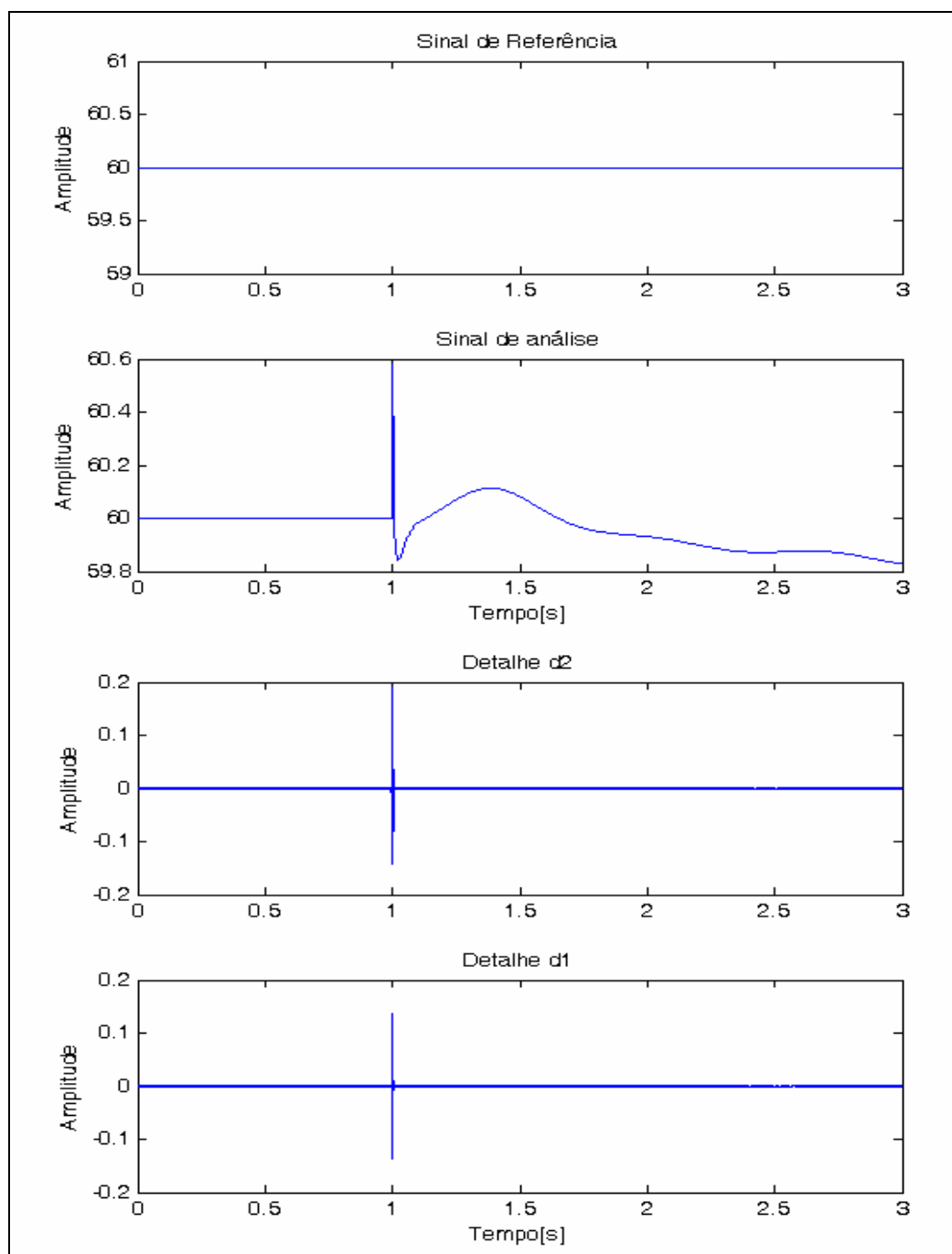
**freqüência diferentes**, estes fornecem informações diretas no domínio da freqüência e do tempo. Espera-se que estes novos sinais decompostos nos indiquem, diretamente, a existência de algum distúrbio e a sua localização no tempo. Tal procedimento de análise é ilustrado na figura 62 para um sinal qualquer de entrada “s”, sendo d1, d2, d3, d4 os detalhes do sinal de entrada provenientes dos filtros.



**Figura 62: Exemplo de decomposição sucessiva de um sinal**

Utilizando-se a técnica descrita, foram analisadas diversas situações de distúrbios, sendo escolhido como **referência o 1º detalhe** pois este se mostrou sensível as variações dos valores de freqüência no entorno da freqüência fundamental, ou seja, quando no sinal de entrada há alguma variação, no 1º detalhe da AMR há variações em escalas de amplitude notória, conforme mostra a figura 63. Outros detalhes foram analisados, mas não se mostraram eficientes nas

características como o detalhe (d1), sendo que com este foi possível detectar o tempo exato da ocorrência dos distúrbios, salienta-se que esta característica é uma grande vantagem da utilização da TW a qual pode ser utilizada em sistemas de proteção e ou análises de SEP.



**Figura 63: Exemplo da AMR no sinal proposto para análise**

Fazendo uso dos comandos da linguagem de programação do matlab, o qual possui comandos específicos para análise wavelet AMR, é, então, obtido o **signal de detalhe D1**. Calcula-se a média do vetor **D1** e compara-se com o detalhe D1 de um sinal de referência (sinal este que não possui variações). Caso a média do sinal seja diferente de zero, compreende-se que há um distúrbio. Então, o algoritmo verifica o tempo em que ocorreu este distúrbio através do sinal D1 analisado. Resumindo, nesta etapa foi detectado o distúrbio e o tempo em que este ocorreu.

### ***2ª etapa - Análise de sub e sobrefrequência do sinal***

Nesta etapa verifica-se, no sinal de entrada em análise, os valores de subfrequência e sobrefrequência e o tempo de permanência deste valor. Através de um algoritmo lógico if else (*se se\_não*) optou-se por dividir em intervalos as subfrequências e as sobrefrequências. Sabe-se que os sistemas elétricos de potência são dotados de relés de frequência de proteção, que possuem um limite mínimo e um limite máximo para a variação de frequência do sistema. Caso a frequência do sistema esteja fora deste padrão pré - determinado o sistema é desligado, por exemplo 2% do valor nominal 58,8 a 61,2 Hz. Com isso o algoritmo verifica os intervalos descritos na tabela 5 abaixo.

**Tabela 5: Intervalos de análises de frequência**

<b>Distúrbio</b>	<b>Região 1</b>	<b>Região 2</b>	<b>Região 3</b>	<b>Região 4</b>
<b>Subfrequência [Hz]</b>	57 a 58	58 a 59	59 a 59,9	-
<b>Sobrefrequência [Hz]</b>	60,1 a 61	61 a 62	62 a 63	63 a 64

Quando o sinal possui alguma variação com valores entre os intervalos descritos acima, o algoritmo verifica o tempo de duração e armazena este tempo, visto que o prejuízo causados nas turbinas por operarem fora da frequência nominal é acumulativo.

Ao final da análise tem-se o tempo estimado em que o sistema esteve operando em subfrequência e sobrefrequência, podendo estes dados serem utilizados em manutenção preditiva da turbina. Observa-se que o tempo gasto para o algoritmo obter as os valores de sub e

sobrefrequência e relativamente baixo, não tendo nenhum esforço brusco computacional, isto é uma grande vantagem para implementação do algoritmo em relés digitais, salienta-se que a TW foi utilizada somente para detectar os distúrbios e não para calcular valores de sub e sobrefrequência, visto que para utilizar a TW para cálculos é necessário um esforço computacional muito maior do que o obtido pelo algoritmo proposto. No anexo A encontra-se o algoritmo utilizado.

### **6.3 Resultados Obtidos Utilizando o Método de Análise Proposto**

Como citado anteriormente criou-se três situações para aplicação do método proposto. Foi considerado nas análises a dinâmica do sinal de frequência no barramento 2 e as variações transitórias de tensão do sistema em estudo. Sabe-se que outras variáveis do sistema como, fluxo de potência ativa e reativa, corrente, o ângulo delta e outros dados são influenciáveis, pois todas estas variáveis fazem parte de um sistema de geração.

Aproximadamente 85 simulações foram realizadas, onde através das mudanças no SEP proposto para simulação, analisou-se a influência perante o algoritmo proposto. Tais mudanças como exemplo são: fluxo de potência, reguladores de tensão, reguladores de velocidade, sistemas estabilizadores de tensão, nível de curto, tipo de modelagem dos geradores, reatância das linhas de transmissão, variação do tempo de duração das faltas, diferentes ângulos de ilhamento entre outros parâmetros,

Como o objetivo desta dissertação é verificar as variações de frequência e assim quantificar o tempo em que o sistema operou em sub e sobrefrequência, optou-se por analisar apenas as variações de tensão e frequência dos casos propostos.

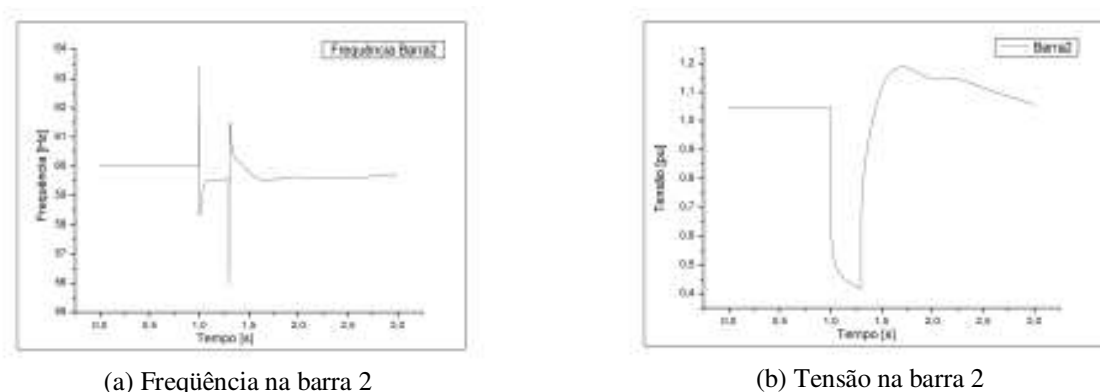
- Caso 1 – Simulação de um curto circuito trifásico localizado na barra 2;
- Caso 2 – Simulação de rejeição de carga pela abertura da linha entre as barras 2 e 4;
- Caso 3 – Simulação de ilhamento do gerador G2 localizado na barra 2.



***Caso 1 - Simulação de um curto circuito trifásico localizado na barra 2***

A figura 64 mostra a resposta da frequência após a ocorrência de um curto-circuito trifásico com duração de 300ms localizado na barra 2. Na sequência tem-se a dinâmica da tensão neste barramento.

De posse dos resultados alcançados, pode-se fazer as seguintes observações em virtude do distúrbio provocado na barra 2:

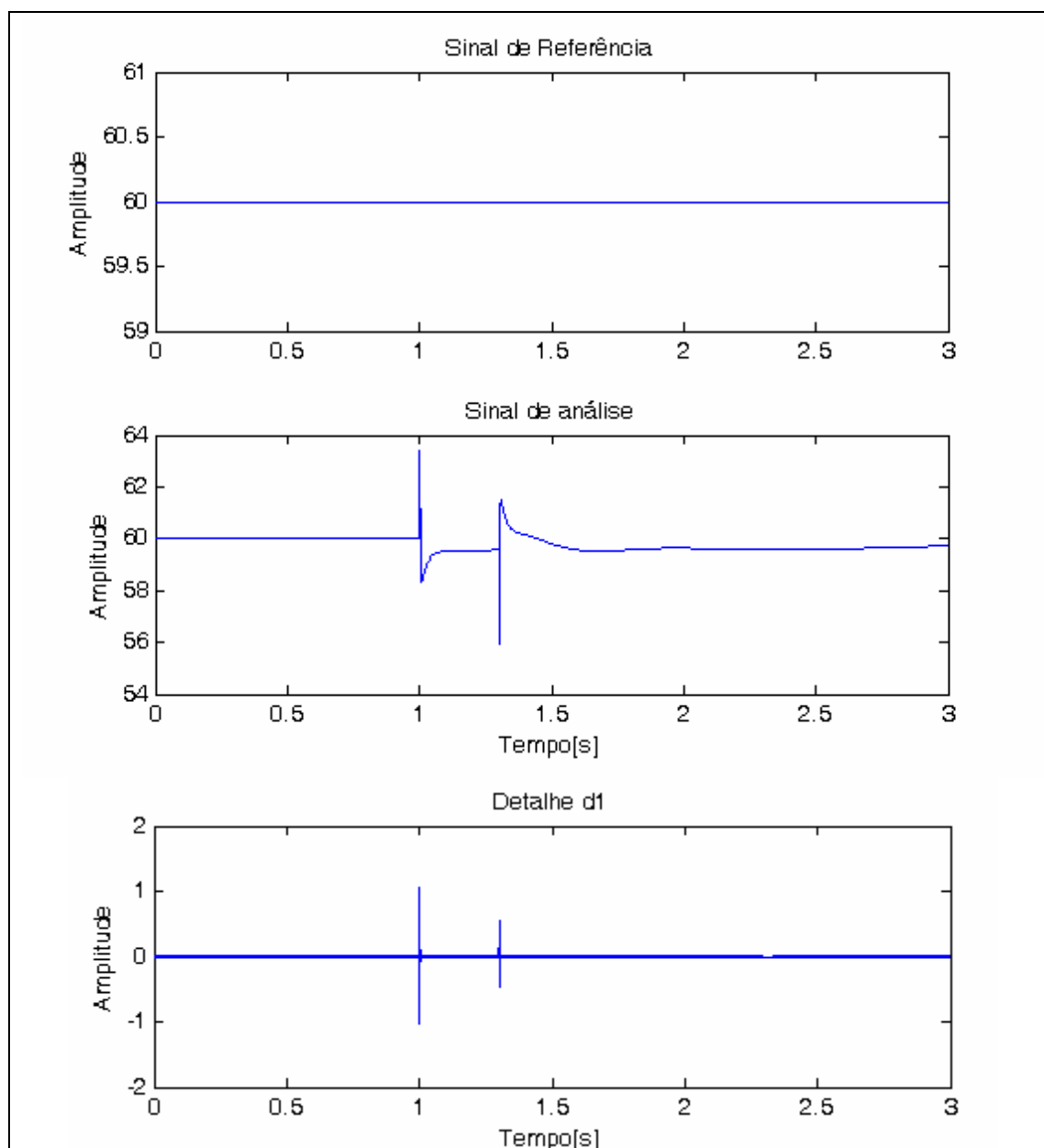


**Figura 64: Resposta do sistema mediante a ocorrência de curto-circuito trifásico**

Com relação ao comportamento da frequência mostrada na figura acima, verifica-se que esta se estabiliza na frequência nominal do sistema (60 Hz) em aproximadamente 3 segundos. Observa-se as variações transitórias onde tem-se a ocorrência de valores mínimos e máximos, de valores picos com amplitudes respectivamente de 56,3 Hz e 63,4 Hz. Os súbitos picos de sobre e subfrequência deve-se ao afundamento de tensão provocado pelo curto, já que no instante inicial há uma redução de carga no gerador. Neste instante o campo girante do gerador perde o sincronismo, a geração sofre um decréscimo (como pode ser visto na figura (b) ) e, com isso, o gerador tende a aumentar a rotação. Este súbito aumento de rotação é refletido na frequência do sistema originando os valores extremos. Quando o curto é extinto tem-se uma dinâmica oposta. Salienta-se que a ação dos reguladores de velocidade do sistema interferem nesta dinâmica. Com o objetivo de estabilizar o sistema, pode-se averiguar que a frequência no gerador da barra 2 se tornou instável durante pouco mais de 2 s.

