

**SOFTWARE BASEADO EM PROCESSAMENTO DE
SINAIS PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E
DIAGNÓSTICO DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS
A SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

RUBEN BARROS GODOY

CAMPO GRANDE

2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SOFTWARE BASEADO EM PROCESSAMENTO DE
SINAIS PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E
DIAGNÓSTICO DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS
A SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

RUBEN BARROS GODOY

Campo Grande, Dezembro de 2006.

**SOFTWARE BASEADO EM PROCESSAMENTO DE SINAIS
PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DIAGNÓSTICO
DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS A SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Ruben Barros Godoy

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Inteligência Artificial – Teoria e Aplicações em Sistemas de Energia*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campo Grande.’

João Onofre Pereira Pinto, Doutor
Orientador

João Onofre Pereira Pinto, Doutor
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

João Onofre Pereira Pinto, Doutor
Presidente

Carlos Alberto Canesin, Doutor

Paulo Irineu Koltermann, Doutor

Fausto D. Dantas, Doutor

“Dedico este trabalho a minha mãe, pelo amor, compreensão, e total apoio durante todos os momentos desta caminhada”.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, pela provisão de tudo que foi necessário para manter meu equilíbrio físico, mental e espiritual.

A minha mãe pelo incansável esforço, compreensão nas horas difíceis, sorrisos nos instantes de alegria e coragem nas horas dos desafios.

Ao meu pai (*in memoriam*) por me ensinar o valor da responsabilidade, o amor ao trabalho e por sempre lutar pelo sustento do lar.

A todos os familiares e amigos, pela valorização e amparo durante as difíceis crises que enfrentamos nestes últimos anos.

Ao professor Dr. João Onofre Pereira Pinto, que de maneira arrojada vem lutando para garantir um ensino de qualidade. Sua visão inovadora e corajosa tem possibilitado oportunidades incríveis a todos que o rodeiam.

Ao professor Msc. Sérgio Massafumi Okano, pelo apoio, amizade e me tirar do sufoco em situações que ele deve se lembrar muito bem.

Aos professores Dr. Paulo Irineu Koltermann, Dra. Luciana Cambraia Leite, Dr. Milton Ernesto Romero Romero e Dra. Kathya Silvia Collazos Linares, pelas disciplinas e consultorias concedidas durante a conclusão desta etapa tão importante.

Resumo da Dissertação apresentada à UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

SOFTWARE BASEADO EM PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS A SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Ruben Barros Godoy

Dezembro/2006

Orientador: João Onofre Pereira Pinto, Doutor.

Área de Concentração: Inteligência Artificial – Teorias e Aplicações em Sistemas de Energia.

Palavras-chave: Distúrbios, Processamento de Sinais, Qualidade de Energia.

Número de Páginas: 81.

O trabalho a seguir apresenta o desenvolvimento de um *software* denominado PQMON com aplicação voltada para diagnósticos de Qualidade de Energia. O *software* tem como objetivos detectar distúrbios em Sistemas Elétricos, classificá-los quanto ao tipo de distúrbio e diagnosticá-los apresentando possíveis fontes causadoras e soluções que possam mitigar conseqüências provenientes destas perturbações. O *software* foi desenvolvido utilizando principalmente técnicas de processamento digital de sinais. A Transformada *Wavelet* constitui-se a principal ferramenta para a detecção dos distúrbios. Com esta ferramenta é possível verificar, com boa precisão, o instante e duração de um fenômeno qualquer. O uso da estatística foi essencial para a classificação dos distúrbios nas classes já definidas pela literatura. Também são utilizadas técnicas de inteligência artificial para auxiliar este processo de classificação. O diagnóstico das possíveis causas das perturbações é realizado através de algoritmos de relação causa-efeito. Os resultados obtidos a partir da aplicação destes procedimentos apresentam-se satisfatórios, refletindo um desempenho equivalente ou superior a outros sistemas disponíveis na literatura.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

SOFTWARE BASED ON PROCESSING OF SIGNALS FOR DETECTION, CLASSIFICATION AND DIAGNOSIS OF ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS RELATED DISTURBANCES

Ruben Barros Godoy

December/2006

Advisor: João Onofre Pereira Pinto, PhD.

Area of Concentration: Artificial Intelligence – Theory and Applications in Energy Systems.

Keywords: Digital Signal Processing, Disturbances, Power Quality.

Number of Pages: 81.

This work presents the development of the software named PQMON with applications in Power Quality Diagnosis. The objectives of the software are to detect disturbances in Electrical Systems, classify them in some kind of disturbance and diagnose them to present the probable sources of disturbance and the solutions that can minimize consequences coming through these disturbances. The software was developed using mainly techniques in digital signal processing. The Wavelet Transform is the main tool to detect disturbances. With this transform is possible to verify, with high precision, the instant and the duration of any phenomenon. Techniques using statistics was essential to classify disturbances in classes already defined by literature. Artificial intelligence techniques are also used to auxiliary analyses in classification process. The diagnoses of probable causes of disturbances is realized through cause-effect algorithms. The obtained results were satisfactory, reflecting an equivalent or better performance than others available systems presented in literature.

Sumário

Agradecimentos.....	i
Sumário.....	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas.....	x
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Organização do Trabalho.....	3
2. Principais Distúrbios Associados à Qualidade de Energia.....	4
2.1 Transitórios.....	4
2.1.1 Transitórios Impulsivos	4
2.1.2 Transitórios Oscilatórios.....	4
2.2 Variações de Curta Duração	5
2.2.1 Interrupção de Curta Duração.....	5
2.2.2 Afundamento de Tensão.....	6
2.2.3 Elevação de Tensão	7
2.3 Variações de Longa Duração.....	9
2.3.1 Interrupções Sustentadas	9
2.3.2 Subtensões Sustentadas	9
2.3.3 Sobretensões Sustentadas	9
2.4 Desequilíbrio de Tensão	9
2.5 Distorções na Forma de Onda	11
2.5.1 Harmônicas.....	11
2.5.2 Interharmônicas	12
2.5.3 Ruídos.....	13
2.5.4 Nível CC	14
2.5.5 <i>Notching</i>	14
2.6 Flutuações de Tensões	15
2.6.1 Flutuações Aleatórias	15
2.6.2 Flutuações Repetitivas.....	16

2.6.3 Flutuações Esporádicas	16
2.7 Variações da Frequência.....	16
3. Relação entre Problemas de Qualidade de Energia e Equipamentos	19
3.1 Dispositivos de Eletrônica de Potência - Inversores	19
3.2 Dispositivos de Eletrônica de Potência – Fontes Chaveadas	19
3.3 Dispositivos a Arco	20
3.4 Chaveamento de Cargas	20
3.5 Partida de Grandes Motores	21
3.6 Fenômenos Naturais	21
3.7 Qualidade de Energia Associada a Equipamentos Sensíveis	22
4. Principais Ferramentas Matemáticas Utilizadas na Análise de Sinais	25
4.1 Análises Espectrais	25
4.1.1 <i>Fast Fourier Transform</i> (FFT):	25
4.1.2 <i>Short Time Fourier Transform</i> (STFT)	26
4.1.3 Periodograma Médio	27
4.1.4 <i>Discrete Wavelet Transform</i> (DWT)	28
4.2 Filtros.....	31
4.3 Estatística.....	32
4.4 Inteligência Artificial.....	33
4.4.1 Redes Neurais Artificiais Adaptativas.....	33
4.4.2 Lógica <i>Fuzzy</i>	34
5. Sistemas Relacionados a Análise e Diagnóstico de Qualidade de Energia.....	37
6. Sistema Proposto para Detecção, Classificação e Diagnóstico de Problemas de Qualidade de Energia	41
6.1 Estrutura do Sistema.....	41
6.1.1 Filtros Digitais	42
6.1.2 Análises de Espectros	42
6.1.3 Cálculos Estatísticos	43
6.1.4 Testes Binários	44
6.1.5 Inteligência Artificial.....	44
6.2 Detecção de Janelas de Eventos Transitórios e em Regime Permanente	45
6.3 Caracterização das Janelas de Sinais	46
6.4 Demais Análises	47

6.5 Associação às Fontes de Distúrbios	49
6.6 Aplicação do Diagnóstico de Falhas Múltiplas – Multiple Faults Diagnosis (MFD) 49	
6.6.1 Exemplo de MFD	51
7. Resultados.....	55
7.1 Casos Hipotéticos	59
7.1.1 Transitório Oscilatório Gerado por Banco de Capacitores Destinado a Correção de Fator de Potência	59
7.1.2 Variação de Tensão de Curta Duração Ocasionalada por Falta Monofásica na Fase Medida.....	63
7.1.3 Variação de Tensão de Curta Duração Ocasionalada por Falta Monofásica em Fase não Medida.....	65
7.1.4 Cargas Não Lineares Introduzindo Distorções Harmônicas.....	67
7.2 Caso Real.....	69
7.2.1 Sinal da Concessionária Enersul - Energias do Brasil.....	69
8. Conclusões.....	73
8.1 Sugestões de Trabalhos Futuros	75
Referências	77

Lista de Figuras

Figura 2.1. Transitório impulsivo na tensão durante acionamento de um interruptor.....	5
Figura 2.2. Transitório oscilatório na tensão durante chaveamento de banco capacitivo.	5
Figura 2.3. Interrupção momentânea durante curto-circuito.	6
Figura 2.4. Afundamento de tensão proveniente de falta fase-terra.....	7
Figura 2.5. Elevação de tensão proveniente de falta em uma das fases do sistema.	8
Figura 2.6. Desequilíbrio de tensão resultante de falta bifásica.	11
Figura 2.7. Distorção harmônica na tensão.	12
Figura 2.8. Tensão com presença de interharmônicas de 72Hz e 150Hz.....	13
Figura 2.9. Sinal ruidoso na saída de um inversor real.....	14
Figura 2.10. Presença de <i>notching</i> em tensão de alimentação de um conversor CA/CC....	15
Figura 2.11. Flutuações de tensão geradoras de efeito <i>Flicker</i>	16
Figura 2.12. Variação de frequência proveniente de instabilidade em máquina síncrona. .	17
Figura 4.1. <i>Wavelet daubechies 5</i>	30
Figura 4.2. Arquitetura genérica de uma <i>Adaline</i>	33
Figura 4.3. Exemplo de funções de pertinência para um sistema usando Lógica <i>Fuzzy</i>	35
Figura 6.1. Esquema geral do sistema implementado para detecção e diagnóstico de problemas de Qualidade de Energia.	42
Figura 6.2. Detecção de Intervalos Transitórios no Sinal.....	46
Figura 6.3. Variação do valor RMS, intervalos transitórios e intervalos de regime permanente que compõem o sinal.	48
Figura 6.4 Flutuação de tensão e envoltória para análises.	49
Figura 7.1. Janela do PQMON durante Processamento de Sinal.	55
Figura 7.2. Janela que apresenta o relatório do diagnóstico.....	57
Figura 7.3. Janela para listagem de cargas que compõem o sistema em análise.....	57
Figura 7.4. Painel para inclusão de cargas presentes no sistema.....	58
Figura 7.5. Sinais carregados para avaliação com o PQMON.	59
Figura 7.6. Resultados após análise prévia.....	60

Figura 7.7. PQMON em análise de sinal referente a chaveamento de Banco Capacitivo...	61
Figura 7.8. Diagnóstico simples do caso em análise.....	62
Figura 7.9. Diagnóstico seletivo do caso analisado.....	63
Figura 7.10. PQMON em análise de sinal referente à falta monofásica na fase medida. ...	64
Figura 7.11. Diagnóstico referente à condição de falta monofásica na fase medida.....	65
Figura 7.12. PQMON em análise de sinal referente à falta monofásica em fase não medida.	66
Figura 7.13. Diagnóstico referente à condição de falta monofásica em fase não medida...	66
Figura 7.14. Resultados encontrados para estimação de parâmetros da tensão.	67
Figura 7.15. PQMON em análise de simulação de carga não linear.	68
Figura 7.16. Diagnóstico referente à condição de presença de carga não linear.....	69
Figura 7.17. Resultados do PQMON em análise de sinais reais.	70
Figura 7.18. Possíveis cargas instaladas no BATLAB-1 para geração dos distúrbios verificados no caso real.	71
Figura 7.19. Possíveis cargas instaladas sem a presença de refinamento.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classes e Características típicas de Distúrbios em Sistemas Elétricos.....	18
Tabela 3.1– Classificação de Distúrbios considerando Causas, Efeitos e Soluções.	23
Tabela 6.1 – Matriz de Dependência para sistema hipotético.	52
Tabela 6.2 – Resultados de Probabilidades dos Conjuntos.	53
Tabela 6.3 – Tabela de Associação de Distúrbios às Fontes.	54

Lista de Abreviaturas

- QE – Qualidade de Energia Elétrica.
- EPRI – *Electric Power Research Institute*.
- CA – Corrente Alternada.
- CC – Corrente Contínua.
- FD – Fator de Desequilíbrio.
- THD – Taxa de Distorção Harmônica.
- FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier).
- STFT – *Short Time Fourier Transform* (Transformada de Fourier Janelada).
- DWT – *Discrete Wavelet Transform* (Transformada *Wavelet* Discreta).
- MRA – *Multi Resolution Analysis* (Análise em Multi-Resolução).
- MFD – *Multiple Faults Diagnosis* (Diagnóstico de Falhas Múltiplas).
- IS – Interrupção Sustentada.
- ICD – Interrupção de Curta Duração.
- SS – Subtensão Sustentada.
- AT – Afundamento de Tensão.
- SBS – Subtensão Sustentada.
- ET – Elevação de Tensão.
- TI – Transitório Impulsivo.
- TO – Transitório Oscilatório.
- RS – Ruídos.
- HS – Harmônicas.
- FT – Flutuação de Tensão.
- NCC – Nível CC.
- SH – Subharmônicas.
- VF – Variações da Freqüência Fundamental.
- PQMON – *Software* produto final deste trabalho.

1. Introdução

No exigente cenário de competição mundial buscam-se diversas maneiras para garantir que os recursos investidos tenham o maior rendimento. Procura-se a otimização da produção visando quantidade, qualidade e eficiência. Prejuízos advindos da falta de Qualidade de Energia Elétrica (QE) são consideráveis, e, desta forma, essa questão atualmente tem sido objeto de grande preocupação.

Fatores técnicos têm contribuído em conjunto para que maior atenção seja dedicada aos assuntos referentes à QE. Um dos grandes motivadores tem sido a considerável evolução tecnológica experimentada pelas cargas consumidoras, que tem exigido índices de qualidade cada vez mais próximos da idealidade. Um dos problemas principais nas indústrias têm sido os distúrbios nas tensões de fornecimento. Este problema na QE pode interromper a produção resultando em conseqüências com impactos econômicos indesejáveis. Pode-se confirmar em [1] que interrupções de curta duração ou afundamentos de tensão além de interromperem o processo de produção, “resetam” os controladores programáveis resultando num impacto que pode causar prejuízos ainda maiores.

Em contrapartida, muitas vezes o conjunto dessas cargas têm sido um dos agentes contribuintes na geração de distúrbios que empobrecem os índices de QE, dificultando ações corretivas e cumprimento de índices estabelecidos às próprias concessionárias de Energia Elétrica [2].

É importante observar que tanto consumidores quanto concessionárias têm boa parte das suas metas de faturamento resumidas na melhoria da Qualidade de Energia. Isso torna o assunto de interesse comum prevendo-se que será necessária, cada vez mais, a busca pela minimização de distúrbios que afetem a qualidade da energia.

Observa-se que a preocupação com a QE não se restringe unicamente ao Brasil. Um número relevante de publicações demonstra o interesse mundial tanto no aperfeiçoamento de técnicas e equipamentos de medição, assim como meios para correção de distúrbios em sistemas elétricos. Como exemplo verifica-se a implantação de sistemas de monitoramento em linhas de distribuição nos Estados Unidos. Tais sistemas visam a determinação de níveis de QE dos serviços fornecidos. Alguns fornecedores de energia diferenciam o serviço unicamente no preço, mantendo-o baixo para moderar expectativas no que diz respeito a qualidade do serviço prestado [3].

Estudos realizados na Europa em 1998 apontaram que vários problemas de QE, tais como, o elevado conteúdo harmônico nas tensões e correntes das instalações elétricas, sistemas mal aterrados e sobreaquecimento de condutores de fase e neutro, não eram considerados assuntos importantes, não estando associados aos custos adicionais para empresas de um modo geral [4]. Porém, segundo um relatório do EPRI (*Electric Power Research Institute*) os problemas relacionados com a qualidade de energia e interrupções no fornecimento custam à economia dos Estados Unidos mais de 119 bilhões de dólares por ano [5].

Em [6] pode-se verificar que sistemas de monitoramento capazes de identificar problemas de QE têm experimentado um considerável progresso utilizando técnicas de detecção avançadas, sendo que a maior dificuldade tem sido ainda conseguir meios capazes de analisar grandes quantidades de dados coletados.

Considerando a expansão do cenário energético mundial, a implantação cada vez mais acentuada de cargas não lineares e a crescente exigência por índices de qualidade por parte de consumidores e concessionários, justifica-se a implementação de sistemas voltados para o melhoramento da Qualidade de Energia. Desta maneira, resume-se o trabalho aqui proposto num *software*, ainda em sua primeira versão, denominado PQMON. O PQMON 1.0 atende os objetivos que serão estabelecidos a seguir, consistindo assim em uma importante ferramenta de auxílio nas tomadas de decisão envolvendo Qualidade de Energia, contribuindo para minimizar ou eliminar efeitos que comprometam equipamentos e/ou seres humanos.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento em ambiente MATLAB[®] capaz de detectar distúrbios relacionados a Qualidade de Energia e sugerir decisões que possam reduzir os impactos provenientes destas perturbações. O sistema não inclui a apresentação de índices de qualidade de energia.

1.2 Objetivos Específicos

O *software* PQMON 1.0 está associado a análises monofásicas e objetiva especificamente detectar distúrbios no sistema elétrico, classificá-los de acordo com suas características e finalmente diagnosticar as fontes causadoras das perturbações. Inclui possíveis ações que devam ser tomadas no sentido de limitar os efeitos conseqüentes destes distúrbios.

1.3 Organização do Trabalho

No primeiro Capítulo foi apresentada uma visão geral do trabalho proposto, discutindo qualitativamente a necessidade deste aplicativo. Posteriormente, no Capítulo 2, será feita uma breve revisão apresentando os principais conceitos referentes aos fenômenos mais comuns que interferem na Qualidade de Energia Elétrica. No Capítulo 3 serão discutidas as principais fontes de distúrbios em sistemas elétricos. O Capítulo 4 corresponderá a uma breve apresentação das principais ferramentas matemáticas utilizadas neste trabalho para o processamento digital de sinais. O Capítulo 5 conterà a revisão bibliográfica de estudos já realizados a fim de se ter análises de Qualidade de Energia em Sistemas Elétricos. Em seguida, no Capítulo 6, será proposto um modelo que reúna diferentes características e que atinja um produto final capaz de atender os objetivos pré-definidos. Detalhes referentes aos princípios de operação e filosofias estudadas serão abordados. O Capítulo 7 apresentará duas classes de resultados, sendo a primeira referente a distúrbios gerados computacionalmente em sistemas hipotéticos e a segunda valendo-se de um sinal real contendo distúrbios comuns do sistema elétrico. Estes resultados serão analisados e finalmente, no Capítulo 8, serão obtidas conclusões relevantes sobre os benefícios do *software* e estudos ainda a serem realizados.

2. Principais Distúrbios Associados à Qualidade de Energia

Como destacado no Capítulo anterior, a procura por soluções que melhorem os índices de QE é um interesse tanto do distribuidor de energia, que busca manter os seus clientes, como do usuário de energia elétrica, que quer garantir a produção. Atualmente uma grande diversidade de soluções está disponível para os problemas de QE. Equipamentos de monitoração de baixo custo estão sendo disponibilizados, possibilitando que com os dados captados os níveis da qualidade da energia possam ser avaliados.

Os itens seguintes introduzem as principais definições dos distúrbios ou ocorrências relacionadas à QE.

2.1 Transitórios

São perturbações momentâneas indesejáveis da tensão da fonte ou da corrente de carga. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, porém de grande importância, pois os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a oscilações razoáveis de tensão ou corrente. Os transitórios estão geralmente divididos em duas categorias: impulsivos e oscilatórios.

2.1.1 Transitórios Impulsivos

Alterações súbitas no sistema, refletindo nas formas de onda da tensão e corrente, sendo unidirecionais na polaridade. Geralmente é proveniente de descargas atmosféricas com frequências muito diferentes daquelas da rede elétrica. Os problemas caracterizados por esse tipo de distúrbio são a elevação do potencial do terra local e indução de tensões nos condutores de fase devido às correntes circularem pelos cabos a caminho do terra [7]. A Figura 2.1 ilustra uma simulação de um transitório impulsivo durante o chaveamento de um interruptor.

2.1.2 Transitórios Oscilatórios

Correspondem também a uma súbita alteração da tensão ou corrente, porém caracterizados por um conteúdo de frequência predominante, duração e magnitude da tensão. São bastante observados nos momentos de energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos capacitivos e transformadores [2]. A Figura 2.2 ilustra um transitório durante o chaveamento de um banco de capacitores.

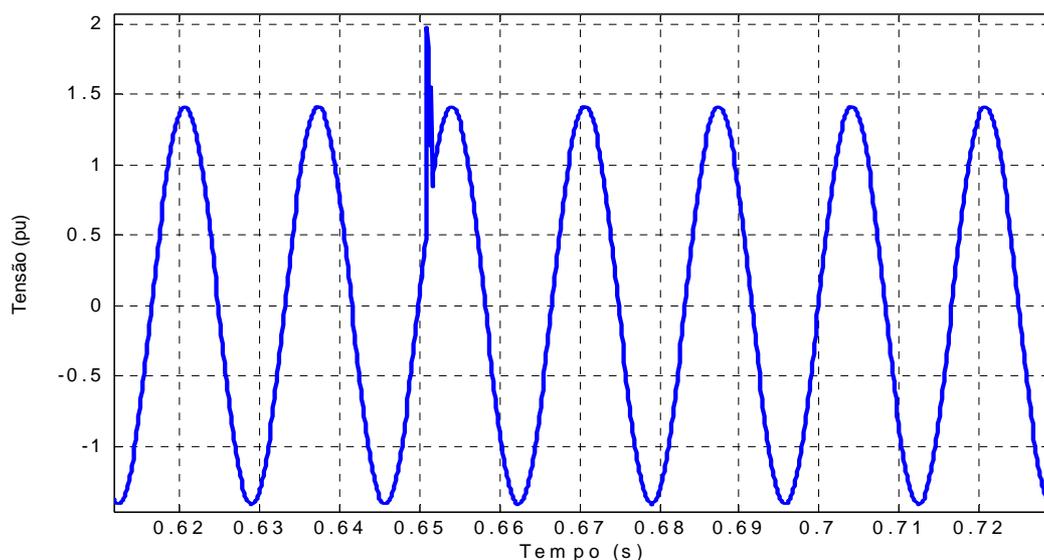


Figura 2.1. Transitório impulsivo na tensão durante acionamento de um interruptor.

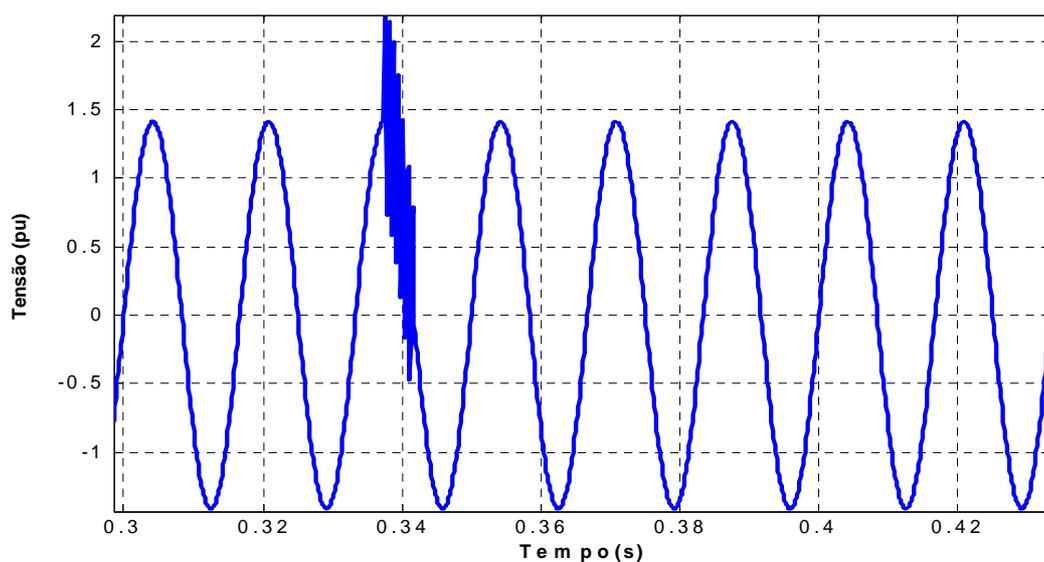


Figura 2.2. Transitório oscilatório na tensão durante chaveamento de banco capacitivo.

2.2 Variações de Curta Duração

2.2.1 Interrupção de Curta Duração

É definida como uma redução na tensão da fonte a níveis menores que 0,1 p.u. por um tempo não superior a 1 minuto. Interrupções podem ser causadas por faltas no sistema, falhas em equipamentos conectados ao sistema, ou mau funcionamento de sistemas de controle e proteção. As medidas de interrupções são comumente consideradas para avaliar

a qualidade da fonte fornecedora de energia [8]. A Figura 2.3 ilustra uma interrupção de curta duração durante um curto-circuito.

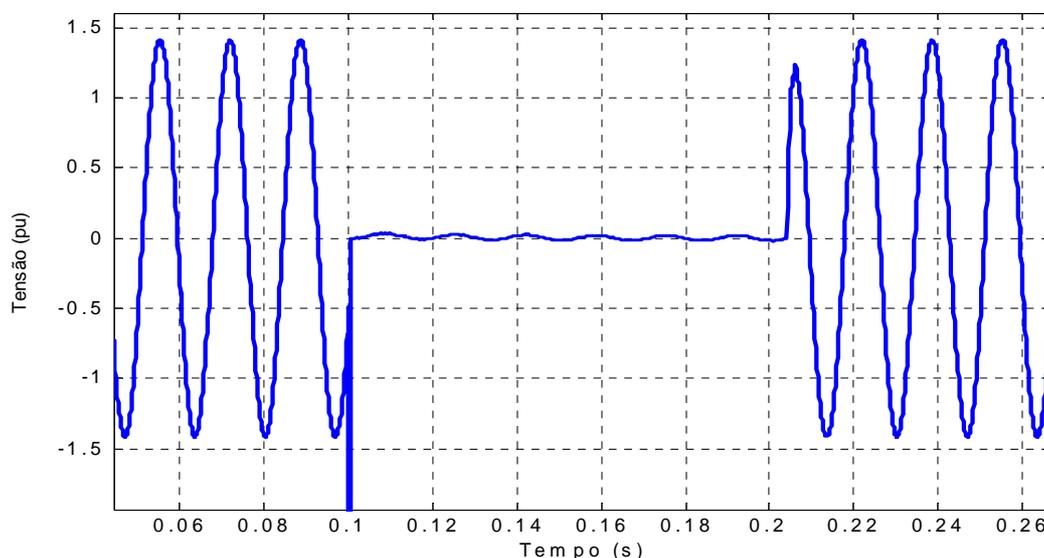


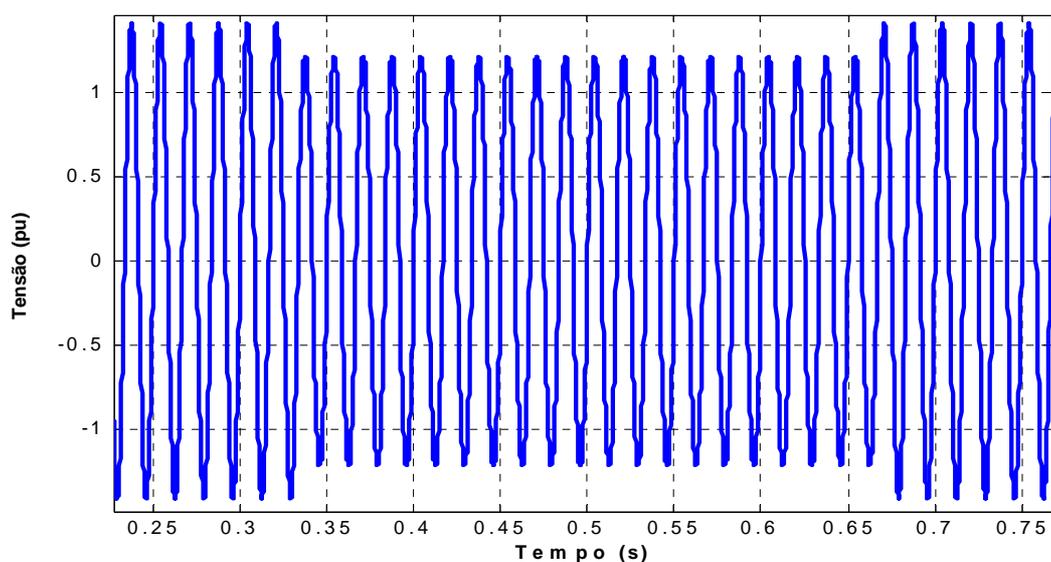
Figura 2.3. Interrupção momentânea durante curto-circuito.