### *Aplicação da técnica de wavelet AMR*

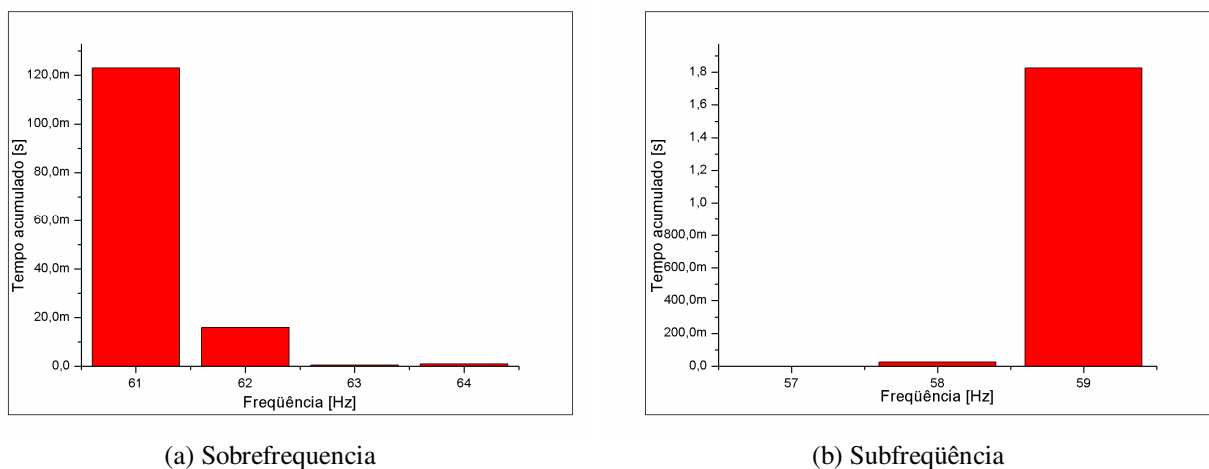
Obtendo-se o vetor sinal de frequência na simulação com o software PSAT, executa-se o algoritmo proposto para a detecção do distúrbio e análise de sub e sobrefrequência. Na figura 65 estão os gráficos referentes a utilização da técnica de wavelet AMR aplicada no vetor sinal de frequência obtido.



**Figura 65: Aplicação da AMR no sinal de frequência, caso 1**

Como referido anteriormente, neste capítulo foi aplicado ao sinal de frequência à técnica de wavelet AMR. Os sinais de aproximação e os detalhes a3, d2, d3 foram desprezados, com o intuito de detectar o distúrbio e o tempo em que o mesmo ocorreu. Utilizou-se o detalhe d1 por possuir uma característica sensível às variações de frequência, observa-se no sinal do detalhe d1 que é evidente o pico de amplitude no início do curto-circuito e um pico de amplitude menor no final do curto. Com esta característica verifica-se que no vetor do detalhe d1, caso haja distúrbios haverá variações no valor médio do vetor d1 e o início do distúrbio é caracterizado por um pico de maior amplitude.

Com a aplicação da segunda etapa do algoritmo têm-se, os valores de sub e sobrefrequência do sinal em análise, elaborou-se um gráfico de barras para evidenciar o tempo em que o sinal esteve em sub e sobrefrequência (*ver figura 66*):

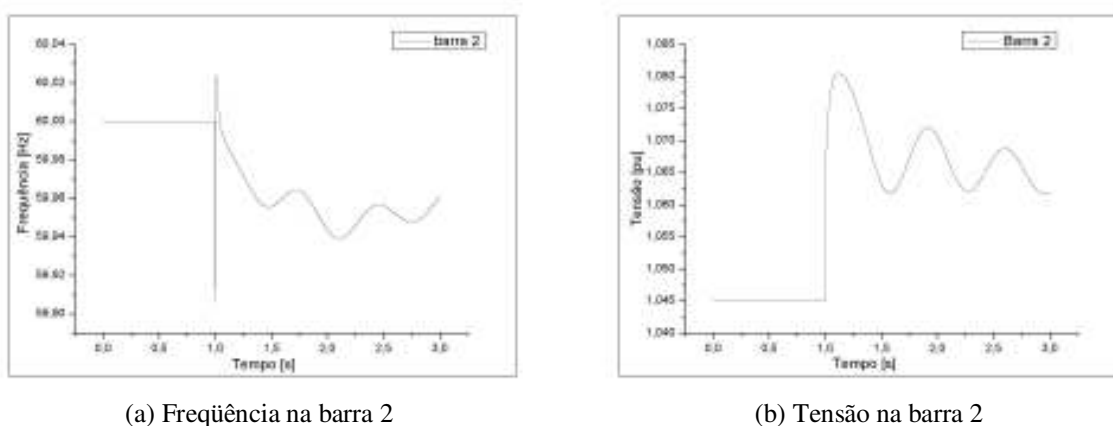


**Figura 66: Frequência acumulada**

Observa-se que para o tempo de simulação de 3 segundos destaca-se uma frequência acumulada em subfrequência na faixa de 59 a 59,9 Hz de 1,825 segundos, e para figura 66 (a), faixa de sobrefrequência entre 60,1 e 61Hz tem-se um tempo de 120 milisegundos. Estes tempos calculados inicialmente parecem ser pequenos, mais vale ressaltar que os danos provocados pela operação de turbinas em faixas limitadas são acumulativo (*como citado no capítulo 4*).

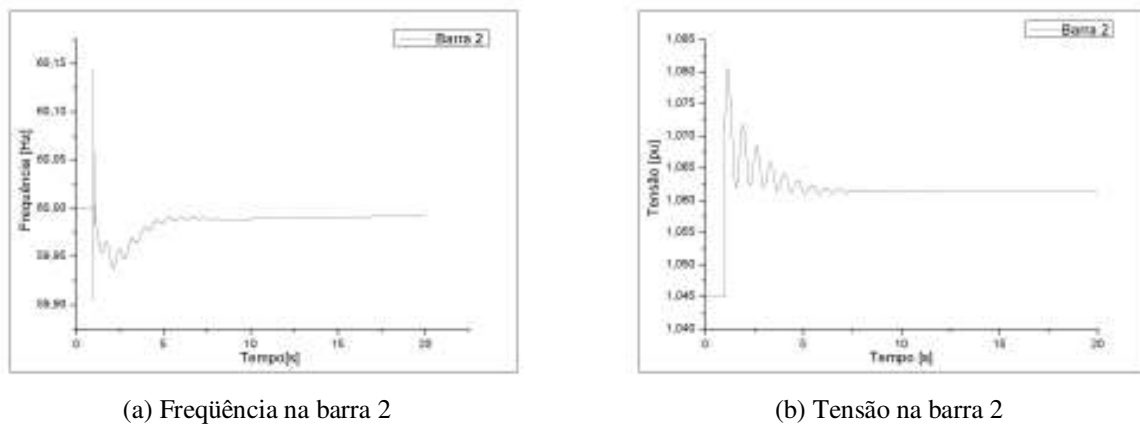
### ***Caso 2 – Simulação de rejeição de carga localizada entre a barra 2 e barra 4***

O caso de uma rejeição de carga pode ser considerado como uma prática a ser utilizada em situações extremas. Sua aplicação sugere uma uniformidade na distribuição da energia elétrica, pois em caso de detecção de sub-freqüência, perturbação na qual o procedimento é aplicado, a rede elétrica vai retornar às condições normais de operação de forma mais rápida e precisa. O princípio básico de funcionamento da rejeição de cargas é a eliminação gradativa de um conjunto de cargas por ordem de prioridade, de modo a permitir a volta da freqüência para patamares admissíveis. Entretanto, diversos parâmetros e critérios devem ser considerados em sua implantação. Neste estudo de caso não se considerou estes critérios, pois a finalidade é a verificação da dinâmica da freqüência no barramento 2 em ocorrência de um rejeição de carga, supondo um ocorrência de um distúrbio em qualquer outro lugar do sistema. Os gráficos de freqüência e tensão são mostrados na figura 67.



**Figura 67: Resposta do sistema mediante uma rejeição de carga**

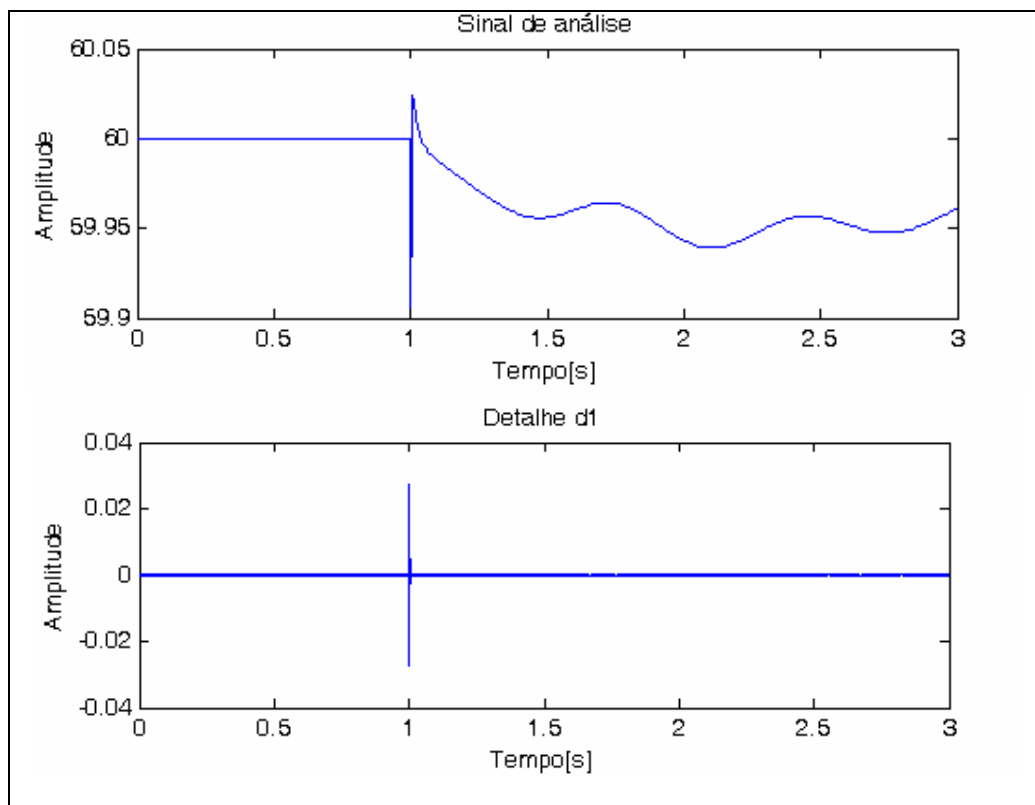
Verifica-se que com a ocorrência da rejeição de carga no instante 1 segundo há uma elevação de tensão no barramento 2. Com relação ao gerador ligado na barra 2 houve uma súbita aceleração no instante da rejeição e com isso na figura (a) tem-se um pequeno pico de freqüência com amplitude de 60.02 Hz . Através da figura 68 (a) nota-se que o sistema ficou instável por aproximadamente 6 segundos.



**Figura 68: Resposta do sistema mediante uma rejeição de carga**

### *Aplicação da técnica de wavelet AMR*

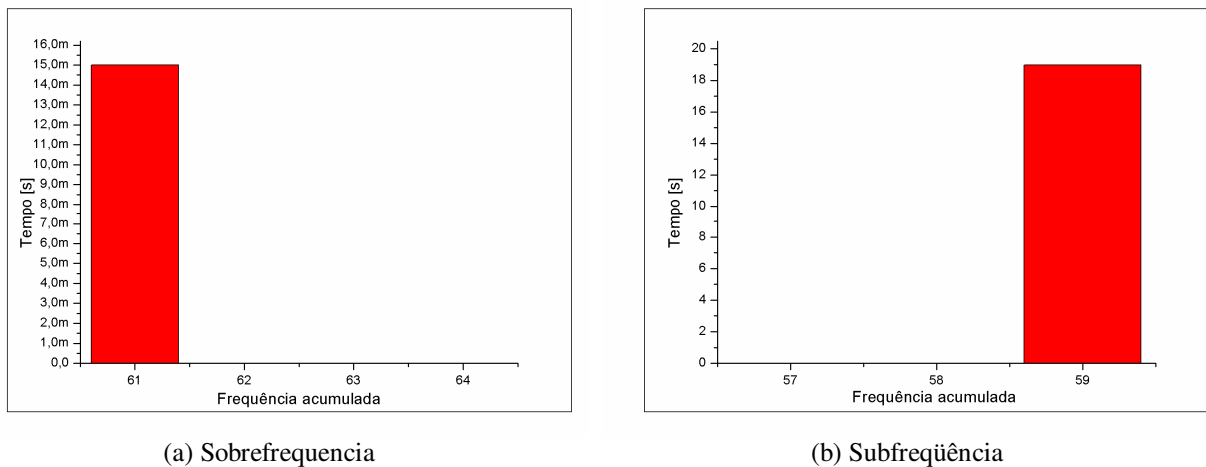
Executa-se o algoritmo proposto para a detecção do distúrbio e análise de sub e sobrefrequência. A figura 69 mostra os gráficos referentes à utilização da técnica de wavelet AMR aplicada no vetor em análise.



**Figura 69: Aplicação da AMR no sinal de frequência, caso 2**

Uma observação a ser feita provém do comportamento das formas de onda nas decomposições em AMR do detalhe d1, sendo que foi possível detectar o instante do tempo da ocorrência da rejeição de carga, 1,0047 segundos. Sendo notório a importância deste dado, visto que em sistemas de proteção o tempo de ocorrência destes distúrbios é utilizado para eventuais ações de proteção.

Com aplicação do algoritmo proposto tem-se os seguintes gráficos representando o tempo de sub e sobrefrequência (*ver figura 70*) .



**Figura 70: Frequência acumulada caso 2**

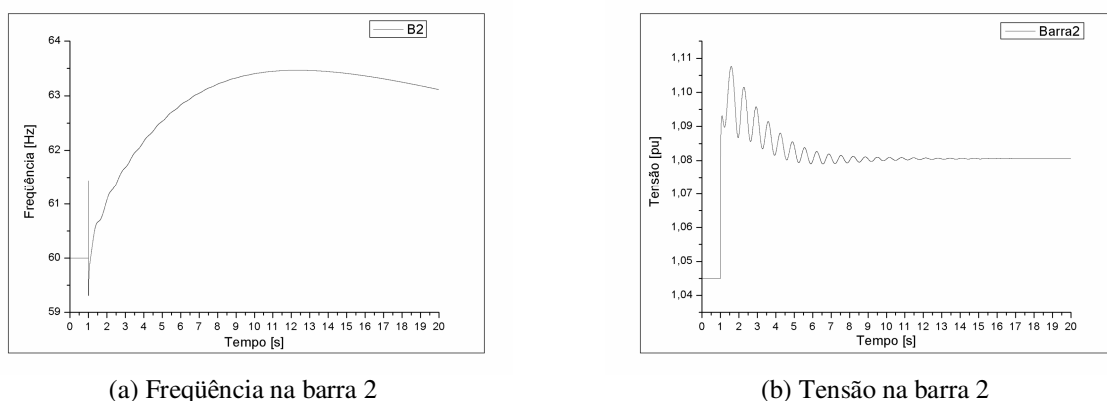
Concluindo este estudo de caso observa-se que para um tempo de simulação de 20 segundos tem-se em destaque uma frequência acumulada em subfrequência na faixa de 59 a 59,9 Hz de 18.9 segundos e para faixa de sobrefrequência entre 60,1 e 61Hz tem-se um tempo de 74,9 micro segundos. Em comparação ao estudo de caso 1, neste caso o sistema ficou operando por mais tempo na faixa de 59 a 50 Hz e com apenas um pico de sobrefrequência de variação.

### ***Caso 3 – Simulação de ilhamento do gerador G2 localizado na barra 2***

No caso de geradores síncronos, embora haja inúmeros esquemas de proteção antiilhamento, até o momento, os relés baseados em medidas de frequência e/ou tensão são reconhecidos pela indústria de energia elétrica como os mais eficazes para detecção de

ilhamento. No caso de relés baseados em medidas de frequência, os principais dispositivos existentes no mercado são os relés de taxa de variação de frequência, os relés de deslocamento de fase e os relés de sub/sobre frequência.

Após a ocorrência do ilhamento e da detecção pelo sistema de proteção e, por conseguinte, a execução da separação entre o sistema industrial e a rede de distribuição, os autoprodutores, obviamente, desejam que as suas plantas industriais continuem operando de forma isolada (ilhada) com o uso de seus geradores. Sob a perspectiva do consumidor autoprodutor, a passagem da operação em paralelo para o modo ilhado demanda que uma série de medidas seja tomada para garantir que a instalação industrial continue operando de forma segura e com qualidade de energia. Neste estudo de caso analisa-se a dinâmica da frequência frente este ilhamento. A figura 71 representa o gráfico da frequência e tensão no instante em que o gerador G2 ficou operando de forma isolada.



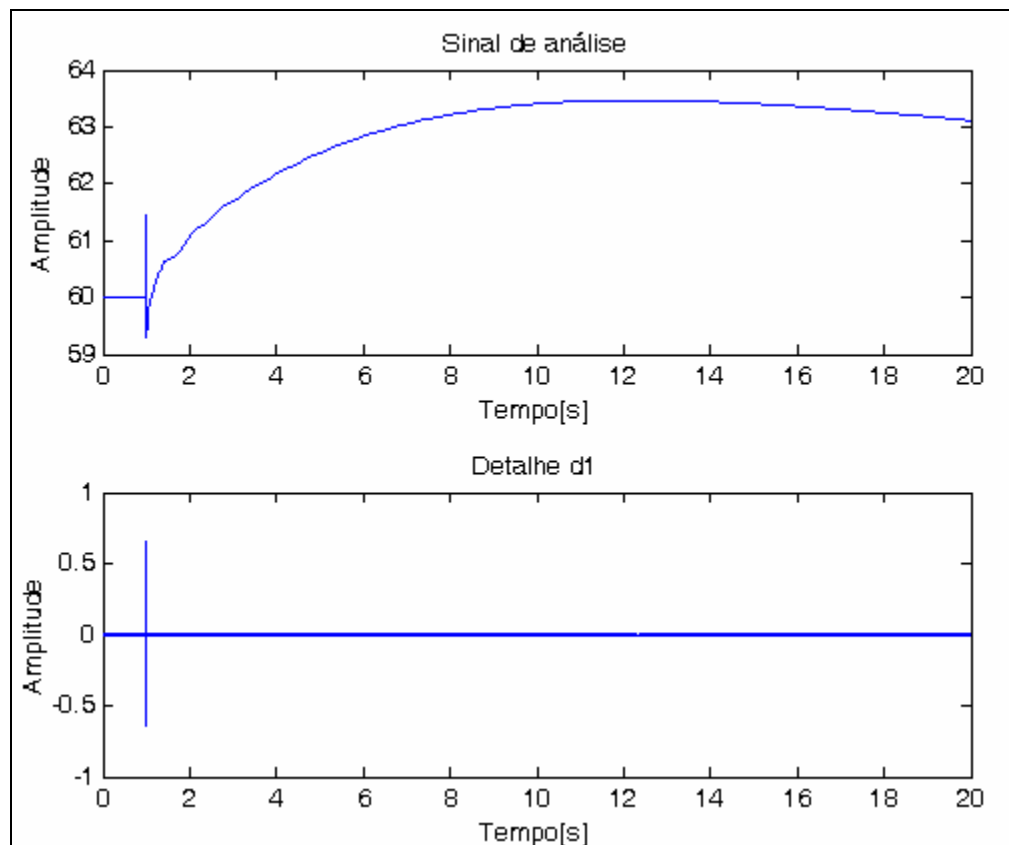
**Figura 71: Resposta do sistema mediante ilhamento do Gerador G2**

Na ocorrência deste ilhamento verifica-se que a frequência na barra 2 é exposta a uma grande variação e com a mesma característica, a tensão sofre grandes oscilações transitórias. Devido ao isolamento e perda de carga, no instante inicial a tensão gerada pelo gerador G2 tem um pequeno pico de tensão de 1,03 a 1,084 pu. Com a ação dos reguladores a tensão, esta entra

em regime permanente em aproximadamente 14 segundos. Nota-se que a frequência possui um tempo de acomodação maior. O funcionamento do sistema de proteção relacionado com a sobrefrequência é de fundamental importância neste caso.

### *Aplicação da técnica de wavelet AMR*

Fazendo uso do algoritmo proposto tem-se a figura 72 com as representativas representações do sinal frequência analisado e o vetor detalhe d1 proveniente das filtragens em AMR. Pelo vetor d1 nota-se o tempo de ocorrência do distúrbio, identificado pelo algoritmo em 1,002 segundos.

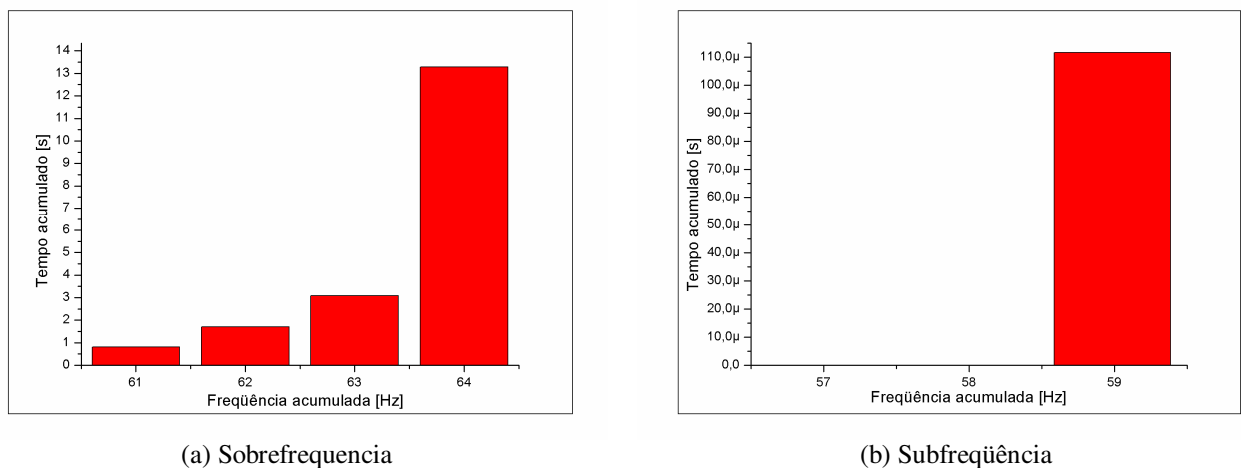


**Figura 72: Aplicação da AMR no sinal de frequência, caso 3**

Neste caso simulado de ilhamento nota-se que a frequência acumulada de sobrefrequência obteve maior destaque, comparado aos outros casos simulados (*caso 1 e caso 2*)



no tempo simulado de 20 segundos o regime permanente da frequência ficou acima da frequência normal. A figura 73 mostra, nos gráficos de barras, o tempo em que o sistema ilhado permaneceu em sobre e subfrequência.



**Figura 73: Frequência acumulada caso 3**

Verifica-se que este caso entre todos já simulados é o mais crítico. Quando o gerador G2 está ligado no sistema, o mesmo fornece energia ativa para a rede. No eventual ilhamento perde-se sua carga e sua frequência gerador tende a subir (sobrefrequencia). No caso simulado de 20 segundos, o algoritmo registrou um tempo de sobrefrequencia entre os valores de 63 a 64 Hz de 13,4 segundos, entre os valores de frequência de 62 a 63 Hz, 3,2 segundo. A frequência entre 61 a 62Hz acusou-se um tempo acumulado de 1,6 segundos e para o intervalo de frequência entre 60,1 a 61 Hz um tempo acumulado de 0,89 segundos. Para subfrequência entre 59 a 59,9 Hz obteve-se um tempo de 111 microsegundos.

É oportuno comentar que durante a operação em paralelo com o sistema elétrico interligado, a frequência e a magnitude das tensões nodais das instalações industriais são mantidas dentro de faixas restritas de variações admissíveis, principalmente devido aos controles dos equipamentos instalados pelas concessionárias de energia elétrica. Com o intuito de evitar interações prejudiciais entre os controles das concessionárias e os controles associados aos

geradores de médio porte presentes nas instalações industriais, tipicamente, os controladores desses geradores são ajustados de forma a não atuarem diretamente no controle de frequência e magnitude de tensão. Contudo, após a ocorrência de ilhamentos, o controle da frequência e da magnitude das tensões nas barras da instalação industrial deve ser realizado, respectivamente, pelo regulador de velocidade e pelo sistema de excitação dos geradores próprios. Assim, pode-se observar que geralmente se faz necessário realizar alterações dos modos de controle do regulador de velocidade e do sistema de excitação após a ocorrência do ilhamento [61].

### 6.4 Considerações Finais

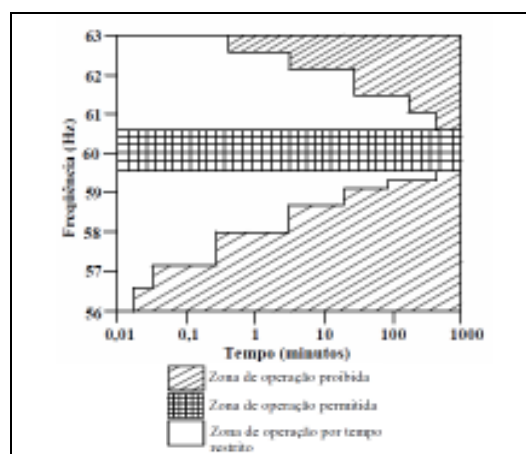
Apresentou-se neste capítulo os resultados dos casos simulados, utilizando o sistema elétrico apresentado na seção 6.2.1 e o algoritmo proposto. Pôde-se verificar a eficiência do método uma vez que os casos simulados compreendem os principais tipos de distúrbios causadores de instabilidade.

Utilizando a técnica de Wavelet AMR foi possível detectar o tempo em que ocorreu o distúrbio. Este mostrou-se satisfatório na obtenção da estimativa do tempo acumulado em que o sistema permaneceu em subfrequência e sobrefrequência. Uma especial atenção se deve ao caso de ilhamento onde o gerador que saiu do sistema perde o sincronismo com a frequência da rede, sendo necessário uma lógica de proteção rápida, pois o seu sistema elétrico tende a se estabilizar fora da frequência nominal.

Um aspecto importante relacionado com o tratamento dos valores medidos é a formulação de dados estatísticos para uma eventual manutenção preditiva das palhetas das turbinas. Com um banco de dados dos tempos obtidos de sub e sobrefrequência é possível confrontá-los com as informações de fabricação das turbinas, e assim prever de forma programada uma manutenção na turbina.

Na figura 74 tem-se os dados de frequência e tempo máximo de operação de uma turbina que foram retirados da referência [61], os quais são aproximados (*não exatos*).

Como exemplo do caso 3 simulado, onde se obteve um tempo de sobrefrequência entre os valores de 63 a 64 Hz de 13,4 segundos, entre os valores frequência de 62 a 63 Hz, 3,2 segundo, frequência entre 61 a 62 Hz um tempo acumulado de 1,6 segundos e para o intervalo de frequência entre 60,1 a 61 Hz um tempo acumulado de 0,89 segundo. Confrontando estes dados com aqueles da tabela do fabricante da turbina (*ver figura 74*) tem-se uma previsão programada para manutenção neste equipamento. Visto que este tempo de sub e sobrefrequência são acumulativos, ou seja, no estudo de caso 3 onde ocorreu uma sobrefrequência na faixa de 63 a 64 Hz com duração de 13,4 segundos, observa-se pela tabela 6, que o tempo permitido para operação nesta faixa é de aproximadamente 30s. Portanto, o tempo restante para operação nesta faixa de frequência é de  $(30s - 13,4s = 16,6s)$ .



**Figura 74: Tempo limite versus frequência para uma turbina a vapor [61]**

Tabela 6: Tempo limite versus frequência para uma turbina a vapor

Frequência [Hz]	Tempo [m]	Tempo [s]
56 a 56,7	0,03	1,8
56,7 a 57,2	0,05	3
57,2 a 58	0,5	30
58 a 58,8	5	300
58,8 a 59,1	20	1200
59,1 a 59,4	85	5100
59,4 a 59,6	600	36000
59,6 a 60,6	infinito	infinito
60,6 a 61	500	30000
61 a 61,5	150	9000
61,5 a 62	50	3000
62 a 62,5	5	300
62,5 a 63	0,5	30

O capítulo seguinte apresenta as conclusões gerais sobre o trabalho realizado nesta dissertação e propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo VII

### Conclusões Finais

#### 7.1 – Conclusão

Este trabalho desenvolveu um algoritmo para análise da frequência em sistemas de Geração Distribuída com o intuito de obter um banco de dados com informações do tempo em que o sistema esteve operando em subfrequência e sobrefrequência. Com estes dados é proposta uma manutenção preditiva para o sistema de geração dotado de turbinas a vapor. Após a implementação do algoritmo para os casos em estudo, pode-se dizer que os resultados obtidos até o presente momento foram satisfatórios, sendo o objetivo proposto em cada aplicação atingido de forma plena.

Através dos resultados obtidos com as simulações, verifica-se que para o caso de ilhamento (caso 3), o sistema ilhado deve ter um sistema de proteção o qual possa identificar rapidamente esta ocorrência, pois a frequência do sistema neste caso não se estabiliza em tempo satisfatório, do ponto de vista de operação da turbina.

Ressalta-se que a formulação de dados estatísticos para uma eventual manutenção preditiva das palhetas das turbinas, depende de informações construtivas, fornecidas pelos fabricantes destas. Assim, com um banco de dados dos períodos de tempos em sub e sobrefrequência, é possível confrontar estes valores com as informações provenientes da fabricação das turbinas, e assim prever de forma programada a manutenção.

As contribuições desta dissertação podem ser assim evidenciadas:

- **Sistemas de Geração Distribuída:** Como contribuição do capítulo 1 disponibilizou através da pesquisa realizada conceitos relevantes sobre GD os quais colaboraram na compreensão de que, o crescimento dos sistemas de GD não deve objetivar somente

melhores custos de produção, diminuição dos impactos ambientais ou simplesmente para o comércio da energia, mas, juntamente com este crescimento, deve-se promover o incentivo a pesquisas e projetos que possam ter como objetivo a estabilidade, confiabilidade e a qualidade do sistemas elétricos de potência.

- ***Qualidade de Energia:*** Através de uma exposição bibliográfica sobre o assunto o capítulo contribuiu para formação conceitual de QEE e mostrou a necessidade de monitoração e formalização de padrões que indiquem a QEE.
- ***A influência de Variações de Frequência no Sistema Elétrico:*** Como a descrição do tema proposto o capítulo expôs de forma sucinta e clara os problemas provenientes de subfrequência e sobrefrequência no âmbito de GD. Com isso surgiu a motivação e formulou-se uma justificativa para esta dissertação.
- ***Fundamentos básicos sobre Wavelet:*** A eficiência da Transformada Wavelet para análise de sinais está diretamente relacionada com o comportamento das funções bases Wavelets. A Wavelet mãe utilizada no decorrer deste trabalho foi a db4, descrito por Ingrid Daubechies e já consagrada em aplicações por apresentar bons resultados. Esta foi explorada na técnica de AMR, com sucesso, uma vez que oferece bons resultados de detecção de distúrbios transitórios no sistema de potência. Sendo assim este trabalho contribuiu de forma a contabilizar como outros, em aplicações da TW na área de sistema elétricos de potência, fortalecendo a eficiência da utilização desta inovadora técnica.
- ***Fundamentos e Implementação do Algoritmo Proposto:*** Fazendo uso de um sistema teste foi possível analisar, entre os estudos de casos propostos, a dinâmica da tensão e principalmente a frequência do sistema elétrico, observando o tempo de sub e sobrefrequência. Estas análises não só possibilitaram atingir o objetivo proposto, como já citado, mas também possibilitou expor a necessidade de estudos aprofundados na

questão de ilhamento de sistemas de GD. Na bibliografia estudada, há poucos resultados teóricos avaliando a manutenção do sincronismo e monitoração entre as máquinas, as margens de carregamento, relés de proteção entre outros, que contemplem esta nova situação e também os resultados práticos ainda não foram totalmente abordados, demonstrado que este assunto representa um campo vasto para pesquisas. Observa-se que os problemas estudados e seus resultados podem ser apresentados como estudos de casos, a fim de enriquecer com exemplos, as disciplinas de proteção e dinâmica de sistemas elétricos de potência, podendo, portanto, este trabalho ser tratado de forma didática para a construção de conhecimento.