2.2.2 Afundamento de Tensão

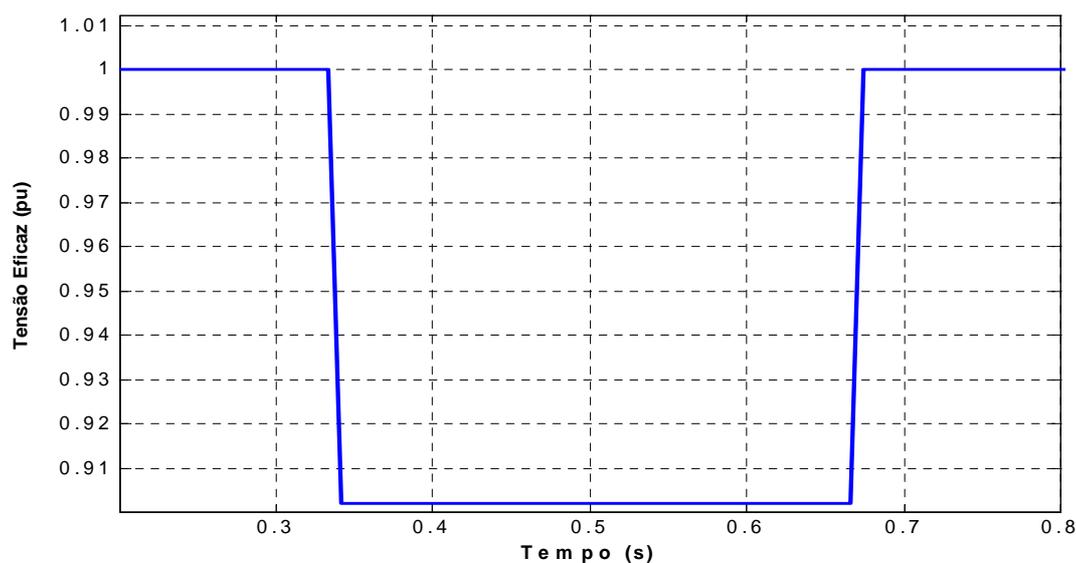
É a redução da tensão eficaz para valores entre 0,1 e 0,9 p.u. durante um intervalo maior que meio ciclo e menor que 1 minuto. Geralmente está associado a faltas, aumento considerável de demandas, magnetização de transformadores, ou durante a partida de grandes máquinas rotativas.

A Figura 2.4 ilustra uma subtensão de curta duração típica, oriunda de uma falta fase terra. Observa-se decréscimo para quase 90% do valor nominal por um período de 19 ciclos. Este é o tempo necessário para que o equipamento de proteção opere e elimine a corrente de falta.

É importante destacar que no caso citado anteriormente o distúrbio observado pode ser de responsabilidade da concessionária ou de um consumidor. O que distinguirá será simplesmente o local da falta, ou seja, caso a falta tenha ocorrido em um circuito da distribuidora de energia o distúrbio será responsabilidade da concessionária, porém se a falta for causada dentro de uma planta industrial a responsabilidade será do consumidor.



(a) Valores instantâneos de tensão durante afundamento.



(b) Valores eficazes de tensão durante afundamento.

Figura 2.4. Afundamento de tensão proveniente de falta fase-terra.

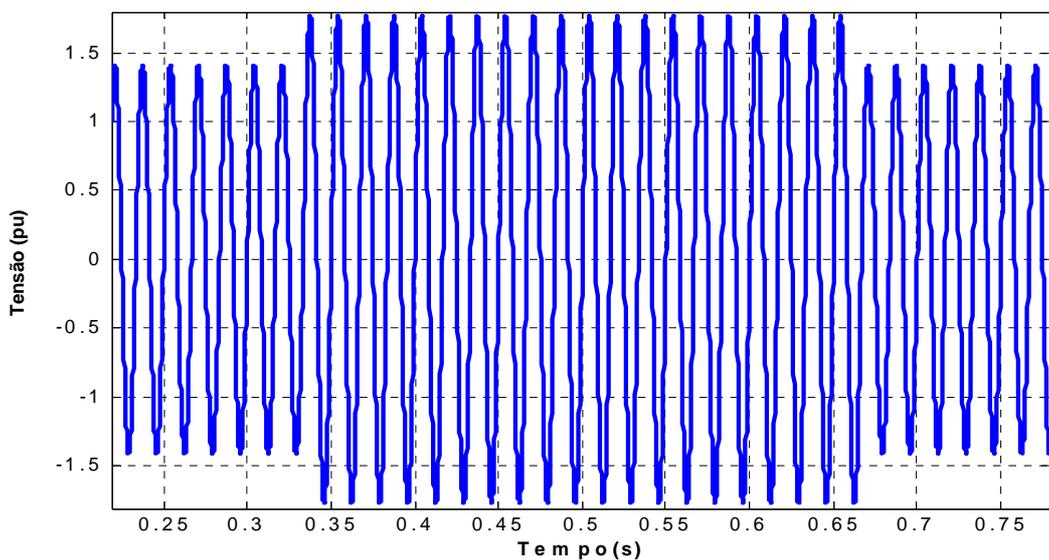
2.2.3 Elevação de Tensão

Um aumento no valor eficaz da tensão para uma faixa entre 1,1 e 1,8 p.u. por um tempo de duração superior a meio ciclo e menor que 1 minuto. Geralmente causado por faltas no sistema, chaveamento de cargas ou chaveamento de bancos capacitivos.

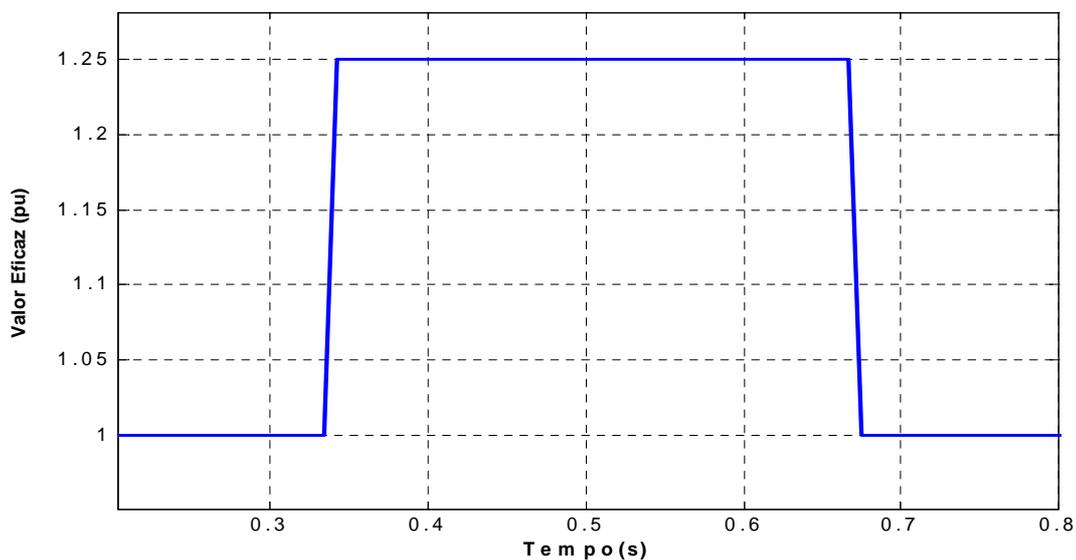
Importante observar que a gravidade de uma elevação de tensão é função de algumas variáveis, especialmente do local de falta, da impedância do sistema, e do

aterramento do mesmo. A duração da elevação dependerá do tempo de atuação do sistema de proteção, localização no alimentador e também da natureza da falta sofrida.

A Figura 2.5 ilustra uma elevação de tensão durante uma falta monofásica terra.



(a) Valores instantâneos durante elevação de tensão.



(b) Valores eficazes durante elevação de tensão.

Figura 2.5. Elevação de tensão proveniente de falta em uma das fases do sistema.

2.3 Variações de Longa Duração

2.3.1 Interrupções Sustentadas

Caso o fornecimento de tensão permaneça em valores inferiores a 0,1 p.u. por um tempo superior a 1 minuto, considera-se o distúrbio uma interrupção sustentada. Geralmente tais interrupções são permanentes necessitando de manutenção para corrigir o distúrbio e retornar o sistema às condições de operação normais.

2.3.2 Subtensões Sustentadas

É caracterizada como um decréscimo no valor eficaz da tensão CA para valores menores que 0,9 p.u. e maiores que 0,8 p.u. na frequência do sistema, com duração superior a 1 minuto. São decorrentes principalmente do carregamento excessivo de alimentadores e desligamento de bancos de capacitores que atuam como reguladores de tensão. Sistemas que possuem um número expressivo de cargas com baixo fator de potência também podem apresentar problemas de subtensões sustentadas. Isto ocorre porque o acréscimo de corrente para suprir o reativo contribui para as quedas de tensão nos alimentadores.

2.3.3 Sobretensões Sustentadas

Designa-se por sobretensão o aumento do valor eficaz da tensão CA (maior que 1,1 p.u. e menor que 1,2 p.u.) na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto. São decorrentes de situações inversas às subtensões, resultando geralmente do desligamento de grandes cargas e energização de bancos capacitivos.

2.4 Desequilíbrio de Tensão

É definido como a variação na magnitude ou fase de uma ou mais fases, de uma fonte trifásica, em relação à magnitude das outras fases e o ângulo padrão de fase de 120° [8]. Existem diversas maneiras para se calcular o fator de desequilíbrio (FD) entre fases. Uma opção seria utilizar a teoria de componentes simétricos aplicada às tensões entre fase e terra. A equação (2.1) expõe matematicamente este primeiro procedimento:

$$FD(\%) = \frac{|\vec{U}_{an} + a^2\vec{U}_{bn} + a\vec{U}_{cn}|}{|\vec{U}_{an} + a\vec{U}_{bn} + a^2\vec{U}_{cn}|} \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde \vec{U}_{an} , \vec{U}_{bn} e \vec{U}_{cn} , correspondem aos vetores contendo a amplitude e ângulo (fase) de cada fase do sistema e a corresponde ao operador que pode ser representado como o número complexo e^{j120° .

O método descrito pela equação (2.1), constitui-se numa opção bastante rigorosa para o cálculo percentual do FD. Um método mais simplificado é baseado unicamente na amplitude das tensões entre fases. Corresponderia a razão entre o máximo desvio de tensão (em relação à média entre fases) e a média das tensões entre fases. A equação (2.2) representa este processo matematicamente:

$$FD(\%) = \frac{\max([U_{ab} - M \quad U_{bc} - M \quad U_{ca} - M])}{M} \cdot 100 \quad (2.2)$$

onde U_{ab} , U_{bc} e U_{ca} correspondem a magnitude das tensões entre fases e M a média entre estas tensões. É válido destacar que o método de cálculo proposto pela equação (2.2) não é tão rigoroso quanto ao proposto pela equação (2.1). Estima-se que o erro agregado a este último seja em média de 13% [9] o que o exclui de cálculos cujos níveis de precisão sejam mais exigentes.

As origens dos desequilíbrios geralmente estão nos sistemas de distribuição. A presença de consumidores monofásicos, com diferentes características de potência, leva ao surgimento de tensões de seqüência negativa. O problema se agrava ainda mais quando consumidores alimentados de forma trifásica apresentam má distribuição dos seus circuitos internos. Isso resulta em correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas também podem ser resultado da queima de fusíveis em fases de bancos de capacitores trifásicos.

A Figura 2.6 apresenta um desequilíbrio envolvendo magnitude e fase. Este desequilíbrio específico ocorreu devido a uma condição de falta bifásica no Sistema Elétrico.

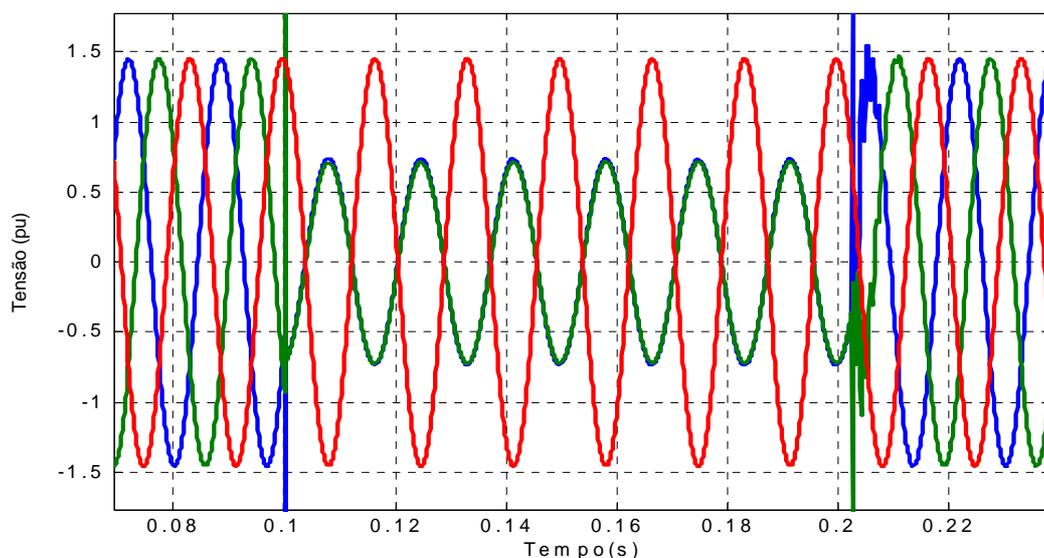


Figura 2.6. Desequilíbrio de tensão resultante de falta bifásica.

2.5 Distorções na Forma de Onda

2.5.1 Harmônicas

São distorções periódicas e senoidais na tensão da fonte ou corrente de carga. São causadas geralmente por cargas não lineares conectadas ao sistema. As harmônicas são medidas como múltiplos inteiros da frequência fundamental da fonte de alimentação. Utilizando a análise das séries de Fourier, as componentes de frequência do sinal distorcido podem ser descritas em termos de ordens harmônicas, amplitudes e fases de cada componente. A Figura 2.7 ilustra a distorção harmônica em um sinal de tensão.

A fim de mensurar quanto uma tensão ou corrente estão distorcidas pela presença de conteúdo harmônico, define-se a Taxa de Distorção Harmônica comumente conhecida como THD. O seu cálculo é processado de maneira bastante simples e está representado através da equação (2.3):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n c_i^2}}{c_1} \cdot 100 \quad (2.3)$$

onde c_i corresponde ao valor absoluto referente à cada componente harmônica e c_1 ao valor absoluto da fundamental.