A pesquisa apresentada aqui nesta dissertação procurou contribuir com o estudo teórico e espera-se que, com as divulgações dos resultados deste trabalho, os métodos desenvolvidos possam colaborar para compor futuros trabalhos e principalmente para sua implementação real em um sistema elétrico de potência.

## **7.2 – Sugestões para trabalhos futuros**

Objetivando o desenvolvimento continuado desta pesquisa, os estudos dos seguintes tópicos são sugeridos para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Submissão do algoritmo proposto a testes com dados reais.
- Implementação física (real) de algoritmos utilizando a TW em relés digitais para fins de monitoramento e proteção.
- A utilização da TW para análise transitória de dinâmica de sistemas elétricos de potência.
- Análise dos impactos provenientes de ilhamentos em sistemas de GD compostos por geradores síncronos e assíncronos.
- Programar o algoritmo proposto em linguagem C, e comparar o desempenho com a linguagem do matlab.

## Referências Bibliográficas

- [1] ALMEIDA, M. A. D. de. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. Rio Grande do Norte: Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFRN 2005. Apostila
- [2] ANDRADE, M. **Uma variável já estratégica para o desenvolvimento da economia**. 2008. Canal Energia/Mercado livre. Disponível em <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=66898>> Acessado em 15/06/2008.
- [3] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução N° 024**. de janeiro de 2000. Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras p.15, Jan. 2000.
- [4] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: **Resolução N° 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
- [5] ANGRISANI, L.; DAPONTE, P.; D'APUZZO, M.; TESTA, A. A. **Measurement Method Based on the Wavelet Transform for Power Quality Analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery. 1998.
- [6] ARRUDA, E. F. **Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet**. 2003. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [7] BARBOSA, D. **Estimação da Frequência em Sistemas Elétricos de Potência através de Filtragem Adaptativa**. 2007. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [8] BARKER P. **Overvoltage Considerations in Applying Distributed Resources on Power Systems**. Reprinted from IEEE PES Summer Power Meeting. 2002.
- [9] BOLJEVIC, S.; CONLON, M.F.; BARRY, N. **Impact of high penetration of CHP generation on urban distribution networks**. Universities Power Engineering Conference, 2008.
- [10] 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 autorização de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em <<http://www.presidencia.gov/legislacao>> Acesso em: 10/04/2008
- [11] BRIGHENTI, C. R. F. **Integração do Cogenerador de Energia do Setor Sucroalcooleiro com o Sistema Elétrico**. 2003. Dissertação de Mestrado – Programa Interinidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003
- [12] BRITO M. P. **Geração Distribuída: Critérios e Impactos na Rede Elétrica**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- [13] MASON, C. R. **The Art & Science of Protective Relaying**. General Electric. 2005
- [14] CHAARI, O.; MEUNIER, M.; BROUAYE, F. **Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying**. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1996
- [15] 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.



- [16] CHUI, C. K. **An introduction to wavelets.** Academic Press. 1992.
- [17] COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes.** 1. ed. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007
- [18] CROSSLEY, P.A.; MCLAREN, P.G. **Distance Protection Based on Travelling Waves.** Power Apparatus and Systems, IEEE transactions on, 1983
- [19] DASH, P.K.; PRADHAN, A.K.; PANDA, G. **Frequency Estimation of distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filter.** Power Delivery IEEE Transactions on, 1999
- [20] Daubechies, I. **Where Do Wavelets Come From: – A Personal Point of View.** Proceedings of the IEEE, 1996
- [21] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. 2<sup>a</sup>ed . **Electrical Power System Quality.** New York, McGraw-Hill. 1996
- [22] McTague, D. **Embedded generation: ESB distribution network considerations.** Embedded Generation on Distribution Networks IEEE Colloquium on the Impact of , 1996
- [23] Franco, E. **Qualidade de Energia.** Engecomp - Tecnologia em Automação e Controle Ltda. Artigo, Disponível em <[http://www.engcomp.com.br/pow\\_qual.htm](http://www.engcomp.com.br/pow_qual.htm)>Acessado em 1/11/2008
- [24] ESCOBAR, A.H.; ROMERO, R.A.; GALLEGOS, R.A., **Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty In Generation And Demand.** Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES , 2008
- [25] FERNANDES, D. E. B. **Uma metodologia de gerenciamento da qualidade da energia elétrica.** –1999.124f. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.Belo Horizonte, MG 1999
- [26] GONÇALVES, L. F. **Contribuições Para O Estudo Teórico e Experimental de Sistemas De Geração Distribuída,** 2004. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004
- [27] GUIMARÃES, G. C. **Modelagem de um Sistema Elétrico Para Estudo De Estabilidade E Rejeição De Carga.**Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos II . Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2003. Apostila
- [28] IEEE. **IEEE Recommended Practice For Emergency And Standby Power Systems For Industrial And Commercial Applications.** IEEE Std 446-1995. USA, 1996
- [29] IEEE. **Committee 22 on Power Quality Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality.** IEEE Std 1159 - 1995, USA, 1995.
- [30] INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética.**Geração Distribuída.** FT do Fórum de Cogeração e INEE. Documento resumo sobre Geração Distribuída no Brasil. Julho. 2001. Disponível em <[http://www.inee.org.br/down\\_loads%5Cforum%5CNotas%20sobre%20GD.pdf](http://www.inee.org.br/down_loads%5Cforum%5CNotas%20sobre%20GD.pdf)> Acessado em 15/06/2008.
- [31] KAISER, G. **A Friendly Guide to Wavelets.** Birkhäuser, 1994.
- [32] KIM, C. H.; AGGARWAL, R. **Wavelet transforms in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transforms.** Power Engineering Journal, 2000.

- [33] KIM, C. H.; AGGARWAL, R. **Wavelet tranforms in power systems: Part 2 General introduction to the wavelet tranforms**. Power Engineering Journal, 2000.
- [34] MAGNAGO, F.H.; ABUR, A., **Fault location using wavelets**, Power Delivery, IEEE Transactions on ,1998
- [35] MALLAT, S. **A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation**. IEEE Transactions on FAMI, 1989.
- [36] 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.**Manual**
- [37] MARQUES, F. A. S; MORÁN, J. A; ABREU, L; FREITAS, W. **Impactos da Expansão da Geração Distribuída nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**, AGRENER 2004, UNICAMP, Campinas, 2004
- [38] McTAGUE, D., **Embedded generation: ESB distribution network considerations**, Embedded Generation on Distribution Networks, IEE Colloquium on the Impact of , 1996
- [39] MEGAHEDE, A.I.; RAMADAN, A.; ELMAHDY, W. **Power transformer differential relay using wavelet transform energies**. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE 2008
- [40] MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. M. **Wavelet Toolbox: User's Guide**. Natick, MA: The MathWorks, 2008.
- [41] MOTA J. B. JÚNIOR; LEPELEIRE, R.; LEITE, A.G. **Considerações Sobre a Proteção Digital de Geradores - A Experiência da Itaipu Binacional**, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - IX SNPTEE, Curitiba. 2008
- [42] MOTA, W. S. **Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência**. Campina Grande, PB. EPGRAF. 2006
- [43] OLIVEIRA, J. C.; GUIMARÃES, G. C. ; MORAES, A. J.de. **Análise dos efeitos da variação de frequência nos parâmetros de sistemas elétricos e suas conseqüências em estudos de estabilidade transitória**. Ciência & Engenharia, Universidade Federal de Uberlândia, 1994.
- [44] ONS. **Norma de Operação – Controle da Geração em Operação Normal**, 2 edn, Submódulo 10.8, Operador Nacional do Sistema, 2001
- [45] PAVANI, A. P. G. **Métodos Analíticos para Análise de Geradores de Indução Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Tese de Doutorado - UNICAMP. Campinas, 2008.
- [46] PEREIRA, J. C.; BINDEWALD, H.; ROSA E.; TORRES L. A. M. **Desenvolvimento De Uma Metodologia Para Avaliação de Falha em Operação de Palhetas de uma Turbina a Vapor**. Universidade Federal de Santa Catarina e Tractebel Energia S.A, 2003
- [47] PINHEIRO, G.; NUNES, V. M.; RENDEIRO, G.; PINHO, T. J. **Qualidade de Energia na Geração Distribuída - Caso de Usina a Biomassa**, Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, IV SBQEE, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2001
- [48] PRADHAN, A. K.; ROUTRAY, A.; BASAK, A. **Power System Frequency Estimation Using Least Mean Square Technique**, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005
- [49] QUEZADA, M.V.H.; FABBRI, A.; GOMEZ S.T.; RIVIERABBAD, J. **Assessment of the Cost Associated With Wind Generation Prediction Errors in a Liberalized Electricity Market**, Power Systems, IEEE Transactions on. 2005

- [50] QUEZADA, V.H.M.; ABBAD, J.R.; ROMAN, T.G.S **Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation**, Power Systems, IEEE Transactions on 2006
- [51] REIMERT D. **Protective Relaying For Power Generation Systems**, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2006
- [52] RIBEIRO, P., FERREIRA, F., MEDEIROS, F. **Geração Distribuída e Impacto na Qualidade de Energia**, Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia, VI SBQEE Belém - Para , 2005.
- [53] RICCIOTTI, A. C. D. **Utilização de wavelets no processamento de sinais EMG**. Dissertação de mestrado – Pós-graduação Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2006
- [54] RUJLAN L. **Next Generation PON in Emerging Networks**. Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, 2008
- [55] SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M.; HOFMANN, P. **Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996
- [56] SEVERINO, M. M. **Avaliação Técnica - Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia**, 2008. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Publicação PPGENE.TD-027/08, 2008.
- [57] SILVA, M. B. **Supressão de Ruído de Rolamento Superficial Utilizando Wavelets** 2005, Tese de doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro - PUC-RIO 2005
- [58] SILVEIRA P. M.; SEARA R.; ZÜRN H. H. Seleção de Fases em Relés Numéricos de Linha de Transmissão Baseada em Análise Multi-Resolução e Transformada Wavelet – Revista Controle e Automação 2002.
- [59] SINUS. **Qualidade de Energia**. Departamento de Eletrônica Industrial Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. Disponível em <[http://www.sinus.ccg.pt/index.php?option=com\\_content&task=view&id=25&Itemid=46](http://www.sinus.ccg.pt/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=46)> Acessado em 15/10/2008
- [60] THORNLEY, V.; HILL, J.; LANG, P.; REID, D., **Active Network Management Of Voltage Leading To Increased Generation And Improved Network Utilisation**, SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar, 2008
- [61] TRINDADE, F. C. L. **Análise dos Sistemas de Proteção e Controle de Sistemas Industriais com Geradores Síncronos Após a Ocorrência de Ilhamentos**. Dissertação de mestrado - UNICAMP. Campinas, 2009.
- [62] 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, da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005
- [63] VARGAS, E. T., **A Proposal of a Digital Frequency Relay Based on Genetic Algorithms**. São Carlos, 2005. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005
- [64] Vilar, C.; Amaris, H.; Usaola, J. **A Frequency Domain Approach to Wind Turbines for Flicker Analysis**. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003
- [65] FILHO, O. Delmont. **Utilização da Transformada Wavelet para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica**. Dissertação de mestrado - Engenharia Elétrica, Universidade de São Carlos, São Paulo, 2003

- [66] Lora, E.E. S; Nascimento, M. A. R. **Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação**, Interciência, 2004
- [67] SALLES, M. B. C. **Análise do desempenho dinâmico de geradores eólicos conectados em redes de distribuição de energia elétrica**. 2004 Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação 2004
- [68] **IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants** Revision of C37.106-1987 Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, USA;

## Anexo A

### *Algoritmo Proposto*

```
%JUDI = Nome do Algoritmo Para detectar o disturbio (wavelet)

y1=input('Entre com o Vetor Sinal de Referência ');
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(2,1,2);plot(ty2,y2);title('Sinal de
análise');xlabel('Tempo[s]');ylabel('Amplitude');

wavemae='db4';
[c,l] = wavedec(sinal,3,wavemae);

ca3 = appcoef(c,l,wavemae,3);
cd3 = detcoef(c,l,3);
cd2 = detcoef(c,l,2);
cd1 = detcoef(c,l,1);

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,1);

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');

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

tmad1 = length(d1);
%ts=20; % Tempo de simulação do sinal no simulink
td1=0:(ts/(tmad1 - 1)):ts;
td1=td1';

if meand1>0

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

end

tamanho = size(d1);

for i=1:tamanho
    [M,I] = max(d1);
    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

```

```

end;
variacao=variacao';
variacao=sort(variacao);
%plot(variacao);
posicao=posicao';
disp('Tempos de PICO ')
tempodomaxpico=td1(posicao(1))
tempodomaxpico2=td1(posicao(2))

%ATOS = Nome do Algoritmo Para Quantificar sub e sobrefrequência

format long;
tamanho = size(sinal);
sinal1=sinal;
r=0;
b=0;
for u=1:tamanho;
    [M,I] = max(sinal1);
    if M>60.01;
        r=r+1;
        variM(r)=M;
        sinal1(I)=60;

    else
        [m,I] = min(sinal1);
        if m<60;
            b=b+1;
            varim(b)=m;
            sinal1(I)=60;
        end
    end
end;
variM=variM';
variM=sort(variM);
% figure(1);
%bar(variM);
varim=varim';
varim=sort(varim);
% figure(2);
% bar(varim);
tc=ts/(length(sinal));
tempo6061=0;
tempo6162=0;
tempo6263=0;
tempo6364=0;
tempo5758=0;
tempo5859=0;
tempo5960=0;

outrotempo=0;

q=length(variM);

```

```

    k=0;
for k=1:q
    z=varim(k);
    if (z>60.1) && (z <61);
        tempo6061=tc+tempo6061;
    elseif (z >=61) && (z <62);
        tempo6162=tc+tempo6162;
    elseif (z >=62) && (z <63);
        tempo6263=tc+tempo6263;
    else (z >=63) && (z <64);
        tempo6364=tc+tempo6364;

    end

end

w=length(varim);
%subfrequencia
for k=1:w ;
    z=varim(k);
    if (z>=57) && (z <58);
        tempo5758=tc+tempo5758;
    elseif (z>=58) && (z <59);
        tempo5859=tc+tempo5859;
    else (z>=59) && (z<59.9);
        tempo5960=tc+tempo5960;
    end
end
%otherwise
%outrotempo=tc + outrotempo

sobrefreq(1,1)=61;
sobrefreq(2,1)=62;
sobrefreq(3,1)=63;
sobrefreq(4,1)=64;
sobrefreq(1,2)=tempo6061;
sobrefreq(2,2)=tempo6162;
sobrefreq(3,2)=tempo6263;
sobrefreq(4,2)=tempo6364;

subfreq(1,1)=57;
subfreq(2,1)=58;
subfreq(3,1)=59;
subfreq(1,2)=tempo5758;
subfreq(2,2)=tempo5859;
subfreq(3,2)=tempo5960;

subx=(subfreq(:,2));
suby=[57; 58; 59];

```



```
sobx=(sobrefreq(:,2));  
soby=[01; 62; 63 ;64];
```

```
subfreq  
sobrefreq
```

```
tempo5758
```

```
tempo5859
```

```
tempo5960
```

```
tempo6061
```

```
tempo6162
```

```
tempo6263
```

```
tempo6364
```

## Anexo B

### *Dados do Software PSAT*

Abaixo a descrição sucinta dos principais componentes utilizados do software PSAT. O manual contendo todos os dados do software esta disponível no site <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/psat.htm>.

### MODELOS DOS EQUIPAMENTOS

Abaixo é descrito os modelos dos equipamentos utilizados na composição do sistema teste estudado.

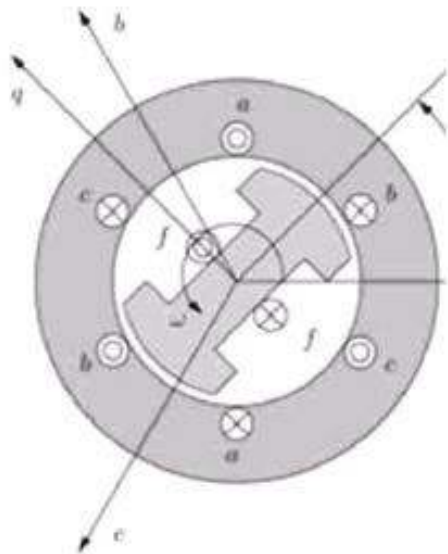
#### Máquina Síncrona

O PSAT utiliza o modelo de Park-Concordia para representar as equações das máquinas síncronas, cujo esquema é retratado na Figura 1. Vários níveis de simplificação são aplicados, desde as equações de oscilação clássicas até um modelo de oitava ordem, que considera os efeitos de saturação magnética. A Figura 2 representa o diagrama de blocos dos eixos d e q dos fluxos do estator para o modelo de sexta ordem enquanto que a Figura 3 ilustra a característica de saturação do campo de máquinas síncronas. A relação entre os fasores da rede e a tensão da máquina são dadas por:

$$\begin{aligned}v_d &= V \sin(\delta - \theta) \\v_q &= V \cos(\delta - \theta)\end{aligned}$$

Enquanto que as injeções de potência são expressas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}P &= v_d i_d + v_q i_q \\Q &= v_q i_d - v_d i_q\end{aligned}$$



**Figura 1 – Esquema de uma máquina síncrona trifásica**

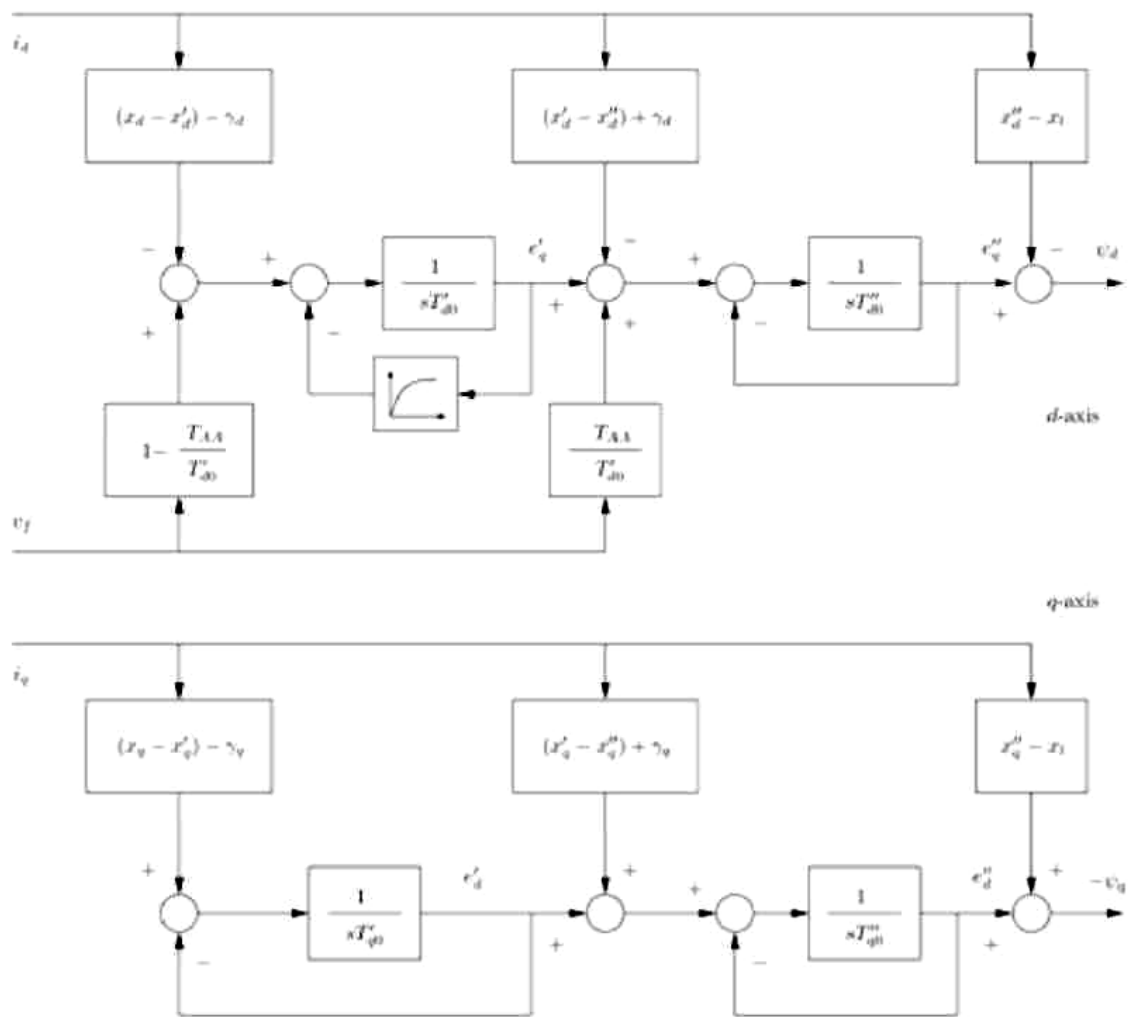


Figura 2– Diagrama de blocos dos eixos d e q dos fluxos do estator

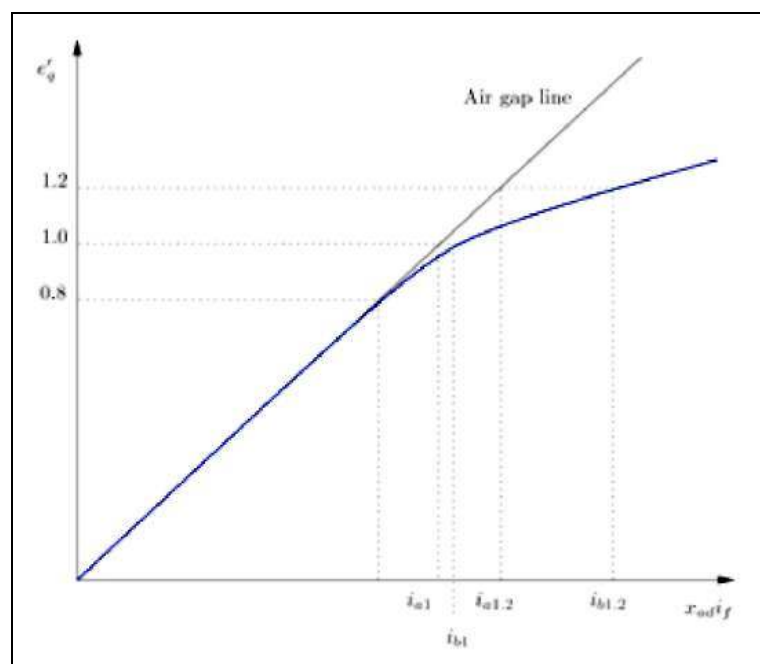


Figura 3 - Características da saturação magnética de Máquinas Síncronas

### Modelo de quinta ordem

Em nosso sistema teste, consideramos o modelo de quinta ordem, tipo 2.

O modelo de quinta ordem, tipo 2 pode ser obtido assumindo apenas um circuito adicional no eixo d. O modelo resultante tem cinco variáveis de estados  $\delta, \omega, e'_q, e''_q$  e  $e''_d$ , que são descritas pelas seguintes equações diferenciais:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \Omega_b(\omega - 1) \\ \dot{\omega} &= (P_m - P_e - D(\omega - 1))/M \\ \dot{e}'_q &= (-f_s(e'_q) - (x_d - x'_d - \frac{T''_{d0}}{T'_{d0}} \frac{x''_d}{x'_d} (x_d - x'_d))i_d + (1 - \frac{T_{AA}}{T'_{d0}})v_f^*)/T'_{d0} \\ \dot{e}''_q &= (-e''_q + e'_q - (x'_d - x''_d + \frac{T''_{d0}}{T'_{d0}} \frac{x''_d}{x'_d} (x_d - x'_d))i_d + \frac{T_{AA}}{T'_{d0}} v_f^*)/T'_{d0} \\ \dot{e}''_d &= (-e''_d + (x_q - x''_q)i_q)/T''_{q0}\end{aligned}$$

Onde a potência elétrica é:

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

As relações entre as tensões e correntes da máquina são dadas por:

$$\begin{aligned}0 &= v_q + r_a i_q - e'_q + (x'_d - x_l)i_d \\ 0 &= v_d + r_a i_d - (x'_d - x_l)i_q\end{aligned}$$

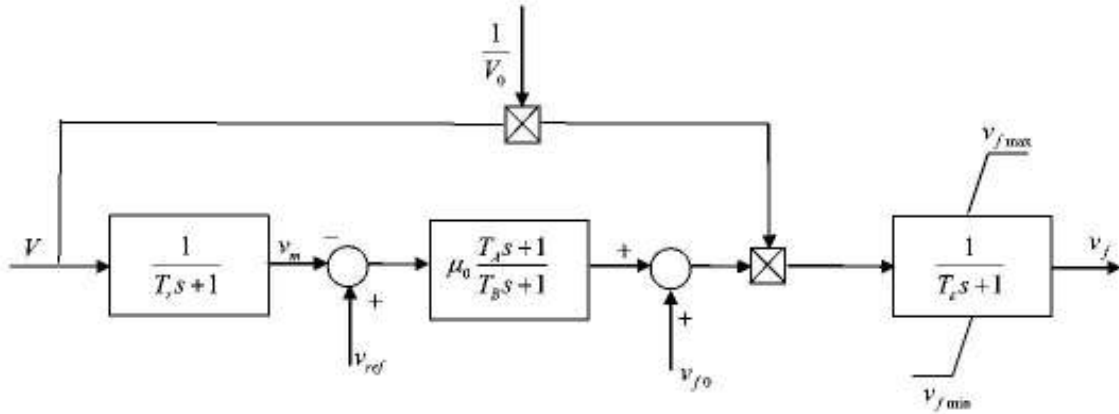
### Parâmetros da Máquina Síncrona

A Tabela abaixo fornece os parâmetros do modelo de quinta ordem (modelo V.2), utilizado nas simulações dessa dissertação:

Variável	Descrição	Unidade
$r_a$	Resistência de armadura	p.u.
$x_d$	Reatância síncrona de eixo d	p.u.
$x'_d$	Reatância transitória de eixo d	p.u.
$x''_d$	Reatância subtransitória de eixo d	p.u.
$T'_{d0}$	Constante de tempo transitória de circuito aberto do eixo d	s
$T''_{d0}$	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto do eixo d	s
$x_q$	Reatância síncrona de eixo q	p.u.
$x''_q$	Reatância subtransitória de eixo q	p.u.
$T''_{q0}$	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto do eixo q	s
$M=2H$	Coefficiente de inércia (2X Constante de Inércia H)	kWs/kVA
$D$	Coefficiente de amortecimento do Gerador Síncrono	p.u.
$K_\omega$	Ganho de realimentação de velocidade	ganho
$K_p$	Ganho de realimentação de potência ativa	ganho
$T_{AA}$	Constante de tempo de dispersão adicional ao eixo d	s

### Regulador Automático de Tensão (RAT)

Reguladores automáticos de Tensão definem a regulação primária de tensão de máquinas síncronas. Diversos modelos tem sido propostos e implementados na prática. O PSAT permite utilizar três diferentes tipos de RAT. O RAT tipo I é um regulador padrão italiano (ENEL) e o RAT tipo II é o modelo padrão do IEEE 1. O RAT tipo III é o mais simples dos três, porém muito utilizado nos estudos de estabilidade.



**Figura 4 - Regulador automático de tensão tipo III**

Para todas as simulações apresentadas neste trabalho foi utilizado o modelo de RAT tipo III. A Figura 4 mostra o diagrama de blocos para esse modelo. Na sequência, temos as equações que o representam

$$\begin{aligned}\dot{v}_m &= (V - v_m) / T_r \\ v_r &= (\mu_0 (1 - \frac{T_A}{T_B}) (v_{ref} - v_m) - v_r) / T_B \\ \dot{v}_f &= ((v_r + \mu_0 \frac{T_A}{T_B} (v_{ref} - v_m) + v_{f0}) \frac{V}{V_0}) / T_e\end{aligned}$$

#### Parâmetros do Regulador Automático de Tensão

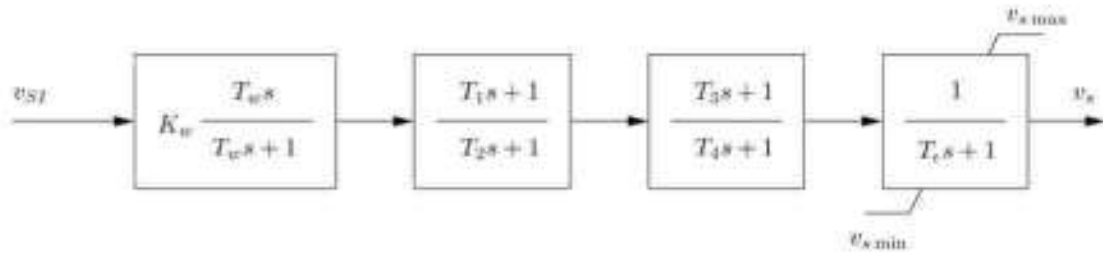
Variável	Descrição	Unidade
$v_{f \max}$	Tensão de campo máxima	p.u.
$v_{f \min}$	Tensão de campo mínima	p.u.
$\mu_0$	Ganho do regulador	p.u./p.u.
$T_A$	Zero do Regulador	s
$T_B$	Pólo do Regulador	s
$v_{f0}$	Referência da tensão de campo	p.u.
$T_r$	Constante de tempo do RAT	

## Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSS)

Os PSS são tipicamente usados para amortecer oscilações de sistemas de potência e muitos diferentes modelos tem sido proposto na literatura. Cinco modelos de PSS foram implementados no PSAT.

Todos os modelos aceitam como sinal de entrada a velocidade do rotor  $\omega$ , a potência ativa  $P_g$  e a magnitude de tensão da barra ao qual o PSS está conectado através do regulador automático de tensão.

Para todas as simulações apresentadas neste trabalho foi utilizado o modelo de PSS tipo II. A Figura 5 mostra o diagrama de blocos para esse modelo. Na seqüência, temos as equações que o representam.