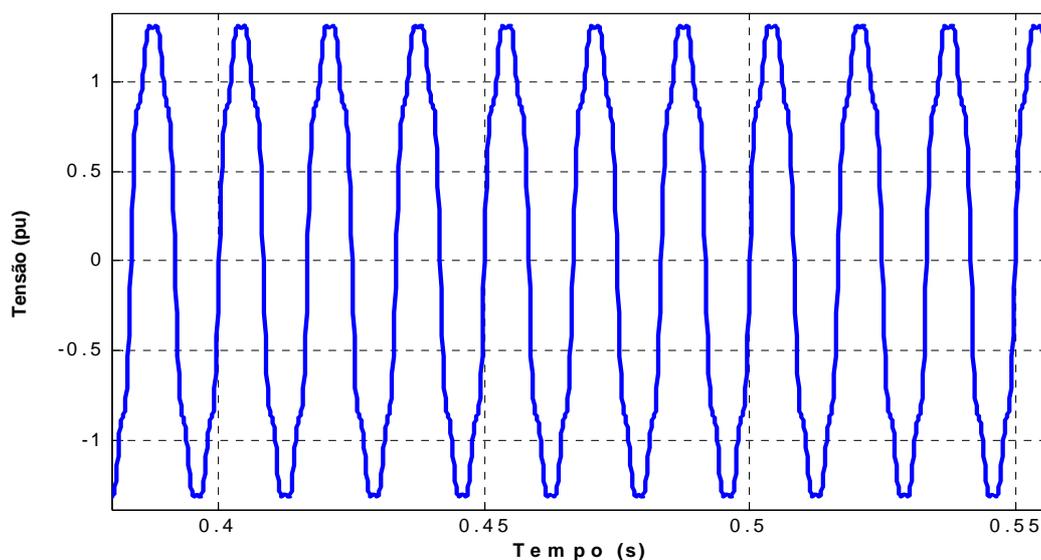


Figura 2.7. Distorção harmônica na tensão.

Algo importante a ser destacado é que harmônicos são fenômenos contínuos, não podendo ser confundidos com fenômenos de curta duração, que duram poucos ciclos. Altos níveis de distorção harmônica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias, para a própria instalação e para os equipamentos ali instalados. Em [10] é feita uma interessante análise sobre os efeitos das baixas frequências geradas por cargas conectadas à rede. São apontados limites para as distorções examinadas.

Correntes e tensões que contenham distorções de natureza senoidal porém que não são múltiplas inteiras da frequência fundamental são definidas como interharmônicas. Em casos especiais em que tais frequências são inferiores à frequência fundamental, elas são chamadas de subharmônicas [11].

2.5.2 Interharmônicas

Correspondem aos componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema em análise. Podem apresentar valores de frequências discretos ou estarem dispersos ao longo de uma ampla faixa de frequência. Podem ser encontrados em redes com qualquer classe de isolamento e têm os equipamentos a arco como seus principais causadores. A Figura 2.8 mostra uma tensão com conteúdos de frequência adicionais de 72Hz e 150Hz.

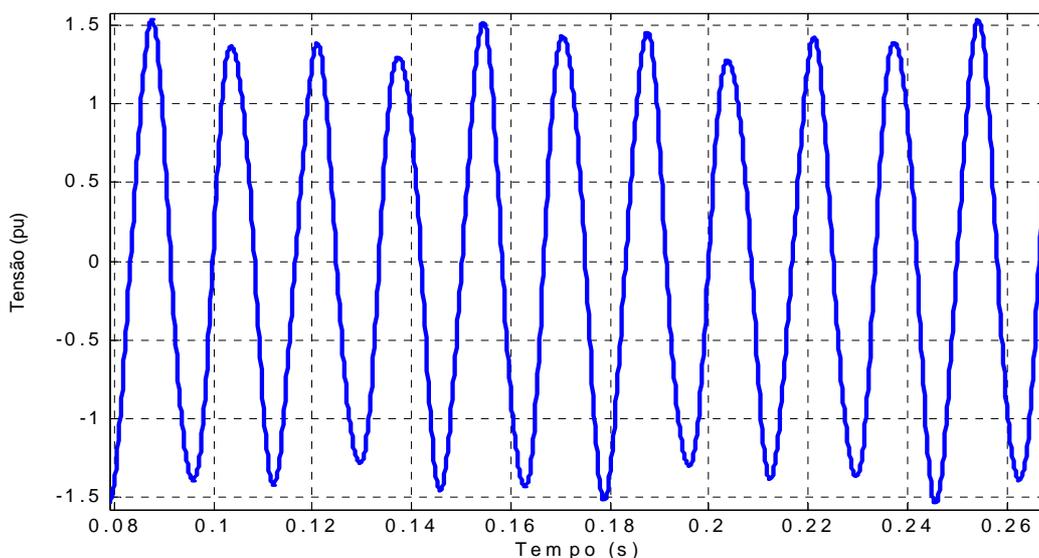


Figura 2.8. Tensão com presença de interharmônicas de 72Hz e 150Hz.

2.5.3 Ruídos

Podem ser definidos como sinais elétricos não desejáveis, com ampla faixa de frequências, superpostos a tensão ou corrente do sistema. Estão presentes em qualquer circuito podendo ter origem a partir de equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas. Aterramentos mal dimensionados também podem contribuir para o aumento de ruídos, por acabarem funcionando como antenas que propagam frequências indesejáveis ao sistema elétrico.

A faixa de frequência predominante e o nível da amplitude dos ruídos dependem da maneira como foram gerados. Geralmente apresentam amplitudes inferiores a 1% da tensão fundamental. Os ruídos podem afetar o correto funcionamento de equipamentos eletrônicos como microcomputadores e controladores programáveis. Geralmente são utilizados filtros, condicionadores de linha e transformadores isoladores para minimizar o efeito dos ruídos. Um sinal real com um modesto nível de ruído é observado na Figura 2.9.

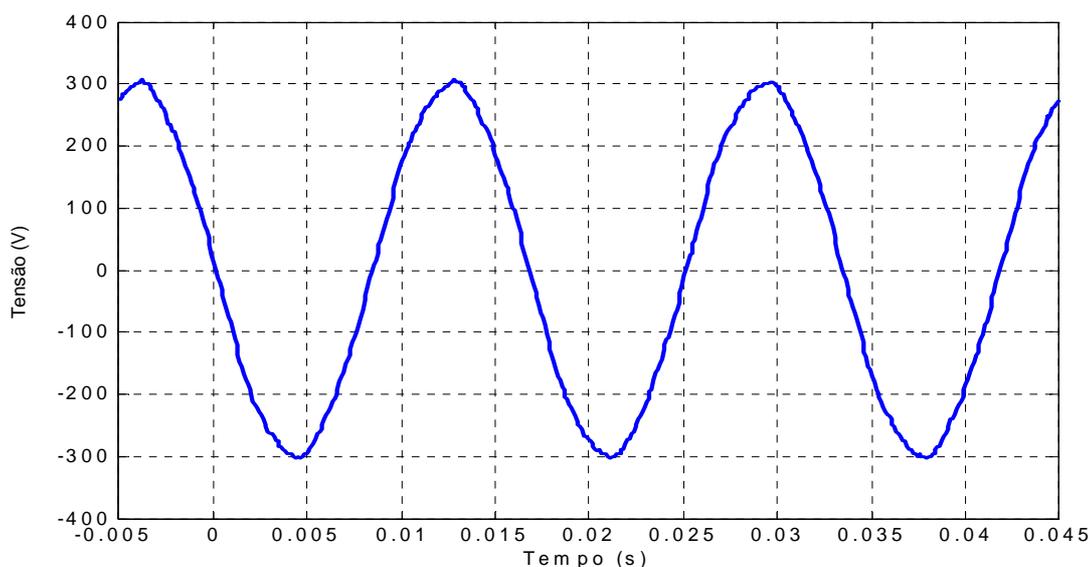


Figura 2.9. Sinal ruidoso na saída de um inversor real.

2.5.4 Nível CC

Nos sistemas elétricos em geral o nível CC é considerado um distúrbio uma vez que as tensões e correntes que circulam pelas linhas de transmissão devem apresentar em tese valor médio igual a zero (ou muito próximo disto). Importante observar que este *offset* pode estar presente tanto em tensões como em correntes. O nível CC em correntes alternadas pode levar a saturação de componentes indutivos, resultando em aumento de perdas e diminuição da vida útil. Promove também corrosão de eletrodos e conectores. Este fenômeno pode estar associado à presença de cargas não lineares tais como equipamentos a arco e retificadores de meia onda [12].

2.5.5 Notching

Notching é um distúrbio de tensão ocasionado por operação inadequada dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante este período ocorre um curto-circuito momentâneo entre duas fases levando a tensão a aproximar-se de zero tanto quanto as impedâncias do sistema permitam. Por ocorrer continuamente, pode ser caracterizado pelo espectro harmônico da tensão afetada. Geralmente as componentes de frequência associadas com o fenômeno *notching* são altas e não podem ser prontamente caracterizados pelos equipamentos de medidas normalmente usados para análise de harmônicos. A Figura 2.10 mostra a forma com que o *notching* se manifesta.

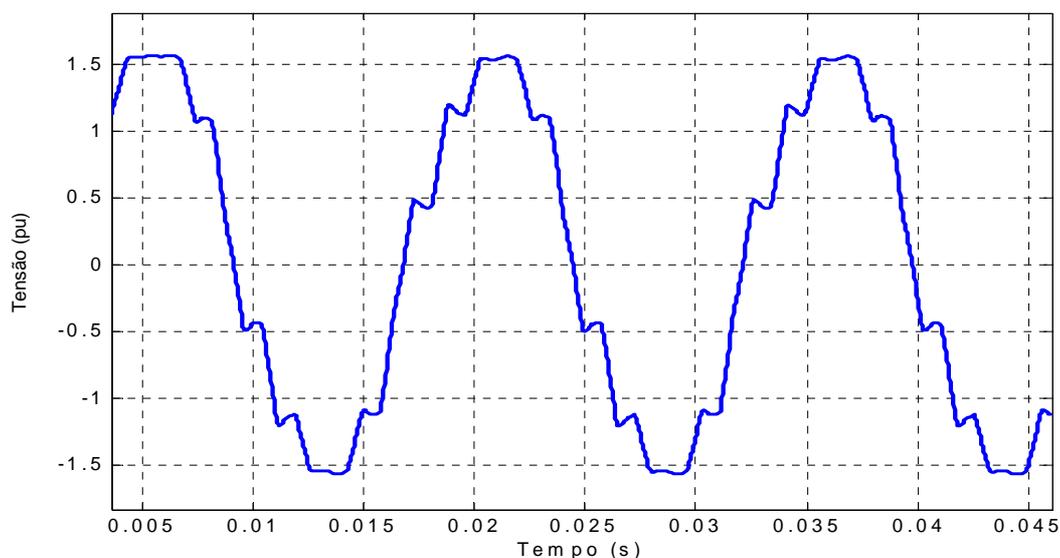


Figura 2.10. Presença de *notching* em tensão de alimentação de um conversor CA/CC.

2.6 Flutuações de Tensões

São variações sistemáticas dos valores eficazes de tensão, ou uma série de mudanças aleatórias, cujas magnitudes normalmente não excedem faixas entre 0,95 e 1,05 p.u.

Embora apresentem efeitos negativos no rendimento de máquinas rotativas e provoquem interferências em sistemas de proteção, a cintilação luminosa advinda das flutuações é a conseqüência que merece maior destaque (devido ao desconforto visual que causa). Este efeito visual proveniente de pequenas variações de tensão em equipamentos que emitem luz (particularmente lâmpadas de filamento de tungstênio) é conhecido como efeito *Flicker*. A faixa de frequência dos distúrbios que afetam essas aplicações, capazes inclusive de serem detectadas pelo olho humano, é de 1 a 30Hz [8].

As flutuações de tensão podem ser caracterizadas em diferentes formas: flutuações aleatórias, flutuações repetitivas e flutuações esporádicas [7].

2.6.1 Flutuações Aleatórias

Os fornos a arco são os equipamentos mais associados a essas flutuações. As amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e também do nível de curto-circuito da instalação [7].

2.6.2 Flutuações Repetitivas

Laminadores, máquinas de solda, elevadores de minas e ferrovias, correspondem as principais fontes geradoras de flutuações desta natureza [7].

2.6.3 Flutuações Esporádicas

De acordo com OSLESKOVICZ [7], a partida de grandes motores consiste na principal fonte causadora destes distúrbios. Os efeitos sofridos pelo sistema elétrico devido a esses fenômenos são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento nos equipamentos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito *Flicker* ou cintilação luminosa. Em relação aos efeitos em motores elétricos, o conjugado desenvolvido é proporcional ao valor eficaz da tensão, sendo assim, tensões flutuantes resultam em torques oscilantes no eixo.

A Figura 2.11 ilustra um gráfico com flutuações de tensão comuns em sistemas elétricos que podem ser observadas visualmente através da cintilação.

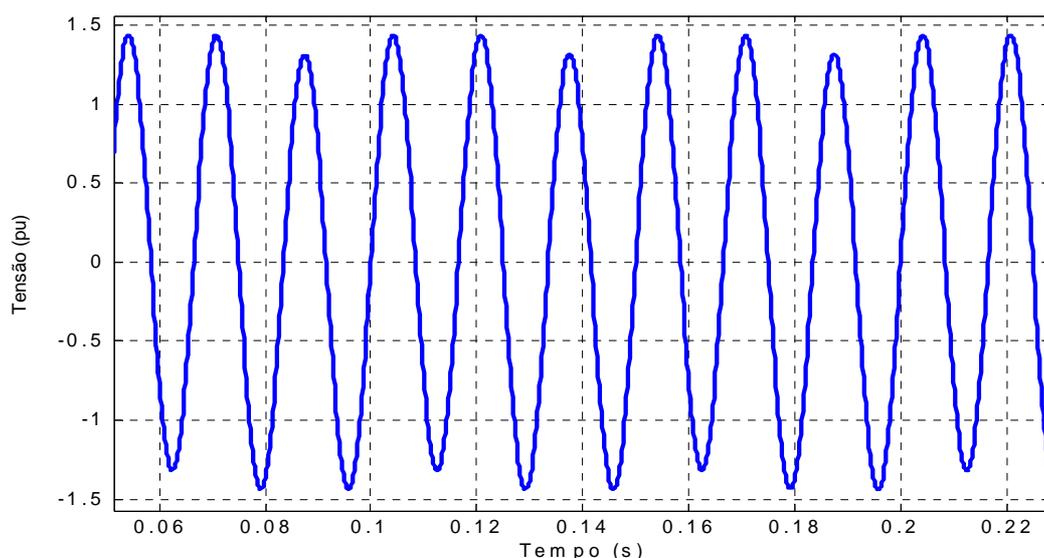


Figura 2.11. Flutuações de tensão geradoras de efeito *Flicker*.