**Figura 5 - Estabilizador de Sistema de Potência tipo II**

$$\dot{v}_1 = -(K_w v_{SI} + v_1)/T_w$$

$$\dot{v}_2 = ((1 - \frac{T_1}{T_2})(K_w v_{SI} + v_1) - v_2)/T_2$$

$$\dot{v}_3 = ((1 - \frac{T_3}{T_4})(v_2 + (\frac{T_1}{T_2}(K_w v_{SI} + v_1))) - v_3)/T_4$$

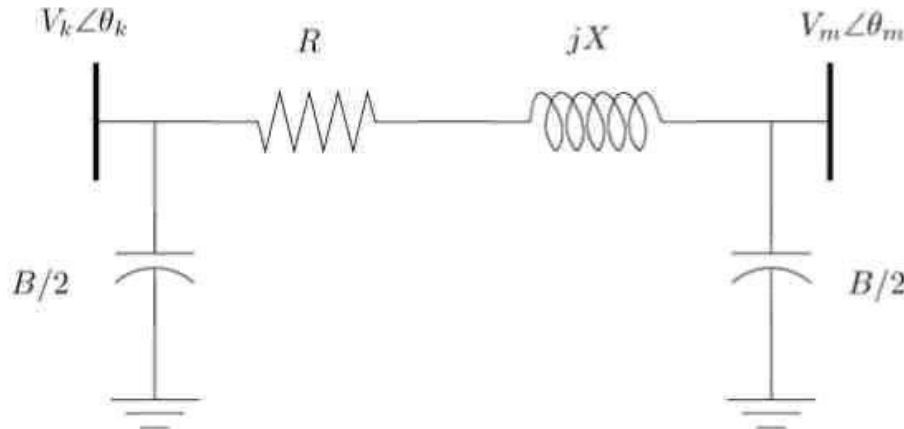
$$\dot{v}_s = (v_3 + \frac{T_3}{T_4}(v_2 + \frac{T_1}{T_2}(K_w v_{SI} + v_1)) - v_s)/T_e$$

## Parâmetros do Estabilizador de Sistemas 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	p.u./p.u.
$T_w$	Constante de tempo do Wash-out	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

## Linha de Transmissão

O modelo de linha de transmissão utilizado neste trabalho, para todas as simulações é o modelo equivalente  $n$ , que possui seus parâmetros fixos (resistência, reatância e capacitância). Neste modelo, temos que a reatância indutiva série da linha é dada por  $jX$ , a resistência série dada por  $R$  e a reatância capacitiva paralela por  $jB/2$ , como ilustrado na Figura 6:



**Figura 6 - Modelo equivalente  $n$  - representação de linha de transmissão**

## Carga

Foi utilizado neste trabalho, o modelo de carga conhecido como modelo ZIP, modelo este muito utilizado em estudos de estabilidade. Este modelo é constituído pelos seguintes componentes: Impedância constante  $Z$ , corrente constante  $I$ , potência ativa constante  $P$  e potência reativa constante  $Q$ . Os parâmetros desse modelo são os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  para a potência ativa e  $D$ ,  $E$  e  $F$  para a potência reativa, que definem a proporção de cada componente. Este modelo representa a dependência da carga da magnitude da tensão, como mostrado nas equações a seguir:

$$P = P_0 \left( A + B\bar{V} + C\bar{V}^2 \right), \text{ onde } \bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

$$A + B + C = 1$$

$$Q = Q_0 \left( D + E\bar{V} + F\bar{V}^2 \right), \text{ onde } \bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

$$D + E + F = 1$$

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

**DADOS DO SISTEMA TESTE UTILIZADO – IEEE 14 BARRAS PSAT****POWER FLOW REPORT**

P S A T 2.1.2

Author: Federico Milano, (c) 2002-2008

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: C:\Arquivos de programas\MATLAB\R2007a\psat2\tests\d\_014\_dyn\_l14.mdl

Date: 11-Sep-2009 10:12:26

**NETWORK STATISTICS**

Buses:	14
Lines:	16
Transformers:	4
Generators:	5
Loads:	11

**SOLUTION STATISTICS**

Number of Iterations:	2
Maximum P mismatch [p.u.]	3,83027E-15
Maximum Q mismatch [p.u.]	1,24414E-14
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 01	1,06	0	3,520636543	-0,282271543	0	0
Bus 02	1,045	-0,135771937	0,4	0,950763631	0,3038	0,1778
Bus 03	1,01	-0,332469971	8,88178E-16	0,598891724	1,3188	0,266
Bus 04	0,997563778	-0,264875942	9,99201E-16	-3,03924E-15	0,6692	0,056
Bus 05	1,002922171	-0,226666749	2,59515E-15	1,24414E-14	0,1064	0,0224
Bus 06	1,07	-0,385654481	1,02696E-15	0,458474548	0,1568	0,105
Bus 07	1,036211802	-0,347014399	-1,9326E-16	-1,88746E-15	0	0
Bus 08	1,09	-0,347014399	-7,21645E-16	0,332835565	0	0
Bus 09	1,013380782	-0,388579286	3,83027E-15	2,16493E-15	0,413	0,2324
Bus 10	1,012655622	-0,395156836	-2,02616E-15	-1,22125E-15	0,126	0,0812
Bus 11	1,035969272	-0,393239875	4,57967E-16	5,6205E-16	0,049	0,0252
Bus 12	1,046135081	-0,406240833	-2,45637E-15	-1,13451E-15	0,0854	0,0224
Bus 13	1,036738978	-0,406670526	-5,55112E-16	-1,97065E-15	0,189	0,0812
Bus 14	0,9972994	-0,422557102	-4,16334E-16	-2,63678E-16	0,2086	0,07



## STATE VARIABLES

delta_Syn_1	0,207520313
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1,062120779
e2q_Syn_1	1,036596077
e2d_Syn_1	0,132198423
delta_Syn_2	-0,334018431
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	1,19677236
e1d_Syn_2	0,00083572
e2q_Syn_2	1,138478501
e2d_Syn_2	0,001300752
delta_Syn_3	0,104461365
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	1,322821283
e1d_Syn_3	0,141361936
e2q_Syn_3	1,226992205
e2d_Syn_3	0,220021935
delta_Syn_4	-0,34908677
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	1,217830275
e1d_Syn_4	0,001248233
e2q_Syn_4	1,072908265
e2d_Syn_4	0,002784345
delta_Syn_5	-0,388051718
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1,249377376
e1d_Syn_5	0,00202613
e2q_Syn_5	1,04601891
e2d_Syn_5	0,004519546
vm_Exc_1	1,06
vr1_Exc_1	1,083685465
vr2_Exc_1	-0,002165228
vf_Exc_1	1,082614034
vm_Exc_2	1,045
vr1_Exc_2	2,73891588
vr2_Exc_2	-0,002721635
vf_Exc_2	2,721635303
vm_Exc_3	1,01
vr1_Exc_3	2,054215959
vr2_Exc_3	-0,002047686
vf_Exc_3	2,047685969
vm_Exc_4	1,09
vr1_Exc_4	2,46501981
vr2_Exc_4	-0,002453104
vf_Exc_4	2,45310416
vm_Exc_5	1,07
vr1_Exc_5	3,007176483
vr2_Exc_5	-0,002982747

---

vf_Exc_5	2,982746949
tg1_Tg_1	3,520636543
tg2_Tg_1	3,520636543
tg3_Tg_1	2,675683773
tg1_Tg_2	0,405033843
tg2_Tg_2	0,405033843
tg3_Tg_2	0,307825721
x_Busfreq_1	0
w_Busfreq_1	1
x_Busfreq_2	0
w_Busfreq_2	1
x_Busfreq_3	0
w_Busfreq_3	1
x_Busfreq_4	0
w_Busfreq_4	1
x_Busfreq_5	0
w_Busfreq_5	1

**OTHER ALGEBRAIC VARIABLES**

vf_Syn_1	0,9972994
pm_Syn_1	1,082614034
p_Syn_1	3,520636543
q_Syn_1	3,520636543
vf_Syn_2	-0,282271543
pm_Syn_2	2,047685969
p_Syn_2	0,001816621
q_Syn_2	8,88178E-16
vf_Syn_3	0,598891724
pm_Syn_3	2,721635303
p_Syn_3	0,405033843
q_Syn_3	0,4
vf_Syn_4	0,950763631
pm_Syn_4	2,45310416
p_Syn_4	0,001529151
q_Syn_4	-7,21645E-16
vf_Syn_5	0,332835565
pm_Syn_5	2,982746949
p_Syn_5	0,003010972
q_Syn_5	1,02696E-15
vref_Exc_1	0,458474548
vref_Exc_2	1,065418427
vref_Exc_3	1,181945794
vref_Exc_4	1,112710798
vref_Exc_5	1,21325099
wref_Tg_1	1,220358824
wref_Tg_2	1

**LINE FLOWS**

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	0,576267502	0,070458793	0,0177318	0,01847479
Bus 06	Bus 12	2	0,112508799	0,046691651	0,001593	0,003315395
Bus 12	Bus 13	3	0,025515839	0,020976255	0,0002202	0,00019927
Bus 06	Bus 13	4	0,253312818	0,146446757	0,0049466	0,00974141
Bus 06	Bus 11	5	0,105674486	0,13276926	0,0023888	0,005002429
Bus 11	Bus 10	6	0,054285694	0,102566832	0,0010296	0,002410089
Bus 09	Bus 10	7	0,072919161	-0,018491091	0,0001753	0,000465651
Bus 09	Bus 14	8	0,128033063	0,002239865	0,0020296	0,004317242
Bus 14	Bus 13	9	-0,082596542	-0,072077377	0,0020653	0,004204955
Bus 07	Bus 09	10	0,396634582	0,223295338	0	0,021226701
Bus 01	Bus 02	11	2,418886779	-0,380922437	0,1030472	0,256125723
Bus 03	Bus 02	12	-1,003372279	0,140060474	0,0475902	0,154243166
Bus 03	Bus 04	13	-0,315427721	0,192831249	0,0094459	-0,010754689
Bus 01	Bus 05	14	1,101749764	0,098650895	0,0591369	0,191737081
Bus 05	Bus 04	15	0,866452509	-0,136165736	0,0101874	0,019327956
Bus 02	Bus 04	16	0,784809615	0,051273987	0,0330488	0,061248433
Bus 05	Bus 06	17	0,628296103	0,072663552	-1,11E-16	0,100230432
Bus 04	Bus 09	18	0,217317643	0,041434823	0	0,027354686
Bus 04	Bus 07	19	0,396634582	-0,059317022	5,551E-17	0,03379882
Bus 08	Bus 07	20	-1,66533E-16	0,332835565	1,388E-17	0,016424385

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 05	Bus 02	1	-0,558535734	-0,051984003	0,0177318	0,01847479
Bus 12	Bus 06	2	-0,110915839	-0,043376255	0,001593	0,003315395
Bus 13	Bus 12	3	-0,025295592	-0,020776985	0,0002202	0,00019927
Bus 13	Bus 06	4	-0,248366213	-0,136705347	0,0049466	0,00974141
Bus 11	Bus 06	5	-0,103285694	-0,127766832	0,0023888	0,005002429
Bus 10	Bus 11	6	-0,053256133	-0,100156743	0,0010296	0,002410089
Bus 10	Bus 09	7	-0,072743867	0,018956743	0,0001753	0,000465651
Bus 14	Bus 09	8	-0,126003458	0,002077377	0,0020296	0,004317242
Bus 13	Bus 14	9	0,084661805	0,076282332	0,0020653	0,004204955
Bus 09	Bus 07	10	-0,396634582	-0,202068637	0	0,021226701
Bus 02	Bus 01	11	-2,315839607	0,637048161	0,1030472	0,256125723
Bus 02	Bus 03	12	1,05096249	0,014182691	0,0475902	0,154243166
Bus 04	Bus 03	13	0,324873632	-0,203585938	0,0094459	-0,010754689
Bus 05	Bus 01	14	-1,042612878	0,093086187	0,0591369	0,191737081
Bus 04	Bus 05	15	-0,856265083	0,155493691	0,0101874	0,019327956
Bus 04	Bus 02	16	-0,751760773	0,009974447	0,0330488	0,061248433
Bus 06	Bus 05	17	-0,628296103	0,02756688	-1,11E-16	0,100230432
Bus 09	Bus 04	18	-0,217317643	-0,014080137	0	0,027354686
Bus 07	Bus 04	19	-0,396634582	0,093115843	5,551E-17	0,03379882
Bus 07	Bus 08	20	1,80411E-16	-0,316411181	1,388E-17	0,016424385

## GLOBAL SUMMARY REPORT

### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.]	3,920636543
REACTIVE POWER [p.u.]	2,058693926

### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.]	3,626
REACTIVE POWER [p.u.]	1,1396

### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.]	0,294636543
REACTIVE POWER [p.u.]	0,919093926

## Anexo C

### *Relatórios da ONS*

Conforme relatado pelo ONS no Informativo Preliminar Diário da Operação do dia 14/03/2005:

“Às 05h05min ocorreu o desligamento automático da LT 500 kV Samambaia/Emborcação (EXPANSION) e da LT 345 kV Itumbiara/Porto Colômbia (FURNAS) e de unidades geradoras das seguintes usinas:

- Serra da Mesa (FURNAS), totalizando 650 MW
- Cana Brava (TRACTEBEL), totalizando 250 MW
- Mario Covas (EPE), totalizando 240 MW
- Termopernambuco (NEOENERGIA), totalizando 500 MW

Houve redução de geração na UH Emborcação (CEMIG), totalizando 600 MW

Causa: Sendo identificada. O tempo estava bom na região.

Consequências: Houve interrupção de aproximadamente 146 MW de carga, sendo 52 MW da CELG, 40 MW da ESCELSA, 35 MW da CEMAT, 12 MW da CEMIG e 7 MW da CEB.

**A frequência nas regiões Sudeste/Sul variou de 60,00Hz para 58,87Hz e nas regiões Norte/Nordeste de 60,00Hz para 61,93Hz.**

Houve a separação das regiões Norte/Nordeste das regiões Sul/Sudeste, permanecendo as áreas de Goiás, Brasília e Mato Grosso conectadas às regiões Norte/Nordeste.

Normalização: Entre 05h09min e 05h36min foram normalizadas as cargas interrompidas.

Às 05h17min foi restabelecida a interligação entre as regiões Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste através do fechamento do paralelo de 500 kV na Usina Itumbiara.

Às 05h24min foi ligada a LT 345 kV Itumbiara/Porto Colômbia e às 05h28min foi ligada a LT 500 kV Samambaia/Emborcação.

Observação: No momento da ocorrência, estavam sendo executadas manobras de segregação do barramento de 500 kV de Itumbiara para possibilitar o retorno da unidade geradora nº3 dessa usina.

## **Principais Perturbações Ocorridas no Sistema Interligado Nacional Síntese Gerencial Período: Semana de 30/06/2008 A 06/07/2008**

### **PROCESSO: Análise de Perturbações**

#### **Resumo:**

Este relatório, elaborado com periodicidade semanal, tem por objetivo relacionar as principais perturbações verificadas no Sistema Interligado Brasileiro, apresentando um sumário daquelas com maior impacto, acompanhamento de providências tomadas e uma tabela geral informando:

- Data e hora;
- Empresas envolvidas;
- Origem e causa;
- Interrupção de carga e normalização;
- Desempenho de ECE's;

#### **1- PERTURBAÇÃO DO DIA 30/06/2008 ÀS 03H59MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : FURNAS**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 345 kV Corumbá- Brasília Sul, devido a um curto-circuito monofásico, envolvendo a fase Vermelha (fase A – FURNAS), de causa desconhecida, corretamente eliminado em 75 ms, pelas atuações das proteções Primária e Secundária de distância para falhas a terra, em zonas 1, no terminal de Corumbá e pela proteção Primária de distância para falhas a terra, em zona de sobrealcance, associada à teleproteção, em Brasília Sul.

A falha foi localizada, com o auxílio de ferramenta computacional de FURNAS, como tendo ocorrido a 66 % do comprimento total da linha, medidos a partir do terminal de Brasília Sul. Às 04h03min foi normalizada a LT 345 kV Corumbá-Brasília Sul.

#### **2- PERTURBAÇÃO DO DIA 30/06/2008 ÀS 05H22MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Presidente Médici–Quinta, devido a um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo a fase A, localizado a 6 km do terminal de Presidente Médici, com causa desconhecida, eliminado

pelas atuações das proteções Secundárias de distância, em 1ª zona no terminal de Presidente Médici e, em 2ª zona, no terminal de Quinta. Às 05h23min foi normalizada a linha.

#### **3- PERTURBAÇÃO DO DIA 30/06/2008 ÀS 18H51MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Camaquã–Presidente Médici, devido a um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo a fase A, localizado a 174 km do terminal de Camaquã, provocado por poluição em isoladores, eliminado pelas atuações das proteções Primárias de sobrecorrente direcionais residuais, associadas ao esquema de teleproteção de Comparação Direcional por Sinal de Bloqueio, em ambos os terminais da linha. Houve atuação, com sucesso, do esquema de religamento automático monopolar da linha.

#### **4- PERTURBAÇÃO DO DIA 01/07/2008 ÀS 05H30MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Camaquã–Presidente Médici, devido a um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo

a fase C, localizado a 157 km do terminal de Camaquã, provocado por poluição em isoladores, eliminado pelas atuações das proteções Primárias de sobrecorrente direcionais residuais, associadas ao esquema de teleproteção de Comparação Direcional por Sinal de Bloqueio, em ambos os terminais da linha.

Houve atuação, com sucesso, do esquema de religamento automático monopolar da linha.

#### **5- PERTURBAÇÃO DO DIA 01/07/2008 ÀS 06H10MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CELG**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 138 kV Quirinópolis-Rio Verde (CELG), devido a um curto-circuito monofásico, envolvendo a fase Vermelha (fase C – CELG), de causa desconhecida, eliminado pelas atuações das proteções de distância, em 1<sup>as</sup> zonas, em ambos os terminais.

O Localizador de Defeitos identificou a falha a 13,04 km do terminal de Quirinópolis. Não houve interrupção de cargas. Às 06h11min a linha foi normalizada.

#### **6- PERTURBAÇÃO DO DIA 01/07/2008 ÀS 19H26MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Camaquã–Presidente Médici, devido a um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo a fase C, localizado a 175 km do terminal de Camaquã, provocado por poluição em isoladores, eliminado pelas atuações das proteções Primárias de sobrecorrente direcionais residuais, associadas ao esquema de teleproteção de Comparação Direcional por Sinal de Bloqueio, em ambos os terminais da linha.