2.7 Variações da Frequência

Simplemente variações da frequência nominal, para cima ou para baixo de um nível pré-determinado. Normalmente o nível encontra-se entre $\pm 0,1\%$. Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente, podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga, ou pela saída de uma grande fonte de geração. Em sistemas isolados, ou seja, que tenham sua

própria geração, a magnitude e o tempo das máquinas operando fora da velocidade resultam em desvios da frequência mais significativos [13]. Na Figura 2.12, além de outros distúrbios, também é possível observar a variação da frequência fundamental do sistema devido a uma simulação de instabilidade numa máquina síncrona.

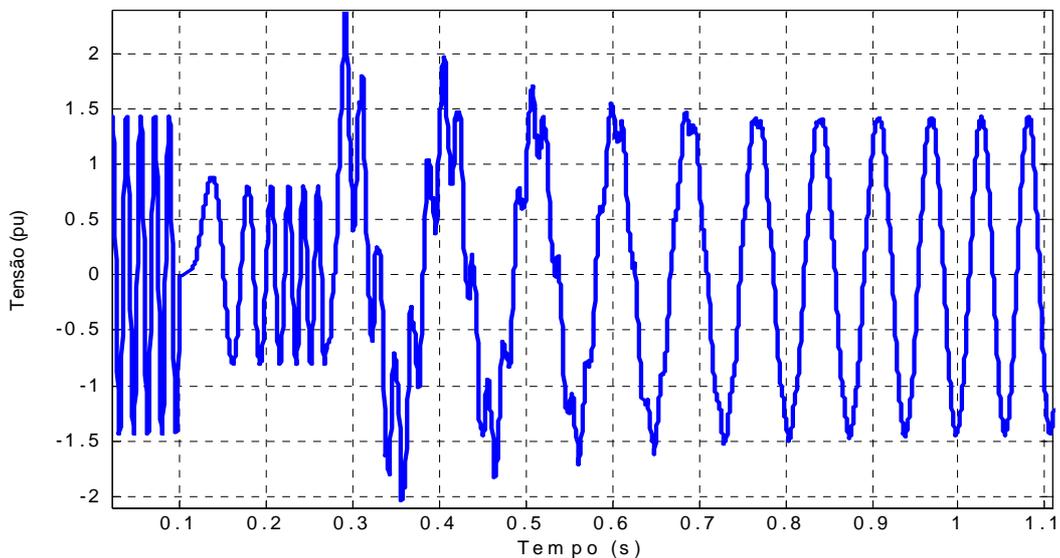


Figura 2.12. Variação de frequência proveniente de instabilidade em máquina síncrona.

A Tabela 2.1 resume as principais características dos distúrbios mais comuns que contribuem para a deterioração da Qualidade de Energia. São destacados o conteúdo espectral, duração típica e amplitude de cada distúrbio [14].

Tabela 2.1 – Classes e Características típicas de Distúrbios em Sistemas Elétricos.

Fenômeno	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Amplitude Típica
Transitórios			
Impulsivos	ns	< 50 ns	
	µs	50 ns – 1 ms	
	ms	> 1 ms	
Oscilatórios	Baixa Freqüência	3 – 50 ms	0,4 p.u.
	Média Freqüência	20 µs	0,4 p.u.
	Alta Freqüência	5 µs	0,4 p.u.
Variações de Curta Duração			
Instantânea	Afundamento	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
	Elevação	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
Momentânea	Interrupção	0,5 ciclo – 3 seg.	< 0,1 p.u.
	Afundamento	30 ciclos – 3 seg.	0,1 – 0,9 p.u.
	Elevação	30 ciclos – 3 seg.	1,1 – 1,4 p.u.
Temporária	Interrupção	3 seg. – 1 min.	< 0,1 p.u.
	Afundamento	3 seg. – 1 min.	0,1 – 0,9 p.u.
	Elevação	3 seg. – 1 min.	1,1 – 1,2 p.u.
Variações de Longa Duração			
	Interrupção Sustentada	> 1 min.	0,0 p.u.
	Subtensão Sustentada	> 1 min.	0,8 – 0,9 p.u.
	Sobretensão Sustentada	> 1 min.	1,1 – 1,2 p.u.
Desequilíbrio de Tensão			
	Desbalanço de Magnitude		
	Desbalanço de Fase	RP	0,5 – 2%
Distorção da Forma de Onda			
	Harmônicos	Ordem 0 a 100	RP
	Interharmônicos	0 – 6kHz	RP
	Ruído	Faixa ampla	RP
	Nível CC		RP
	<i>Notching</i>	Altas freqüências	RP
Flutuação de Tensão			
Varição da Freqüência do Sistema			
	< 25kHz	intermitente	0,1 – 7%
		< 10 s	

Fonte: *Electrical Power Systems Quality*, 2ª Edição, pg. 14.

3. Relação entre Problemas de Qualidade de Energia e Equipamentos

Do ponto de vista da geração dos distúrbios que afetam a QE, eles podem ser originados de diversas maneiras. Tanto os equipamentos das empresas concessionárias como de consumidores podem ser fontes ativas destas perturbações. Em se tratando da exigência de QE, existem equipamentos mais robustos que garantem imunidade considerável aos distúrbios que possam existir no sistema elétrico. Por outro lado, o crescente desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados tem feito com que estes sejam altamente susceptíveis aos problemas de QE. A seguir serão descritas algumas classes de agentes geradores de distúrbios no sistema elétrico. Será apresentada também uma breve descrição das normas associadas à qualidade de energia a fim de atender satisfatoriamente os equipamentos considerados sensíveis.

3.1 Dispositivos de Eletrônica de Potência - Inversores

Dispositivos baseados em eletrônica de potência, são cargas não lineares que criam distorções harmônicas e podem ser susceptíveis a afundamentos de tensões se não estiverem adequadamente protegidos. O problema de qualidade de energia mais comum, com impacto econômico considerável, está associado aos dispositivos de acionamento de motores com velocidade variável. Tais dispositivos, também identificados como inversores, são extremamente sensíveis a distúrbios relacionados a afundamentos de tensão e causam problemas particulares em processos industriais onde a perda de sincronismo é indesejável. A solução mais adequada para problemas dessa natureza seria especificar equipamentos que apresentem determinado nível de susceptibilidade a afundamentos de tensão [8]. Em [15] são apresentadas as técnicas utilizadas pela *Scottish Power* a fim de melhorar os índices de Qualidade de Energia em suas redes de transmissão. Este artigo detalha o quanto as soluções encontradas são estratégicas e colaboram para ajudar tanto o operador de energia (concessionária) quando os clientes para transpor efetivamente os problemas relacionados a falta de QE devido às cargas não lineares.

3.2 Dispositivos de Eletrônica de Potência – Fontes Chaveadas

A alimentação dos equipamentos de informação em geral consiste de fontes chaveadas e esta tem sido a causa de um aumento considerável nos níveis de 3^a, 5^a e 7^a

harmônicas presentes nas tensões. Devido à 3^a harmônica ser de ordem tripla ela apresenta o inconveniente de adicionar distorções consideráveis nas correntes de neutro. O crescimento do uso destes equipamentos tem provocado em muitos sistemas as sobrecargas dos condutores neutros e também sobreaquecimento de transformadores.

Os projetos elétricos recentes têm apresentado o uso crescente de fontes chaveadas em aplicações de iluminação com lâmpadas fluorescentes. Estas lâmpadas estão presentes atualmente em pelo menos 50% dos edifícios. Muitas construções comerciais estão minimizando os efeitos da 3^a harmônica utilizando cabos de neutro com seções bem superiores às fases. Em [16] podem ser verificados os principais problemas relacionados às harmônicas presentes em edifícios. É apresentada uma faixa ampla de implicações práticas relacionadas às harmônicas existentes em cargas comuns às edificações atuais.

3.3 Dispositivos a Arco

Fornos a arco, soldadores elétricos e lâmpadas de descarga são praticamente os equipamentos que utilizam arcos elétricos para operação. Estes dispositivos são cargas não lineares de grande impacto. A forma de onda da corrente é caracterizada pela corrente de arco que é limitada unicamente pela impedância do sistema. Muitos fornos a arco apresentam correntes típicas de operação em torno de 10 kA, soldadores drenam correntes da ordem de centenas de Amperes, já lâmpadas de descarga contribuem individualmente com correntes da ordem de 1A. Vale lembrar, obviamente, que estas últimas correspondem a uma porcentagem razoável das cargas de iluminação comercial e pública, tendo assim impacto significativo na QE. Em [17] podem ser encontradas soluções para problemas referentes a esses distúrbios.

Todos dispositivos a arco são fontes de distorção harmônica. Geralmente os problemas oriundos destes dispositivos são difíceis de minimizar. O balanço de fases com outros fornos nem sempre produz resultados satisfatórios uma vez que os fornos podem operar em diferentes modos. Soldadores a arco causam transitórios na rede devido ao chaveamento intermitente e deste modo, equipamentos nas proximidades necessitam de proteção contra os picos impulsivos gerados [8].

3.4 Chaveamento de Cargas

O chaveamento de cargas pesadas em sistemas elétricos causa uma série de transitórios que podem influenciar o funcionamento de outros equipamentos conectados ao sistema. Estes transitórios, embora possam atingir valores elevados de tensão ou corrente,

apresentam pouca energia devido sua pequena duração. Dispositivos eletrônicos que são sensíveis a esses impulsos de tensões podem ter suas operações comprometidas.

3.5 Partida de Grandes Motores

Os motores de indução drenam correntes diferentes dependendo do modo de operação; durante a partida esta corrente atinge valores que podem ser seis vezes maiores que a corrente nominal do motor. Estes aumentos momentâneos de corrente causam afundamentos de tensão. Esta situação de distúrbio se mantém até que o motor atinja sua velocidade nominal. Para muitos motores aplicam-se técnicas de partida através de conversores colocando as correntes em níveis razoáveis. Alguns motores com potências menores utilizam capacitores ou resistores em série a fim de reduzir esta sobrecarga de partida. Estes componentes são retirados do circuito a partir do instante que o motor atinge sua rotação nominal. É bastante comum também a utilização de autotransformadores para partida de máquinas rotativas. Os autotransformadores possibilitam a adequação controlada da tensão do estator do motor, sendo capazes de controlar a corrente a ser drenada.

3.6 Fenômenos Naturais

Descargas atmosféricas são causas comuns de sobretensões transitórias levando a faltas na rede elétrica. Necessariamente as descargas não precisam atingir os condutores para gerar distúrbios na rede. Basta que estes fenômenos se processem com certa proximidade dos condutores para que correntes sejam induzidas, levando a condições de operação indesejáveis. O potencial da terra eleva-se nas mediações onde se tenha incidido a descarga, levando a condução de correntes através de neutros aterrados. Isto pode desencadear em efeitos destrutivos em cargas sensíveis. Caso as descargas atmosféricas atinjam os cabos, além dos danos elétricos, danos físicos também podem ocorrer (é comum, por exemplo, o rompimento dos isoladores). É importante destacar que a incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão não desencadeia somente sobretensões, mas também subtensões, faltas e interrupções.

Ventos de alta velocidade bem como tempestades podem causar a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Estas interrupções podem ser oriundas do desligamento dos sistemas de proteção que atuam após condições de falta, ou então através de interrupções permanentes devido a rompimento de cabos ou estruturas utilizadas na transmissão de energia. Interrupções de longa duração geralmente comprometem grandemente os índices de qualidade das concessionárias de energia.

Linhas de transmissão próximas a mares ou oceanos podem apresentar arcos elétricos entre seus condutores. Isso ocorre devido ao alto índice de salinidade no ar, tornando-o ionizado e diminuindo a rigidez dielétrica. Em regiões com essas intempéries, os condutores e isoladores devem estar limpos constantemente. Regiões muito quentes, úmidas ou com muita poeira podem também apresentar alterações na rigidez dielétrica do ar, conduzindo ao rompimento dos níveis de isolação.

Consiste também em um grave problema associado à QE, especialmente em áreas rurais, o contato de pássaros em circuitos de linhas vivas. Em regiões como o Pantanal, nos estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, a incidência de faltas é relativamente alta devido a pássaros de grande envergadura provocarem curto-circuito em linhas de transmissão. Além desses, outros animais costumam construir suas moradias em torres e postes podendo também contribuir para danos que comprometam consideravelmente a QE da região.

3.7 Qualidade de Energia Associada a Equipamentos Sensíveis

Se não fosse o aumento do uso de equipamentos sensíveis o estudo de QE não teria se tornado uma regra nos últimos anos. Os equipamentos desenvolvidos atualmente têm se tornado mais sofisticados e menos robustos às variações na QE. Atualmente existem muitas teorias que procuram definir equipamentos sensíveis com base nos efeitos da QE sobre os mesmos. Na realidade, dispositivos que possuam memória volátil para armazenamento de informações estão sujeitos a danos frente a quaisquer distúrbios no sistema elétrico.

Muitos processos industriais dependem de sistemas de controle microprocessados. Distúrbios na QE podem ter seus efeitos reduzidos utilizando sistemas de proteção isolados, não sujeitando os processos em questão aos problemas mais comuns.

De acordo com STONES e COLLINSON [8] grande parte dos problemas que acometem as cargas sensíveis está relacionada à incompatibilidade de normas. No caso citado, mostra-se que a norma norte-americana EN 61000-3 caracteriza todos os requisitos a serem cumpridos referentes à compatibilidade eletromagnética. Já a norma americana EN 50160 detalha as características de tensão dos sistemas públicos de distribuição. O problema é que equipamentos fabricados dentro dos limites impostos pela EN 61000-3 estão sujeitos a sérios danos se conectados em redes elétricas que atendam a norma EN 50160.

A Tabela 3.1 contém um resumo dos principais distúrbios, apresentando suas causas e possíveis soluções.

Tabela 3.1– Classificação de Distúrbios considerando Causas, Efeitos e Soluções.

Tipo do Distúrbio	Descrição	Possíveis Causas	Efeitos	Soluções
Interrupção de Energia	Total interrupção do fornecimento de energia.	Acidentes, ações da natureza, etc, os quais requerem a devida operação dos equipamentos da concessionária (fusíveis, religadores, etc).	Saída ou queda do sistema. Perda de memória de controladores e computadores. Avaria de Hardware.	Suprimento de Energia Ininterrupta (UPS). Gerador de emergência (interrupção permanente).
	Interrupção momentânea: permanece de meio ciclo até 3 seg.			
	Interrupção temporária: Permanece de 3seg. a 1 minuto.	Curto-Circuitos Internos requerendo a devida operação dos disjuntores e fusíveis ao nível do consumidor.	Avaria na produção.	
	Interrupção Permanente: Permanece por período superior a 1 minuto.			
Transitório	Alterações súbitas nas formas CA, resultando num abrupto, mas breve aumento da tensão.	Tempestades (relâmpagos), operação de fusíveis, religadores e disjuntores da concessionária.	Erros de processamento e perda de dados. Queima de placas de circuitos, dano ao isolamento e avaria nos equipamentos elétricos.	Pára-raios. UPS (<i>Uninterruptible Power Supply</i>). Transformadores de isolamento. Transformador de tensão constante.
		Causas internas são a entrada ou saída de grandes equipamentos e chaveamento de capacitores.		
Afundamento e Elevação de Tensão	Qualquer decréscimo (afundamento) ou aumento (elevação) na tensão por um período de tempo entre meio ciclo e 1 minuto . Afundamentos de tensão correspondem a 87% de todos os distúrbios observados em um sistema de energia (fonte: Bell Labs).	Parada ou partida de equipamentos pesados (alta carga). Curto-Circuitos.	Perda de memória e erro de dados. Parada de equipamentos.	UPS (<i>Uninterruptible Power Supply</i>). Transformador de tensão constante.
		Falhas de equipamentos ou chaveamentos da concessionária.	Oscilações luminosas. Redução da vida útil e diminuição da velocidade dos motores.	Reguladores de Tensão.

Ruído	Sinal elétrico indesejável, de alta frequência, que altera a forma senoidal da onda fundamental da fonte.	Interferência da transmissão de rádio ou televisão.	Perda de dados e erros de processamento.	UPS (<i>Uninterruptible Power Supply</i>).
		Operação de equipamentos eletrônicos.	Recepção distorcida de sinais (áudio e vídeo).	Transformador de isolamento. Filtros de linha.
Distorção Harmônica	Alteração no padrão normal da tensão (forma senoidal) devido a equipamentos gerando frequências diferentes da frequência das ondas de tensão do sistema elétrico.	Dispositivos eletrônicos, cargas não lineares.	Aquecimento de equipamentos e condutores elétricos.	Filtros harmônicos.
			Decréscimo do desempenho de motores.	Transformadores de isolamento.
			Operação indevida de disjuntores, relés ou fusíveis.	Melhoras nos condutores e no aterramento.
				Cargas isoladas. Reatores de linha.
Subtensão e Sobretensão Sustentada	Qualquer alteração abaixo ou acima do valor nominal da tensão que persista mais do que 1 minuto.	Sobrecargas nos equipamentos e condutores. Flutuações de grandes cargas ou taps dos transformadores incorretamente ajustados. Condutor desenergizado ou com falta. Conexões elétricas indevidas.	Ofuscamento no brilho da luz.	UPS (<i>Uninterruptible Power Supply</i>).
			Parada de equipamentos.	Transformador de tensão constante.
			Sobreaquecimento de motores.	Distribuição de equipamentos.
			Vida ou eficiência reduzida de equipamentos.	Motores de tensões reduzidas.

Fonte: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, Julho de 2004.

4. Principais Ferramentas Matemáticas Utilizadas na Análise de Sinais

Com base em [18] pode-se observar importantes técnicas que são utilizadas em análises de sinais para diagnósticos de QE. A combinação destas ferramentas é capaz de identificar uma grande quantidade de distúrbios que podem ocorrer em sistemas elétricos. Na seqüência as principais ferramentas serão resumidamente apresentadas.

4.1 Análises Espectrais

A aplicação de transformações que permitam avaliar o comportamento dos sinais no domínio da frequência é de suma importância em processamento de sinais. A seguir serão brevemente descritas as principais técnicas utilizadas na extração de conteúdos espectrais de sinais.

4.1.1 Fast Fourier Transform (FFT):

A FFT é um algoritmo eficiente para calcular a Transformada de Fourier Discreta e a sua inversa. É uma transformada de grande importância em muitas aplicações como no processamento digital de sinais e em soluções de equações diferenciais parciais.

A Transformada Discreta de Fourier calcula a seqüência $X[k]$ de N valores complexos a partir de uma outra seqüência de dados $x[n]$, com comprimento N . Para essa transformação utiliza-se uma base $W_N = e^{-j2\pi/N}$ que cumpre uma série de características [19]. Desta maneira pode-se descrever a Transformada Discreta de Fourier por:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, \quad 0 < k < N-1 \quad (4.1)$$

De um modo geral a seqüência $x[n]$ apresentada na equação (4.1) é assumida por um valor complexo. Similarmente pode-se definir a inversa da equação (4.1):

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_N^{-kn}, \quad 0 < n < N-1 \quad (4.2)$$

Observa-se que para cada valor de k , o cálculo direto de $X[k]$ envolve N multiplicações complexas, e $N-1$ adições complexas. Conseqüentemente, calcular todos os N valores da transformada requer N^2 multiplicações complexas e N^2-N adições complexas. A FFT se encaixa exatamente no fato de tentar minimizar este número de cálculos. Para isso a FFT explora as propriedades de simetria e periodicidade do fator W_N . Em particular estas duas propriedades são respectivamente:

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \quad (4.3)$$

$$W_N^{k+N} = W_N^k \quad (4.4)$$

Valendo-se das propriedades descritas nas equações (4.3) e (4.4) torna-se possível a obtenção de algoritmos computacionalmente eficientes para o cálculo da Transformada Discreta de Fourier.

A FFT é utilizada comumente para identificar as freqüências que distorcem um sinal qualquer. Além disso, é possível verificar desbalanço nas tensões e caracterizar tipos de ruídos. O artigo original apresentando o algoritmo referente à FFT encontra-se em [20].

4.1.2 Short Time Fourier Transform (STFT)

Existe uma pequena diferença entre a Transformada de Fourier e a STFT, esta última proposta por Dennis Gabor [21]. Nesta última o sinal é dividido em segmentos. Assume-se que estes segmentos são estacionários e deste modo necessita-se de escolher uma janela apropriada w . Inicialmente esta janela é aplicada no início do sinal, ou seja, para instante $t=0$. Assim, à medida que os segmentos vão sendo gerados pelo deslocamento da janela, aplica-se em cada um deles a Transformada de Fourier, ou computacionalmente falando a FFT [22].

Para o domínio de tempo contínuo, pode-se resumir a definição supracitada através da equação (4.5).

$$STFT_X^{(w)}(t, f) = \int_t [x(t) \cdot w(t-t')] \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.5)$$

Sendo assim a STFT torna-se uma técnica muito conveniente para determinar conteúdos harmônicos do sinal em intervalos de tempo pré-definidos [23]. É uma ferramenta muito eficiente para determinar o início e fim de transitórios, afundamentos e elevações de tensão, além de outras classes de distúrbios. As limitações da STFT estão associadas ao comprimento da janela escolhida e também ao princípio de incerteza de Heisenberg. Tal princípio pode ser estendido às representações de tempo e frequência de um sinal. Sendo assim verifica-se a impossibilidade de saber o conteúdo espectral em cada instante de tempo. O que se pode determinar são intervalos de tempo com determinadas faixas de frequências. Este é um problema de resolução [21].

4.1.3 Periodograma Médio

Considerando um sinal discreto $x[n]$ e supondo uma janela $w[n]$ que selecione um comprimento finito de $x[n]$ com L amostras, pode-se representar este sinal no domínio da frequência através da expressão (4.6).

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^{L-1} w[n]x[n]e^{-j\omega n} \quad (4.6)$$

O periodograma corresponde à estimativa do espectro de potência. Para uma janela retangular o periodograma pode ser descrito simplesmente por:

$$Px(\omega) = \frac{1}{LU} |X(\omega)|^2 \quad (4.7)$$

onde U é um fator de normalização que compensa o *bias* da estimativa. Janelas diferentes da retangular podem ser utilizadas e nestes casos, define-se o periodograma modificado.

Ao calcular $Px(\omega)$ a componente CC pode comprometer o espectro. Sendo assim, torna-se conveniente subtrair previamente a estimativa da média [19]. É válido destacar ainda que a variância da densidade espectral não tende para zero a medida que temos L crescendo, deste modo o periodograma não se torna um estimador espectral consistente.

Deste modo propõe-se o Periodograma Médio também conhecido como Periodograma de Welch. Trata-se de obter médias de periodogramas modificados. Simplesmente divide-se a sequência $x[n]$ em K segmentos com janela de comprimento L . Assim temos um conjunto de sinais descritos na equação (4.7) :

$$x_r[n] = x[r.R + n].w[n] \quad (4.8)$$

onde R corresponde a um número natural constante podendo ser menor ou igual a L . Assim o periodograma do segmento r será dado por:

$$Px_r(\omega) = \frac{1}{LU} |X_r(\omega)|^2 \quad (4.9)$$

E finalmente o periodograma médio será descrito pela expressão (4.10).

$$\overline{Px}(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} Px_r(\omega) \quad (4.10)$$

Desta maneira é possível demonstrar que o *bias* é semelhante ao periodograma comum, porém a variância é inversamente proporcional ao número de segmentos. Importante destacar que para o caso onde $R=L/2$ a variância sofre uma redução máxima por um fator de 2.

Esta técnica pode ser utilizada em diversas aplicações. Sua utilização em processamento de sinais, para diagnóstico de distúrbio em sistemas elétricos, está associada à extração de sinais livres de distúrbios. São de grande importância principalmente em situações que os sinais apresentam *notching* e problemas relacionados aos transitórios de baixa frequência. Esta técnica também pode ser utilizada em outros tipos de transitórios oscilatórios e impulsivos [24].

4.1.4 Discrete Wavelet Transform (DWT)

A idéia básica da *Wavelet* é analisar dados com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência. O termo *Wavelet* foi definido inicialmente por J. Morlet e as fundamentações matemáticas foram formalizadas pelo físico Alex Grossmann.

A Transformada *Wavelet* (TW) é uma tentativa de análise local do conteúdo de frequência. A Transformada de Fourier apresenta a limitação de análises globais, ou seja, eventos que ocorram em intervalos de tempos distintos, ou até mesmo remotos, contribuem afetando o resultado da transformada como um todo. A STFT foi uma primeira tentativa de tentar limitar esta contribuição global.

Embora outras transformadas sejam capazes de fornecer informações no domínio da frequência, elas não apresentam tais informações ao longo do tempo. A TW, utilizando funções bases mais complexas, permite que as análises sejam feitas simultaneamente nos domínios do tempo e frequência. Para a TW, o tamanho da janela é variável, permitindo que eventos de alta frequência possam ser localizados com maior resolução temporal. Isto é bastante razoável, pois qualquer evento de baixa frequência necessitaria de uma janela maior para ser observado.

A princípio define-se a TW considerando um sinal contínuo $x(t)$. Ela é dada pela equação (4.11).

$$X(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (4.11)$$

Nesta equação os parâmetros a e b variam no domínio dos reais, sendo que a função $\psi_{a,b}(t)$ é denominada *wavelet* mãe e está definida na equação (4.12):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.12)$$

É importante destacar que para a validade da equação (4.12) a *wavelet* mãe deve satisfazer o critério de admissibilidade [25, 26]. Quanto aos parâmetros a e b , estes representam respectivamente às informações de escala e tempo, ou ainda dilatação e translação. Deste modo é fácil intuir que o sinal se desdobrará em uma transformada de duas dimensões, permitindo uma análise tempo-frequência, semelhantemente a STFT.

Discretizando os parâmetros a e b tem-se a DWT. É importante salientar que o espaço de definição do sinal não é discretizado uniformemente uma vez que o parâmetro de translação depende da escala da *wavelet* mãe. Deste modo, para frequências elevadas as *wavelets* mães são transladadas com passos pequenos, ocorrendo o contrário para baixas frequências.

Observando a abrangência da DWT verifica-se que esta é suficiente para decompor e reconstruir sinais que apresentem problemas relacionados à qualidade de energia. Além de fornecer as informações suficientes, é uma técnica cujo custo computacional é bastante reduzido. Na análise de multiresolução, funções *wavelet* e funções de escala são utilizadas

para decompor um sinal em diferentes níveis de resolução. A função *wavelet* cria versões do sinal através dos coeficientes denominados “detalhes” e a função de escala gera uma versão aproximada do sinal já decomposto denominada “aproximação”. Este procedimento pode ser matematicamente representado pela equação (4.13).

$$x[n] = \sum_k c_0[k] \cdot \phi[n-k] + \sum_k \sum_{j=0}^{j-1} d_j[k] \cdot 2^{j/2} \psi[2^j n - k] \quad (4.13)$$

onde c_0 corresponde ao nível de escala zero e d_j o coeficiente da *wavelet* na escala j . Os parâmetros $\phi[n]$ e $\psi[n]$ são respectivamente a função de escala e a função *wavelet*. O valor representado por k corresponde ao coeficiente de translação.

Uma *wavelet* mãe muito utilizada (da família *daubechies*) para detecção de distúrbios em sistemas elétricos é a *daubechies 5* [1], ou resumidamente a *db5*. Também são comuns as *wavelets* da família *Symlet* [13]. São utilizadas por serem consideradas *wavelets* suaves o que indica uma melhor resolução de frequência. Além disso, apresentam pouca assimetria. Simetrias mais perfeitas podem ser obtidas com *wavelets* pares. Outras características sobre as *wavelets* da família *daubechies* podem ser verificadas em [27]. A Figura 4.1 apresenta uma curva sem escalas apenas para ilustrar o formato da *db5*.

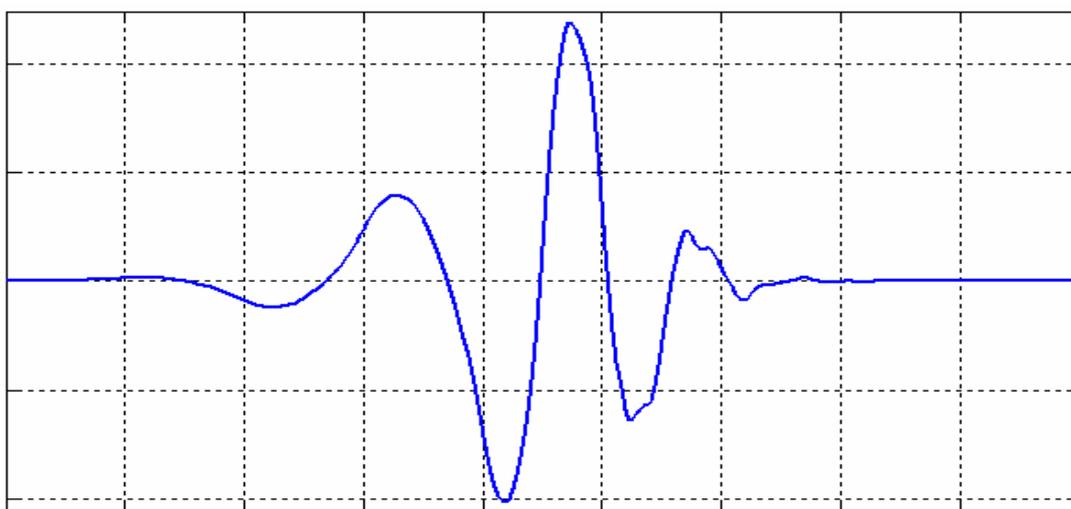


Figura 4.1. *Wavelet daubechies 5*.