Houve atuação, com sucesso, do esquema de religamento automático monopolar da linha.

#### **7- PERTURBAÇÃO DO DIA 01/07/2008 ÀS 20H19MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Camaquã–Presidente Médici, devido a um curto-circuito monofásico na linha, sem informação da fase envolvida, localizado a 170 km do terminal de Camaquã, provocado por poluição em isoladores, eliminado pelas atuações das proteções Primárias de sobrecorrente direcionais residuais, associadas ao esquema de teleproteção de Comparação Direcional por Sinal de Bloqueio, em ambos os terminais da linha.

Houve atuação, com sucesso, do esquema de religamento automático monopolar da linha.

#### **8- PERTURBAÇÃO DO DIA 01/07/2008 ÀS 23H10MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : ELETRONORTE**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 500 kV Colinas-Miracema C1, devido a um curto-circuito monofásico, envolvendo a fase Azul (fase A – ELETRONORTE), de causa desconhecida, corretamente eliminado em 52 ms, pelas atuações das proteções Principais e Alternadas de distância para faltas a terra, em segundas zonas, associadas aos esquemas de teleproteção da linha, em ambos os terminais. A falta foi localizada pelos algoritmos dos relés como tendo ocorrido a 101 km de distância da SE Colinas.

Houve religamento automático, com sucesso.

#### **9- PERTURBAÇÃO DO DIA 02/07/2008 ÀS 05H25MIN**

##### **- EMPRESAS AFETADAS : CGTEE E ELETROSUL**

A perturbação consistiu no desligamento automático do Gerador G-2, 6,6 kV – 6,25 MVA, da UTE São Jerônimo, para um defeito na LT 69 kV Charqueadas– Guaíba 1.

Houve um curto-circuito monofásico na citada LT, envolvendo a fase A, localizado a 12,8 km do terminal de Charqueadas, eliminado em 750 ms, pela atuação da proteção de sobrecorrente residual, no terminal fonte de Charqueadas. Após o desligamento da LT 69 kV Charqueadas–Guaíba 1, houve a atuação incorreta da proteção de sobrefrequência do Gerador G-2, da UTE São Jerônimo, rejeitando 5 MW de geração. Às 05h32min foi normalizado o Grupo Gerador.

#### **10- PERTURBAÇÃO DO DIA 02/07/2008 ÀS 17H37MIN**

##### **- EMPRESAS AFETADAS : ELETRONORTE E CHESF**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 500 kV Presidente Dutra-Boa Esperança C1 (05C7), devido à atuação accidental na SE Presidente Dutra, do relé de gás associado à fase Branca (fase B – ELETRONORTE e CHESF) do Reator de 500 kV - PDRE7-06, “shunt” da referida LT, com envio de sinal de transferência de disparo para a SE Boa Esperança.

A perturbação ocorreu devido a baixo nível de óleo, após o retorno à operação do referido Reator, que se encontrava em testes e que não voltou à operação de imediato devido às condições do SIN. Às 18h14min foi normalizada a LT 500 kV Presidente Dutra-Boa Esperança (05C7).

#### **11- PERTURBAÇÃO DO DIA 03/07/2008 ÀS 02H49MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : STE**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Maçambará–Usina Termoelétrica Uruguaiana, devido à queda de um raio na linha de 23 kV que alimenta o serviço auxiliar da STE na SE Maçambará, ocasionando a queima de alguns componentes do sistema de proteção da linha.

Houve atuação accidental da proteção Alternada. Às 06h35min, foi normalizada a

linha após atuação da equipe de manutenção da ELETROSUL.

#### **12- PERTURBAÇÃO DO DIA 03/07/2008 ÀS 21H48MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Camaquã–Presidente Médici, devido a um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo a fase C, localizado a 175 km do terminal de Camaquã, provocado por poluição em isoladores, eliminado pelas atuações das proteções Primárias de sobrecorrente direcionais residuais, associadas ao esquema de teleproteção de Comparação Direcional por Sinal de Bloqueio, em ambos os terminais da linha.

Houve atuação, com sucesso, do esquema de religamento automático monopolar da linha.

#### **13- PERTURBAÇÃO DO DIA 03/07/2008 ÀS 22H53MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CEEE-GT**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Presidente Médici–Quinta, devido a um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo a fase B, localizado a 94 km do terminal de Presidente Médici, com causa desconhecida, eliminado pelas atuações das proteções Secundárias de distância, em 1ªs zonas, em ambos os terminais. Às 22h53min foi normalizada a linha.

#### **14- PERTURBAÇÃO DO DIA 04/07/2008 ÀS 03H17MIN**

##### **- EMPRESAS AFETADAS : FURNAS, ELETRONORTE E CELG**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 138 kV Rio Verde- Couto Magalhães, devido à incidência de um curto-circuito monofásico, envolvendo a fase Azul (fase C – FURNAS e A – ELETRONORTE), de causa desconhecida, eliminado pelas atuações das proteções Primárias e Secundárias de distância para faltas a terra, em 1ªs zonas, no



terminal de Rio Verde. A abertura do terminal de Couto Magalhães ocorreu por recepção de transferência direta de disparo. A duração do defeito foi de 100 ms pelo terminal de Couto Magalhães e de 64 ms pelo terminal de Rio Verde.

A falha foi localizada, através de ferramenta computacional de FURNAS, como tendo ocorrido a 8 % do comprimento total da linha, medidos a partir do terminal de Rio Verde.

Houve rejeição de 39,5 MW de cargas da CELG, sendo 26,8 MW na SE Rio Claro e de 12,7 MW na SE Parque das Emas, que são ligadas em derivação da LT. Às 03h21min foi normalizada a LT 138 kV Rio Verde-Couto Magalhães.

#### **15- PERTURBAÇÃO DO DIA 04/07/2008 ÀS 09H41MIN**

##### **- EMPRESAS AFETADAS : FURNAS E CEMIG**

A perturbação consistiu no desligamento automático acidental, da LT 500 kV Itumbiara-São Simão, iniciado pelo envio de sinal de transferência direta de disparo para o terminal de São Simão, através da proteção Alternada, devido à falha do respectivo equipamento de teleproteção no terminal de Itumbiara.

Houve a atuação do religamento automático com sucesso.

#### **16- PERTURBAÇÃO DO DIA 04/07/2008 ÀS 11H53MIN**

##### **- EMPRESAS AFETADAS : AMPLA E FURNAS**

A perturbação consistiu nos desligamentos automáticos, acidentais, das LT's 138 kV Adrianópolis-Magé C1 e Rocha Leão-Magé C1, ambas apenas nos terminais de Magé, durante serviços nos circuitos "DC" da SE Magé, que estavam sendo realizados pela AMPLA. Às 14h22min foi normalizada a LT 138 kV Rocha Leão-Magé C1. Às 14h23min foi normalizada a LT 138 kV Adrianópolis-Magé C1.

#### **17- PERTURBAÇÃO DO DIA 04/07/2008 ÀS 14H06MIN**

##### **- EMPRESA AFETADA : CHESF**

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 230 kV Banabuiú-Fortaleza (04F1), devido a um curto-circuito monofásico interno, envolvendo a fase B, com alta resistência de falta, provocado por causa não identificada.

A falha foi eliminada corretamente pela atuação, no terminal de Fortaleza, das proteções de distância para faltas a terra, em sobrealcance e de sobrecorrente direcional residual temporizada, e no terminal de Banabuiú, pela atuação da proteção de sobrecorrente direcional residual temporizada, abrindo o Disjuntor de Fortaleza em 644 ms e o de Banabuiú em 786 ms.

A função de localização de faltas indicou o defeito como tendo ocorrido a 31,0 km de distância da SE Fortaleza. Às 14h10min foi normalizada a LT 230 kV Banabuiú-Fortaleza (04F1).

#### **18- PERTURBAÇÃO DO DIA 04/07/2008 ÀS 14H55MIN**

##### **- EMPRESAS AFETADAS : ITE E ELETRONORTE**

A perturbação consistiu no desligamento automático das LT's 230 kV Ribeirãozinho-Barra do Peixe C1 e C2, apenas no terminal de Barra do Peixe, por atuação acidental de proteção de falha de Disjuntor da ELETRONORTE, nesta SE.

Os Disjuntores desligados foram disponibilizados para o ONS às 15h01min, sendo as LT's normalizadas às 15h02min.

## Anexo D

### Relé Digital

## **SEL** Relé de Geradores SEL-300G



O Relé de Proteção de Geradores SEL-300G é um relé multifunção, completo, projetado para proteção primária e/ou de retaguarda de máquinas síncronas de pequeno, médio ou grande porte.

### Funções

#### Proteção

- Terra Estator 100%
- Terra Rotor (com o Módulo "SEL-2664 Field Ground")
- Diferencial de Terra ou Fase (opcional)
- Voltz/Hertz
- Potência Reversa ou Mínima Potência Fornecida
- Proteção de Sobrecorrente de Backup
- Sobrecorrente de Sequência-Negativa
- Perda de Excitação
- Seis Níveis de Sobre ou Subfrequência com Acumuladores de Tempo
- Sobre/Subtensão
- Energização Indevida
- Perda de Potencial
- Check de Sincronismo (opcional)
- Perda de Sincronismo (1 ou 2 esquemas *blindings*)
- Compatibilidade com Módulo de RTDs Série SEL-2600 (opcional)

#### Monitoração e Medição

- Relatórios de Evento Completos, Registros Sequenciais de Eventos (SER) e Mensagens não Solicitadas via *Fast SER*
- Monitor do Disjuntor e Monitor das Baterias
- Medição com Alta Precisão

#### Comunicação

- Comunicações ACSII, Binárias e Modbus® através das Portas EIA-232 e/ou EIA-485
- Protocolo de Mensagens não Solicitadas *Fast SER*
- Entrada do Código de Tempo IRIG-B

#### Controle

- Equações de Controle SELOGIC® Avançadas para Implementação de Lógicas Tradicionais ou Personalizadas

#### Suporte para Software de Ajustes do Relé e das Lógicas

- Software ACSELERATOR® QuickSet™ SEL-5030 para Facilidade na Programação das Lógicas e dos Ajustes do Relé.

### Aplicações

O SEL-300G incorpora recursos abrangentes para aplicação como proteção primária ou de retaguarda do gerador ou da unidade geradora.

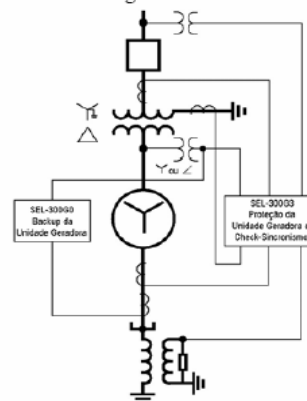


Figura 1: Aplicação Típica

## Características e Benefícios do Relé

### Entradas Analógicas AC

O SEL-300G possui entre oito e onze entradas analógicas, dependendo das opções selecionadas. Todas as entradas analógicas são registradas para análise nos relatórios e oscilografia dos eventos.

### Proteção Diferencial Opcional

Quando especificado, o SEL-300G detecta faltas no estator através da função segura e sensível do diferencial de corrente. Essa função inclui um elemento diferencial sensível com restrição porcentual e um elemento sem restrição. A função do diferencial fornece um recurso exclusivo de compensação das conexões dos TCs e do transformador de potência. Isso permite a inclusão do transformador elevador da unidade geradora na zona do diferencial do gerador usando TCs conectados em estrela para ambos os grupos de entradas.

A função de bloqueio do segundo harmônico, programável pelo usuário, detecta a corrente de *inrush* do transformador se a zona do diferencial incluir o transformador elevador do gerador. A característica de restrição porcentual com dupla inclinação aumenta a segurança do elemento para condições de faltas passantes.

### Proteção Diferencial de Terra Opcional

Os Relés SEL-300G que não incluem os elementos diferenciais opcionais com restrição porcentual descritos acima são equipados com uma função do diferencial de terra que propicia detecção seletiva de faltas à terra para geradores solidamente aterrados e geradores aterrados através de baixa impedância. Essa função ajuda a proteger geradores ligados a barras com várias máquinas, pois o elemento não responde às faltas à terra nos geradores conectados em paralelo.

### Check de Sincronismo Opcional

O SEL-300G pode ser especificado com a função de check de sincronismo incorporada. A função de check de sincronismo é extremamente precisa e fornece supervisão para uma janela de tensão e diferença porcentual máxima aceitável, frequência de escorregamento admissível mínima e máxima, ângulo de fechamento desejado e temporização de fechamento do disjuntor. O relatório do check de sincronismo fornece informações completas sobre as

três últimas operações de paralelismo, incluindo as tensões e frequências do gerador e do sistema, a frequência de escorregamento e o ângulo de fase no instante do início do fechamento. O relé também armazena a média do tempo de fechamento do disjuntor.

### Proteção Terra Estator 100%

O SEL-300G detecta faltas à terra no estator em geradores aterrados através de alta impedância, usando um elemento de sobretensão de neutro convencional com esquema de detecção do diferencial da tensão de terceiro harmônico para cobertura de 100% do enrolamento do estator. O elemento de sobretensão de neutro detecta faltas à terra no enrolamento em aproximadamente 85% do mesmo. As faltas próximas ao neutro do gerador não produzem tensão de neutro elevada, porém são detectadas usando-se as tensões de terceiro harmônico do neutro e do terminal. A combinação dos dois métodos de medição propicia proteção contra faltas à terra para todo o enrolamento.

### Proteção Terra Rotor

O SEL-300G, junto com o Módulo Terra Rotor SEL-2664 ("SEL-2664 Field Ground"), detecta faltas à terra através da medição da resistência de isolamento para terra do campo, usando o método de injeção de tensão DC chaveada. São fornecidos dois níveis de proteção para as funções de alarme e trip.

### Detecção Direcional de Potência

Os elementos de alta sensibilidade da função direcional de potência do SEL-300G propiciam abertura para condições de potência mínima fornecida e/ou antimotorização. São fornecidos dois elementos com temporizações e sensibilidades independentes. Desligue diretamente o gerador sob condições de perda da força motriz (turbina / motor) para evitar sua motorização, ou use a indicação de potência mínima fornecida como intertravamento da abertura se uma parada forçada for requisitada.

### Proteção de Sobreexcitação

O SEL-300G possui um elemento volts/hertz de tempo-definido para alarme e um de tempo-inverso composto. A característica de tempo-inverso composto pode ser habilitada através de uma característica de tempo-definido de dois níveis, uma

característica de tempo-definido/inverso, ou uma característica de tempo-inverso simples.

## Proteção de Perda de Excitação

Dois elementos de sequência-positiva offset-mho detectam condições de perda de excitação. Temporizadores ajustáveis possibilitam a rejeição das oscilações de potência que passam através da característica de impedância da máquina. Usando a supervisão direcional incluída, um dos elementos mho pode ser ajustado para coordenar com o limitador de mínima excitação do gerador e com seu limite de estabilidade em regime.

## Proteção de Perda de Sincronismo

Os Relés 300G utilizam o esquema *blinder* simples ou *blinder* duplo, dependendo da seleção do usuário, para detectar condições de perda de sincronismo. Além dos *blindings*, o esquema usa um círculo mho que restringe a cobertura da função de perda de sincronismo à extensão desejada. Além disso, ambos os esquemas incluem supervisão de corrente e controle de torque para supervisionar a operação do elemento de perda de sincronismo.

## Proteção de Sobrecorrente de Sequência-Negativa

A corrente de sequência-negativa aquece o rotor a uma taxa maior do que a corrente de sequência-positiva ou de terra. O elemento de sequência-negativa de tempo-definido gera alarme para os estágios iniciais de uma condição de desbalanço. O elemento de sobrecorrente de tempo-inverso dá trip para condições de desbalanço sustentado para evitar danos à máquina. O elemento de sequência-negativa de tempo-inverso fornece as curvas de proteção  $I_2^2t$  padronizadas na indústria.