Com a análise de multiresolução é possível atingir duas propriedades importantes. A primeira é a localização no tempo de qualquer fenômeno transitório. Isto se dá pelo

aparecimento de coeficientes maiores no instante do distúrbio. A segunda propriedade é a possibilidade de particionar a energia do sinal em diferentes bandas de frequências. Este fato permite verificar o conteúdo de frequência de um sinal distorcido.

Para detecção de distúrbios associados a faixas de altas frequências nenhuma técnica apresenta-se tão satisfatoriamente quanto a DWT. Se problemas como *notching* e interferências de altas frequências ocorrem de modo simultâneo com distúrbios transitórios a DWT é a transformada mais adequada a ser utilizada [28].

4.2 Filtros

Filtros digitais são muito utilizados em análises de sinais. Sua importância é destacada em situações que se necessita de supressão de ruídos, análise do comportamento de determinadas faixas de frequência, limitações de largura de banda, remoção ou atenuação de frequências específicas e também para operações matemáticas especiais como diferenciação e integração.

Muitos filtros digitais baseiam-se na Transformada de Fourier. Desta forma o espectro de frequência de um sinal qualquer pode ser manipulado. Deste modo, após o espectro de frequência ser modificado retorna-se a um sinal que seja uma série no tempo.

Uma outra maneira de se enxergar um filtro digital linear é expressá-lo no domínio Z, conforme apresentado na expressão (4.14):

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_M z^{-M}} \quad (4.14)$$

onde os índices b_i correspondem aos coeficientes do polinômio do numerador, a_i correspondem aos coeficientes do polinômio do denominador e M é a ordem do filtro [29].

A equação (4.14) é obtida a partir de uma equação de diferenças que define como um sinal de entrada se relaciona a um sinal de saída. Para sinais cujas saídas dependam somente das entradas (presentes e passadas) define-se o filtro denominado FIR. Neste caso sua resposta ao impulso é finita e os coeficientes a_i representados no denominador da equação (4.14) são nulos. São filtros não recursivos, com fases lineares e sempre estáveis.

Para sinais cujas saídas atuais dependam também das saídas anteriores, define-se o filtro denominado IIR, ou seja, cuja resposta ao impulso é infinita. Neste último caso temos o denominador da equação (4.14) diferente da unidade. Tais filtros podem apresentar

desempenhos melhores, porém caracterizam um desenvolvimento mais complexo. Coeficientes a_i diferentes de zero levam à existência de pólos na equação de transferência, sendo importante a verificação da estabilidade destes filtros.

Outras formas de filtros digitais são aquelas em modelo de espaço de estado. Como bons exemplos têm-se os filtros de Kalman [30] capazes de estimar o estado de um sistema dinâmico a partir de uma série de medidas incompletas e ruidosas.

4.3 Estatística

Em todos os estudos que envolvem relativa quantidade de dados utiliza-se a estatística como ferramenta de análise e interpretação. Importante verificar que em se tratando de QE existem muitos índices que estabelecem limites de aceitabilidade para os distúrbios a serem analisados. Deste modo lança-se mão da estatística como auxílio na obtenção destes valores. As principais estatísticas utilizadas referem-se aos momentos: Média, Variância, *Skewness* e *Kurtosis*. Estes dois últimos, por suas aplicações serem mais incomuns, estão respectivamente definidos nas equações (4.15) e (4.16).

$$y = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (4.15)$$

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (4.16)$$

onde μ e σ correspondem respectivamente a média e desvio dos dados representados por x .

O *skewness* mede a assimetria dos dados em relação à média. Caso o *skewness* seja negativo, os dados estão mais concentrados em valores inferiores a média. Caso seja positivo, a maior parte dos dados se concentra em valores superiores a média. O *skewness* de uma distribuição perfeitamente simétrica é zero. Já o *kurtosis* verifica a suavidade da distribuição. Distribuições cujo *kurtosis* seja inferior a 3 apresentam mais suavidade que uma distribuição normal. Casos em que o *kurtosis* seja superior a 3 caracterizam distribuições com o pico mais acentuado que uma distribuição normal.

Ferramentas de regressões também são aplicadas a fim de descrever curvas comportamentais que possibilitam valores de índices para diferentes situações. Boas referências relacionadas ao estabelecimento de índices podem ser encontradas em [31-33].

4.4 Inteligência Artificial

Em situações onde se necessita de estimações ou classificações de padrões a inteligência artificial é sempre bem-vinda. As técnicas aplicadas neste trabalho se restringem em Redes Neurais Artificiais Adaptativas e Lógica *Fuzzy*. Obviamente que os estudos de inteligência artificial não correspondem unicamente a estas duas técnicas, porém a ampla faixa de aplicações foi fator determinante para a escolha de tais.

4.4.1 Redes Neurais Artificiais Adaptativas

O campo de aplicação das Redes Neurais Adaptativas é muito vasto. São comumente classificadas como filtros adaptativos. Neste trabalho foi utilizada a *Adaline*. Esta rede foi proposta por Bernard Widrow e Marcian Hoff em 1960 [34]. Tais redes possuem funções de ativação lineares, permitindo que a saída assuma quaisquer valores.

Uma das grandes utilidades da *Adaline* é a predição de valores de instantes atuais $y(k)$, através de valores passados $y(k-1)$, $y(k-2)$... $y(k-n)$. A Figura 4.2 apresenta um esquema geral da arquitetura da *Adaline*. Nesta figura a saída predita está indicada por $\bar{y}(k)$ e o erro entre os valores estimados e desejados por $e(k)$.

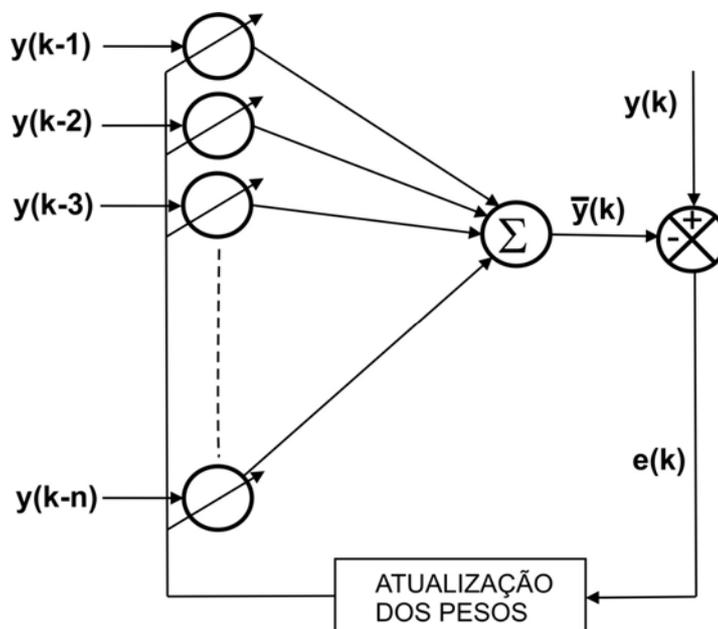


Figura 4.2. Arquitetura genérica de uma *Adaline*.

É importante destacar que esta arquitetura não impõe que as entradas sejam necessariamente valores passados da função ou da curva que se deseja estimar. As entradas podem ser quaisquer funções variantes no tempo ou até mesmo constantes.

O algoritmo de atualização dos pesos é freqüentemente referenciado como regra delta de Widrow-Hoff. Esta regra busca a minimização do erro quadrático médio entre a saída desejada e a saída estimada para todo instante k . A regra delta pode ser descrita por:

$$W_{k+1} = W_k + \frac{\alpha \cdot e_k X}{X^T X} \quad (4.17)$$

onde

k é o índice do tempo ou iteração

$W_k = [W_{1,k}, W_{2,k}, \dots, W_{n,k}]^T$ é o vetor de pesos no tempo correspondente k .

$X = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ é o vetor correspondente às entradas.

$e_k = y_k - \bar{y}_k$ é o erro no instante k .

α é o fator de redução ou mais comumente: taxa de aprendizagem.

A equação (4.17) é válida desde que o numerador não se anule, caso contrário, os pesos não são atualizados naquela iteração. Atualmente algumas modificações têm sido inseridas na regra delta convencional principalmente para acelerar a convergência [35, 36].

4.4.2 Lógica *Fuzzy*

Em situações cujas regras que regem as tomadas de decisão estão bem definidas é muito comum a utilização de Lógica *Fuzzy*. A teoria que rege esta ferramenta é uma extensão da teoria convencional de conjuntos. A diferença é que os valores presentes em um determinado conjunto apresentam pertinências graduais. Ou seja, estes valores são descritos conforme as funções de pertinência de cada conjunto.

A filosofia de funcionamento da Lógica *Fuzzy* não se diferencia muito de uma aplicação para outra. Em todos os casos as entradas e saídas estão separadas em conjuntos, cujos elementos são devidamente pesados pelas funções de pertinência. Pode-se ilustrar facilmente a utilização da Lógica *Fuzzy* em um sistema de verificação da severidade de afundamentos ou elevações de tensão.

Considerando que uma das entradas corresponda aos valores da tensão eficaz, os mesmos poderiam ser divididos em conjuntos como: MMB (magnitude muito baixa), MB (magnitude baixa), MN (magnitude normal), MA (magnitude alta) e MMA (magnitude muito alta). A cada conjunto é aplicada uma função de pertinência cuja forma deve ser

definida conforme a aplicação. A Figura 4.3 apresenta um exemplo de funções de pertinência aplicadas aos conjuntos supracitados.

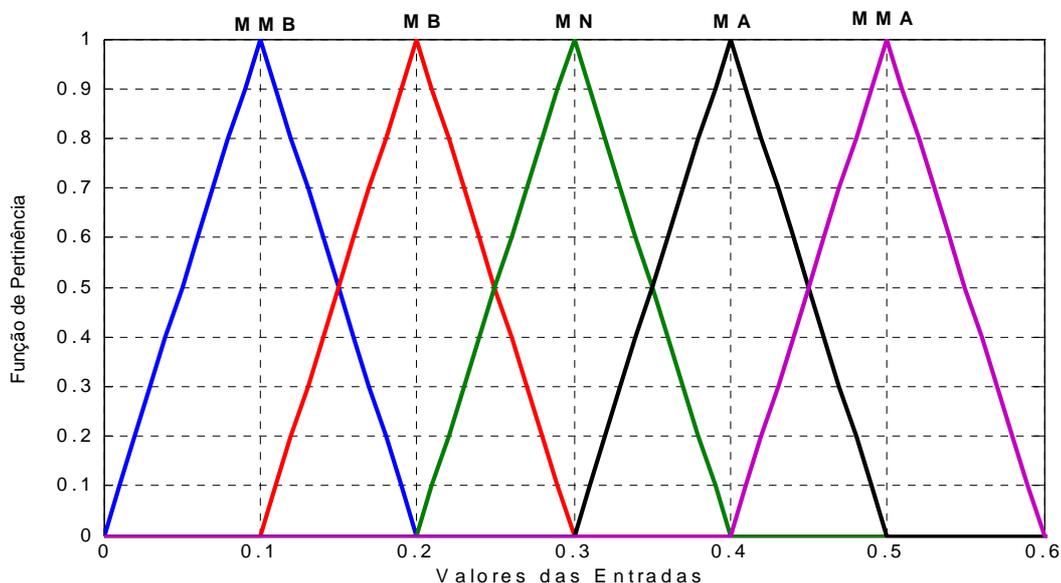


Figura 4.3. Exemplo de funções de pertinência para um sistema usando Lógica *Fuzzy*.

As saídas também possuem funções de pertinência características para cada conjunto de valores específico. A Lógica *Fuzzy* é regida por regras, onde cada grupo formado por conjuntos das entradas pode estar associado a um conjunto ou grupo de conjuntos das saídas.

Sendo assim define-se para o exemplo anterior o operador VEF como a variável de entrada referente ao valor eficaz da tensão, TD como o operador referente ao tempo de duração do respectivo valor eficaz e SA a severidade do distúrbio. Assume-se que a variável de entrada VEF é descrita pelas funções de pertinência apresentadas na Figura 4.3 e que as variáveis de entrada TD e de saída SA estão subdivididas nos conjuntos BV (baixo valor), MV (médio valor) e AV (alto valor). Desta maneira pode-se criar um banco de regras IF/THEN com base nos operadores de entrada e de saída, e de seus conjuntos de valores internos. A seguir são apresentadas algumas regras apenas como exemplo:

Regra 1: *if VEF is MMB and TD is MV then SA is AV*

Regra 2: *if VEF is MB and TD is AV then SA is AV*

Regra 3: *if VEF is MA and TD is BV then SA is MV*

Traduzindo as regras apresentadas anteriormente, observa-se que se o valor eficaz da tensão (VEF) é muito baixo (MV), e que o tempo de duração do distúrbio (TD) é grande, sabe-se que se tem um afundamento de tensão temporário e deste modo uma severidade (SA) alta. Outro caso seria se VEF fosse muito baixo e TD elevado, o que designaria um afundamento de tensão momentâneo, o que corresponde a uma alta severidade. Finalmente a regra 3 mostra que se VEF é muito alto e TD é baixo (caracterizando uma elevação de tensão instantânea), a severidade do distúrbio é média. Estes resultados permitem a um especialista confirmar que em todos estes casos a variação de tensão poderia comprometer o funcionamento de um equipamento instalado na rede.

Com as entradas ocorre o que se chama de *fuzzyficação*, e com as saídas deve-se realizar o processo inverso, conhecido como *defuzzyficação*. Detalhes sobre os métodos utilizados para “defuzzyficar” a saída de um bloco *Fuzzy* podem ser melhores observados em [37].

Vale destacar também a grande aplicação de Lógica *Fuzzy* em sistemas de controle. De maneira geral o que os controladores fazem é respeitar regras, muitas vezes triviais, o que possibilita alto desempenho da Lógica Nebulosa nestas aplicações.

5. Sistemas Relacionados a Análise e Diagnóstico de Qualidade de Energia

Os primeiros trabalhos referentes à utilização de inteligência artificial, estatística e outras ferramentas para análise de QE, tiveram como seu principal foco a análise de conteúdo harmônico em sistemas elétricos. Em [38] encontra-se um exemplo de sistema inteligente destinado à análise de harmônicas em sistemas elétricos de potência. Importa observar que este trabalho se fundamenta em técnicas de inteligência artificial que utilizam base de regras. Deste modo o *software* desenvolvido está baseado em informações técnicas como topologia, aplicações práticas, sintomas, tipo de equipamento e dados nominais a fim de diagnosticar as causas de frequências harmônicas presentes no sistema. Os resultados obtidos neste trabalho foram extremamente satisfatórios e abriram a possibilidade para implantação de sistemas genéricos, capazes de analisar outros distúrbios de QE. O aplicativo apresentou algumas limitações quanto às análises monofásicas, não caracterizando interações entre fases, nem influência do aterramento nas instalações.