## Proteção de Retaguarda do Sistema

O SEL-300G oferece a opção de escolha entre quatro métodos para efetuar a proteção de retaguarda do sistema. São disponibilizados elementos de distância de fase tipo mho, elementos de distância com compensação, um elemento de sobrecorrente temporizado de fase com restrição por tensão e um elemento de sobrecorrente temporizado de fase controlado por tensão; você simplesmente habilita o elemento que quer usar.

## Elementos de Sobrecorrente de Terra

Os elementos de sobrecorrente de neutro ( $I_N$ ) detectam faltas à terra em máquinas solidamente aterradas e aterradas através de baixa impedância. Efetue o controle de torque desses elementos usando uma entrada isolada opticamente ou condições das lógicas internas.

## Proteção de Sobretensão e Subtensão

Os elementos de subtensão e de sobretensão de fase são incluídos para o desenvolvimento de esquemas de proteção e controle tais como:

- Controle de torque para a proteção de sobrecorrente.
- Trip/alarme ou disparo do relatório de evento (oscilografia) para quedas e oscilações de tensão.

Se desejado, uma temporização com tempo-definido pode ser adicionada usando-se um temporizador das equações de controle SELOGIC.

Elementos de sobretensão de sequência-zero e negativa são incluídos para funções de proteção e controle.

## Proteção Térmica

Os modelos do SEL-300G compatíveis com o Módulo de RTDs Série SEL-2600 propiciam proteção térmica para o gerador e turbina/motor. Os tipos e localizações dos RTDs são configuráveis individualmente. A temperatura ambiente ou a corrente de carga do gerador podem ser configuradas para compensar os limites da temperatura de trip dos RTDs dos enrolamentos.

## Lógica de Perda de Potencial

As funções do relé que usam tensões de fase ou tensões das componentes simétricas consideram a validade das tensões de entrada para tomar decisões corretas. O SEL-300G inclui uma lógica de perda de potencial que detecta a queima de um, dois ou três fusíveis. Essa lógica é exclusiva, uma vez que não requer ajustes e é útil em todas as aplicações (patente pendente). Ela substitui os esquemas tradicionais de desbalanço de tensão que requerem entradas de dois conjuntos de TPs.

## Detecção de Energização Indevida

Ocasionalmente, estando o gerador fora de serviço, o disjuntor da unidade geradora é fechado inadvertidamente. O SEL-300G detecta essa condição usando tensão, corrente e outras condições de supervisão que você seleciona através das equações de controle SELOGIC.

## Proteção de Frequência

Seis níveis de elementos de subfrequência ou sobrefrequência detectam condições anormais de operação da máquina. Utilize a saída desses elementos, com temporizações independentes, para trip ou alarme. A supervisão através do elemento de subtensão de fase previne a operação indesejada do elemento de frequência durante a partida, parada, faltas, e enquanto o campo estiver desenergizado.

Os elementos de frequência do SEL-300G têm alta precisão e baixa ultrapassagem. Para uma variação do nível de frequência de  $\pm 5$  Hz, o erro do transitório mais regime é menor do que 0,01 Hz.

O SEL-300G rastreia o tempo total de operação de até seis bandas de frequência *off-nominal*. Se o tempo de operação da *off-nominal* ultrapassar um dos pontos de ajuste dos tempos independentes, o relé pode dar trip ou alarme.

## Relatórios de Evento (Oscilografia) e Registrador Sequencial de Eventos (SER)

Você seleciona as condições de disparo ("triggers") dos eventos e o tamanho do relatório de evento: 15, 30, 60 ou 180 ciclos. As informações de tensão, corrente, frequência e estado dos elementos contidas em cada relatório de evento confirmam o desempenho do relé, do esquema e do sistema em todas as operações. Os últimos (mais recentes) vinte e nove relatórios de evento de 15 ciclos, quinze relatórios de evento de 30 ciclos, oito relatórios de evento de 60 ciclos ou dois relatórios de evento de 180 ciclos são armazenados em memória não volátil. Quando você solicita um relatório de evento, é possível escolher o nível de detalhamento necessário: resolução de 1/4 de ciclo ou 1/16 de ciclo, dados analógicos filtrados ou brutos

O relatório de 1/4 de ciclo tem um quarto do tamanho do relatório de 1/16 de ciclo. Portanto, ele é mais rápido de ser restituído e analisado. Essa vantagem é

especialmente importante após uma perturbação de grande porte. O relatório completo de 1/16 amostras por ciclo pode ser restituído quando as condições justificarem uma análise minuciosa.

A função SER do relé armazena as últimas 512 entradas. Use este recurso para obter uma visão ampla de imediato. Uma entrada do SER é disparada por itens tais como ocorrências com mudança de estado das entradas e saídas e pickup/dropout dos elementos. O relé também permite a denominação pelo usuário das condições internas e entradas do relé. Esses nomes configuráveis aparecem no relatório do SER e simplificam a análise da operação.

O horário do SEL-300G é sincronizado pela entrada do código de tempo IRIG-B com uma variação de  $\pm 5$  ms da entrada da fonte de tempo. Uma fonte adequada a esse código de tempo é o Processador de Comunicações SEL-2020, SEL-2030 ou SEL-2032.

## Limites das Correntes de Demanda

Os valores limites ajustáveis das correntes de demanda são disponibilizados para medições de demanda de fase, sequência-negativa e neutro/residual. Se a corrente de demanda exceder um limite, o respectivo *Relay Word bit* PDEM, QDEM, GDEM ou NDEM é habilitado.

Os *Relay Word bits* PDEM, QDEM, GDEM ou NDEM dão alarme para as seguintes condições do gerador: sobrecarga, desbalanço de sequência-negativa, residual ou desbalanço de neutro, respectivamente. A constante de tempo do amperímetro de demanda pode ser selecionada com qualquer valor entre 5 e 60 minutos.

São oferecidos dois tipos de técnica de medição de demanda: térmica e "rolling".

## Monitor do Desgaste do Disjuntor

Disjuntores sofrem desgaste mecânico e elétrico cada vez que operam. Os fabricantes do disjuntor publicam curvas e tabelas de manutenção que relacionam a corrente interrompida com o número de operações de abertura (Close-to-Open – C/O). Esses dados são normalmente apresentados em uma tabela na seção de inspeção e manutenção do manual do disjuntor.

Cada vez que ocorre trip do disjuntor, o relé computa a operação de abertura e registra a magnitude da corrente não filtrada de cada fase. Quando o resultado desse registro exceder o valor limite ajustado através

# Especificações

## Especificações Gerais

### Conexão dos Terminais

Torque de Fixação	
Bloco com Terminais:	
Mínimo:	8-in-lb (0,9 Nm)
Máximo:	12-in-lb (1,4 Nm)
Connectorized:	
Mínimo:	4,4-in-lb (0,5 Nm)
Máximo:	8,8-in-lb (1,0 Nm)
Terminais ou cabo de cobre trançado. Recomendam-se terminais circulares. Temperatura mínima nominal 105°C.	

### Entradas de Corrente AC

5 A Nominal:	15 A contínuos, linear até 100 A simétricos 500 A por 1 segundo, 1.250 A por 1 ciclo
Burden:	0,27 VA @ 5 A, 2,51 VA @ 15 A
1 A Nominal:	3 A contínuos, linear até 20 A simétricos 100 A por 1 segundo, 250 A por 1 ciclo
Burden:	0,13 VA @ 1 A, 1,31 VA @ 3 A

### Entradas de Tensão AC

80 – 208 V <sub>L-L</sub>	Nominal, para entrada de tensão estrela a 4 fios.
80 – 140 V <sub>L-L</sub>	Nominal, para entrada de tensão delta a 3 fios.
300 V <sub>L-N</sub> limite contínuo para conexão estrela a quatro fios, trifásica.	
300 V <sub>L-L</sub> limite contínuo para conexão delta a três fios, trifásica.	
300 V contínuos, entrada de tensão de neutro V <sub>N-NN</sub> .	
300 V contínuos, entrada de tensão de sincronismo V <sub>S-NS</sub> .	
365 Vac por 10 segundos.	
Burden:	0,13 VA @ 67 V 0,45 VA @ 120 V 0,80 VA @ 300 V

### Fonte de Alimentação

125/250 Vdc ou Vac	
Faixa:	85–350 Vdc ou 85–264 Vac
Burden:	<25 W
48/125 Vdc ou 125 Vac	
Faixa:	38–200 Vdc ou 85–140 Vac
Burden:	<25 W
24/48 Vdc	
Faixa:	18–60 Vdc dependente da polaridade
Burden:	<25 W

## Contatos de Saída

### Padrão

Fechamento:	30 A	
Carregamento:	6 A @ 70°C, 4 A @ 85°C	
Nominal por 1 s:	50 A	
MOV:	270 Vac, 360 Vdc, 40 J	
Tempo de Pickup:	< 5 ms	
Tempo de Dropout:	< 8 ms, típico	
Capacidade de Interrupção (10.000 operações):		
24 V	0,75 A	L/R = 40 ms
48 V	0,50 A	L/R = 40 ms
125 V	0,30 A	L/R = 40 ms
250 V	0,20 A	L/R = 40 ms

### Capacidade Cíclica (2,5 ciclos/segundo):

24 V	0,75 A	L/R = 40 ms
48 V	0,50 A	L/R = 40 ms
125 V	0,30 A	L/R = 40 ms
250 V	0,20 A	L/R = 40 ms

### Opção para Interrupção de Correntes Elevadas

Fechamento:	30 A	
Carregamento:	6 A @ 70°C, 4 A @ 85°C	
MOV:	330 Vdc, 130 J	
Tempo de Pickup:	< 5 ms	
Tempo de Dropout:	< 8 ms, típico	
Capacidade de Interrupção (10.000 operações):		
24 V	10 A	L/R = 40 ms
48 V	10 A	L/R = 40 ms
125 V	10 A	L/R = 40 ms
250 V	10 A	L/R = 20 ms

### Capacidade Cíclica (4 ciclos em 1 segundo, seguidos de 2 minutos de desligamento para dissipação térmica):

24 V	10 A	L/R = 40 ms
48 V	10 A	L/R = 40 ms
125 V	10 A	L/R = 40 ms
250 V	10 A	L/R = 20 ms

Nota: Não use os contatos de saída para interrupção de correntes elevadas para chavear sinais de controle AC. Essas saídas são dependentes da polaridade.

Nota: Capacidade de Fechamento conf. IEEE C37.90-1989; Capacidade Cíclica e Interrupção conf. IEC 60255-23:1994.

## Entradas Isoladas Opticamente

250 Vdc:	Pickup 200–300 Vdc; Dropout 150 Vdc
220 Vdc:	Pickup 176–264 Vdc; Dropout 132 Vdc
125 Vdc:	Pickup 105–150 Vdc; Dropout 75 Vdc
110 Vdc:	Pickup 88–132 Vdc; Dropout 66 Vdc
48 Vdc:	Pickup 38,4–60 Vdc; Dropout 28,8 Vdc
24 Vdc:	Pickup 15,0–30 Vdc

Nota: As entradas isoladas opticamente de 24, 48, 125, 220 e 250 Vdc consomem aproximadamente 5 mA de corrente e as entradas de 110 Vdc consomem aproximadamente 8 mA de corrente. Todos os valores nominais de corrente são para tensões de entrada nominais.

### Elementos de Sub/Sobrefrequência de Tempo-Definido (81)

Frequência:	20 – 70 Hz, degraus de 0,01 Hz
Tempo de Pickup:	60 ms a 60 Hz (Máx.)
Temporizações:	0,03 – 400,00 s
Precisão da Temporização de Tempo-Definido	
Máxima:	±0,1%, ±4,2 ms a 60 Hz
27 / Supervisão:	20 – 150 V, ±5%, ±0,1 V
Ultrapassagem em Regime e Transitório:	(±0,01 + Δf <sub>sist</sub> ) Hz
Compensação da Frequência em Função da Temperatura:	$\Delta f_{sist} = f_{sist} \cdot (0,04 \cdot 10^{-6}) (T - 25^{\circ}\text{C})^2$ , onde T = Temperatura do relé via comando STATUS

### Elementos Diferenciais Opcionais (87) (Modelo 0300G1 e Modelo 0300G3)

Pickup do Elemento de Restrição:	0,04 – 1,0 • TAP
Precisão do Pickup em Regime:	Modelo 5 A: ±0,1 A, ±5% Modelo 1 A: ±0,02 A, ±5%
Faixa da Inclinação 1:	5 – 100%
Faixa da Inclinação 2:	OFF, 50 – 200%
Limite da Inclinação 1:	1 – 16,0 • TAP
Porcentagem de Bloqueio por 2º Harmônico:	OFF, 5 – 100%
Pickup do Elemento sem Restrição:	1,0 – 20,0 • TAP
Precisão do Pickup em Regime:	Modelo 5 A: ±0,1 A, ±5% Modelo 1 A: ±0,02 A, ±5%
Faixa do TAP:	$TAP_{MAX}/TAP_{MIN} \leq 7,5$ Modelo 5 A: 0,5–160,0 A sec. Modelo 1 A: 0,1–32,0 A sec.
Tempo de Pickup do Elemento de Restrição:	24/28/38 ms (Min/Tip/Max)
Tempo de Pickup do Elemento sem Restrição:	13/20/32 ms (Min/Tip/Max)

Nota: Precisões dos tempos de pickup a 60 Hz.

### Elementos Diferenciais de Terra Opcionais (87N) (Modelo 0300G0 e Modelo 0300G2)

Pickup do Diferencial de Terra:	Modelo 5 A: 0,10–15,00 A Modelo 1 A: 0,02–3,00 A
Relação CTR/CTRN:	1,0 – 40,0
Precisão do Pickup em Regime:	Modelo 5 A: ±0,05, ±3% Modelo 1 A: ±0,01, ±3%
Tempo de Pickup:	25 ms a 60 Hz (Máx.)
Temporizações:	0,00 – 400,00 s
Precisão da Temporização de Tempo-Definido	
Máxima:	±0,1%, ±4,2 ms a 60 Hz

### Elementos Opcionais de RTD (Modelos Compatíveis com o Módulo de RTDs Série SEL-2600)

12 entradas de RTDs via Módulo de RTDs Série SEL-2600 e Transceptor de Fibra Óptica SEL-2800	
Monitor das Temperaturas dos Enrolamentos, Mancal, Ambiente ou Outras Temperaturas.	
Compatível com os RTDs tipo PT 100, NI 100, NI 120 e CU 10, Seleccionáveis no Campo.	
Ajustes de Trip, Alarme e Compensação da Temperatura Ambiente/Corrente Carga.	
Até 500 m de Cabo de Fibra Óptica para o Módulo de RTDs Série SEL-2600.	
Faixa de Medição:	-50° a +250°C
Precisão:	±2°C

### Elementos do Amperímetro de Demanda

Constantes de Tempo do Amperímetro de Demanda:	5, 10, 15, 30 ou 60 min
Faixa dos Limites do Amperímetro de Demanda:	Modelo 5 A: 0,5 – 16,00 A Modelo 1 A: 0,1 – 3,2 A
Precisão do Pickup em Regime:	Modelo 5 A: ±0,05 A, ±3% Modelo 1 A: ±0,01A, ±3%

### Lógica de Energização Indevida

Temporizadores de Pickup e Dropout:	0,00 – 400,00 s
Precisão da Temporização de Tempo-Definido	
Máxima:	±0,1%, ±4,2 ms a 60 Hz

### Proteção contra Falha do Disjuntor

Implemente usando um elemento de sobrecorrente não dedicado e o Temporizador das Variáveis das Equações de Controle SELOGIC.	
Pickup do Sobrecorrente de Fase (A secundários):	Modelo 5 A: 0,25 – 100,00 A Modelo 1 A: 0,05 – 20,00 A
Precisão do Pickup em Regime:	Modelo 5 A: ±0,05 A, ±3% Modelo 1 A: ±0,01A, ±3%

Temporizadores de Pickup e Dropout:	0,00 – 3.000,00 s
Precisão da Temporização de Tempo-Definido	
Máxima:	±0,1%, ±4,2 ms

### Temporizadores das Variáveis das Equações de Controle SELOGIC

16 Temporizadores de Pickup e Dropout:	0,00 – 3.000,00 s
Precisão da Temporização de Tempo-Definido	
Máxima:	±0,1%, ±4,2 ms a 60 Hz