Considerando a presença constante do efeito Flicker em sistemas elétricos, NASSIF e NINO propõem em [39] um sistema capaz de identificar a presença destes distúrbios. O princípio de operação está baseado na relação entre valores eficazes de correntes e tensões do sistema, e mostra com clareza que a análise destas grandezas permite retirar conclusões sobre as fontes do distúrbio.

As cargas não lineares dispostas ao longo do sistema representam um dos principais agentes na inserção de conteúdo harmônico nas tensões e correntes que circulam pelas redes. Com vistas a esses causadores de distúrbios são propostos em [40] e [41] eficientes sistemas de diagnóstico. As características presentes nos sinais são extraídas através de ferramentas matemáticas como a Transformada de Fourier e Fractais. A identificação das fontes harmônicas é feita através de um algoritmo baseado em regras capaz de reconhecer e classificar diferentes tipos de cargas não lineares. Uma interface amigável é proposta a fim de promover uma interação gráfica e prática ao usuário. Sistemas semelhantes a este possuem performances de acertos entre 97 e 98%, porém apresentam o inconveniente de estarem limitados ao número de regras e analisarem com coerência somente sinais estacionários.

Visando o suporte em decisões relacionadas a condições anormais de operação é proposto em [42] um sistema de monitoração do desempenho de dispositivos de proteção

em linhas de transmissão. Resume-se em um auxílio aos engenheiros de proteção que necessitam coletar e interpretar grandes quantidades de dados a fim de monitorar e diagnosticar ações de proteção em linhas de transmissão. O sistema está baseado em dados e fundamenta suas decisões na discrepância existente entre o comportamento real observado e o comportamento previsto baseado em modelos. O *software* além de indicar se sistemas de proteção estão agindo corretamente inclui as sugestões de possíveis anomalias. Apresenta a grande limitação de estar destinado exclusivamente a ações de proteção, porém, segundo os autores, permite a possibilidade de novos módulos para integração de um sistema completo.

KOPPARAPU e CHANDRASEKARAM propõem em [43] um estudo sobre o desempenho de Transformadas *Wavelet* na detecção e classificação de distúrbios. É mostrada a importância de se conhecer bem o fenômeno ocorrido antes de se apresentar qualquer diagnóstico do problema. É destacada também a crescente utilização de técnicas de mineração de dados e inteligência artificial para detecção e classificação de problemas, entretanto a superioridade da técnica utilizada é destacada. Claramente é verificado o melhor desempenho da Transformada *Wavelet* em relação a análises de Fourier, por possibilitar a análise de frequências ao longo do tempo. A dificuldade da aplicação das *wavelets* tem sido a obtenção de métodos capazes de interpretar os resultados encontrados. A fim de classificar os fenômenos ocorridos, é comum a utilização de sistemas inteligentes que caracterizem o sinal com base na energia contida em suas diferentes faixas de frequência.

O estudo de QE ganha importância nos centros de pesquisas atuais principalmente devido a crescente necessidade do fornecimento de energia com qualidade aos consumidores. Sabe-se que a exigência tem crescido devido às cargas mais modernas apresentarem principalmente sensibilidade a variações nas tensões de fornecimento. Tais cargas são denominadas cargas sensíveis. Embora exista um consenso da necessidade de melhores índices de qualidade é importante destacar que muito se tem estudado a fim de se caracterizar cargas sensíveis. Em [44] é proposto um trabalho baseado em Lógica Fuzzy que procura representar o comportamento de cargas sensíveis em situações de afundamentos de tensão. Deste modo é possível verificar o quanto as falhas de cargas, especialmente microprocessadas, estão relacionadas aos afundamentos de tensão. Foi apresentado um estudo de caso para cargas baseadas em computação e sabe-se que tais cargas possuem tolerâncias aos índices de qualidade conforme fabricantes e aplicações. A

aplicação de regras IF-THEN obteve êxito uma vez que a incerteza quanto às tolerâncias pôde ser descrita nas funções de pertinência. Sendo assim se confirma a capacidade de sistemas inteligentes para diagnósticos de distúrbios na QE, avaliando inclusive o comportamento de cargas, auxiliando na definição de sensibilidade e produção adequada das mesmas. Importante destacar que técnicas que utilizam Lógica Fuzzy apresentam a necessidade do conhecimento prévio das regras que regem o sistema, sendo necessário o levantamento de grandes bancos de regras a fim de ampliar a capacidade do sistema.

IBRAHIM e MORCOS desenvolveram uma importante ferramenta destinada a diagnóstico de distúrbios de Qualidade de Energia. Em [45] pode ser observado a ferramenta proposta. O sistema foi desenvolvido utilizando Neuro-Fuzzy. A aplicação destas técnicas consiste em uma importante contribuição por possibilitar a auto-aprendizagem das regras que regem o sistema, tendo em vista a possibilidade de reduzir ainda mais a intervenção humana em diagnósticos de qualidade de energia.

Um excelente trabalho descrevendo o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de QE é apresentado em [6]. São apresentadas as estruturas e funções de um sistema completo que envolve monitoramento e armazenagem de dados e também diagnósticos de QE. O sistema de diagnóstico é baseado num extenso banco de dados contendo informações sobre os sinais de tensão e corrente do sistema. As ferramentas matemáticas utilizadas não estão explícitas, porém a filosofia de operação representa um método inteligente para se analisar os dados. Importante destacar que é disponibilizada a possibilidade de serem inseridos novos componentes com suas características a fim de ampliar os possíveis diagnósticos em um dado sistema.

Em [46] encontra-se uma proposta de sistema de diagnóstico capaz de classificar os distúrbios associados aos sinais de um sistema elétrico e apresentar possíveis causas dos problemas. Além de apresentar um excelente resumo contendo os principais distúrbios e suas causas prováveis, o artigo sugere ferramentas matemáticas que podem ser úteis na extração de características presentes nos dados monitorados. Modelos de relações entre causa e efeito são adotados para relacionar os eventos ocorridos a equipamentos ou circuitos destes equipamentos. Por corresponder a um trabalho inicial, os modelos de relações causa-efeito são ainda bastante genéricos, porém fica evidente a possibilidade de expansão destas relações. Propostas de utilizar modelos comportamentais de equipamentos faltosos corresponderiam também a um grande avanço, pois poderia ser levada em consideração a deterioração destes equipamentos ao longo do tempo.

Nos trabalhos referenciados em [47-49] mostra-se a preocupação de se implementar metodologias capazes de detectar níveis de flutuações de tensão. Em [47] é descrita a maneira utilizada pela Taiwan *Power Company* para avaliar a presença de flutuações de tensão. Neste mesmo trabalho é proposto um sistema de validação para o método. Em [48] são descritos além dos métodos francês e britânico, o método padrão adotado *International Eletrothermy Union* (IEU). Em [49] é descrita a implementação de um “Flickermetro” utilizando Simulink/MATLAB[®] e tomando como padrão a norma IEC 61000-4-15 [50].

Sob o ponto de vista de *Hardwares* desenvolvidos atualmente para análise de qualidade de energia, é importante observar que em sua maioria não apresentam ferramentas de diagnóstico. Ou seja, tais equipamentos são capazes de apresentar resultados provenientes de transformações aplicadas aos sinais e cabe ao engenheiro a análise e conclusões sobre os resultados. Com base nessa limitação em [51] encontra-se a construção de um protótipo utilizando DSP TMS320C6711. O equipamento desenvolvido é capaz de capturar e processar sinais trifásicos em tempo real. O protótipo apresenta vantagens em relação a equipamentos comercialmente disponíveis como a alta taxa de amostragem por canal e possibilidade de alteração nos códigos do algoritmo para eventuais mudanças de aplicações. A concepção de *Hardwares* representa um importante ganho principalmente no requisito flexibilidade, facilitando, por exemplo, medições em campo.

Este trabalho visa à obtenção de um *software* capaz de superar as principais limitações observadas nos sistemas já desenvolvidos. De imediato busca-se reunir a análise de vários distúrbios num mesmo sistema de monitoramento. Além disso, a aplicação da transformada *wavelet* garante a análise dos sinais de modo eficaz, abrindo a possibilidade para futuras análises em tempo real. O uso de redes neurais adaptativas possibilita a extração de determinadas características dos sinais com custo computacional reduzido. Blocos utilizando lógica nebulosa possibilitam a verificação de características dos sinais através de bancos de regras, o que contribui significativamente para a robustez dos resultados.

Um grande diferencial observado no trabalho aqui proposto consiste na geração de diagnósticos para os distúrbios observados. Esta função determina um ganho considerável na aplicação do *software* por disponibilizar soluções imediatas para extinguir perturbações ou reduzir os impactos provenientes das mesmas. Inicialmente o *software* apresentado neste trabalho estará limitado a sinais monofásicos, porém em sua próxima versão será destinado fundamentalmente a análises em sistemas trifásicos.

6. Sistema Proposto para Detecção, Classificação e Diagnóstico de Problemas de Qualidade de Energia

O uso considerável de equipamentos e programas computacionais visando a melhoria da Qualidade de Energia tem promovido ganhos consideráveis tanto para fornecedores de energia como consumidores da mesma [46]. A apresentação de um possível diagnóstico, além da detecção de uma falha, possibilita que a manutenção a ser aplicada em um dado sistema seja feita com maior eficácia. O diagnóstico garante a qualidade da energia de forma mais eficiente por assegurar uma possível solução em tempo menor, uma vez que as análises do sinal, bem como suas conclusões, fazem parte de uma memória presente em um banco de dados.

A fim de assegurar a imunidade ou redução de problemas relacionados à QE é importante que além de um monitoramento contínuo das grandezas envolvidas no sistema elétrico em estudo, seja possível a detecção e identificação dos distúrbios relacionados à qualidade de energia. Porém o grande diferencial residirá no fato de se ter neste mesmo sistema a possibilidade da associação de distúrbios com possíveis categorias de causas. Obviamente que melhores soluções serão obtidas com sistemas de diagnóstico inteligentes, capazes inclusive de priorizar causas, levando em consideração componentes do circuito e o cruzamento entre variáveis.

6.1 Estrutura do Sistema

Na Figura 6.1 apresenta-se a estrutura geral do sistema proposto. Essencialmente conjuntos de dados (correntes e tensões) são processados a fim de extrair características relevantes que estejam contidas nos mesmos. As características extraídas dos sinais são suficientes para dividir o tempo total de amostragem em diferentes janelas temporais onde se predominam determinados eventos. As referências [32, 46 e 52] mostram os eventos associados a cada janela divididos em oito categorias básicas, conforme descrito na Tabela 2.1 [33]. Ainda na Tabela 2.1 podem-se encontrar características referentes ao conteúdo espectral, durações e magnitudes dos distúrbios evidenciados.

As janelas definidas sobre os sinais em análise determinam os instantes de transitórios e de regimes permanentes, sendo assim o sinal fragmentado é novamente analisado com técnicas mais adequadas para cada situação.

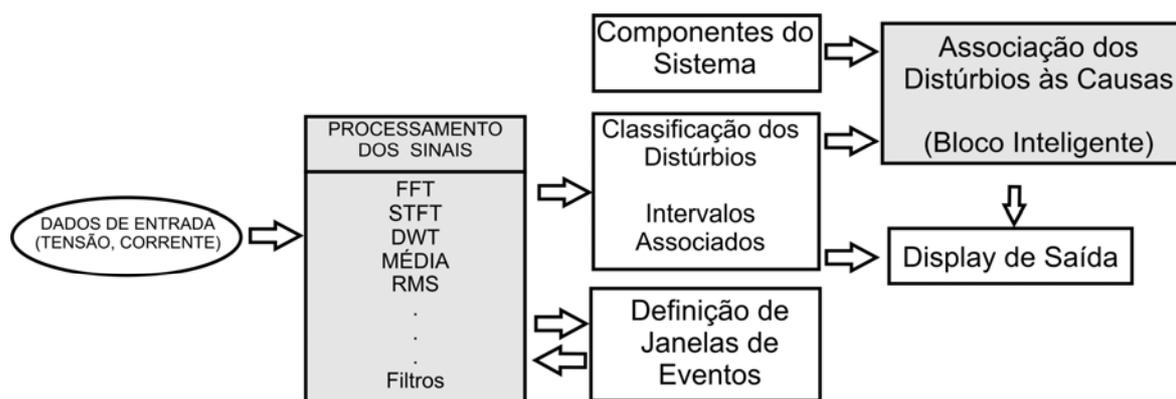


Figura 6.1. Esquema geral do sistema implementado para detecção e diagnóstico de problemas de Qualidade de Energia.

Informações referentes aos domínios do tempo e frequência são analisadas em conjunto, de modo que os distúrbios possam ser classificados com suas respectivas durações. Tais informações são disponibilizadas ao usuário permitindo inclusive a interação do mesmo a fim de processar os dados novamente, caso seja necessário.

As ferramentas de análise utilizadas para o processamento, caracterização e classificação dos sinais serão abordadas a seguir.

6.1.1 Filtros Digitais

São aplicados inicialmente filtros *anti-aliasing* sobre os sinais originais. São filtros passa baixas, sintonizados para frequência de corte em 3840Hz. Justifica-se este valor uma vez que a frequência de amostragem dos sinais adquiridos para as análises é de 7680Hz.

Para o cálculo de flutuações de tensão e subharmônicas a amostragem do sinal é de 60Hz. Neste caso, também se necessita de um filtro passa baixas, *anti-aliasing*. Para evitar atenuações nas frequências próximas de 30Hz, utilizou-se um filtro passa baixas com frequência de corte em 45Hz.

6.1.2 Análises de Espectros

Para sinais, ou intervalos de sinais, que não se verifique presença de transitórios a análise espectral se reduz a FFT. Deste modo têm-se os valores dos componentes espectrais até a 64^a harmônica.

Para analisar o espectro de frequência de situações transitórias, torna-se essencial a extração da componente fundamental. Porém nesta situação a utilização de filtros não foi muito adequada por atenuar componentes presentes nos próprios transitórios. A utilização do Periodograma Médio foi essencial. O sinal original é segmentado em vários sinais com

128 pontos e assim estima-se o espectro de potência predominante. A fase é encontrada através da própria FFT. Finalmente extrai-se a componente fundamental do sinal e avaliam-se os transitórios. Neste primeiro estudo restringiram-se os fenômenos transitórios em unicamente impulsivos ou oscilatórios. A divisão destes transitórios em subcategorias baseadas em seus conteúdos de frequência dominantes, além de caracterizar melhor o sinal, pode contribuir significativamente para diagnósticos mais precisos.

Ao longo do transitório, após a extração da fundamental, utiliza-se a STFT nas janelas de tempo específicas. Transitórios com frequências superiores a 1920Hz não são bem caracterizados pela STFT devido ao comprimento da janela. Neste caso a DWT se mostra como a melhor opção, uma vez que o primeiro nível de decomposição contém frequências entre 1920 e 3840Hz.

Outra aplicação relevante da DWT consistiu-se na classificação dos distúrbios. Decompondo os sinais amostrados em 5 níveis, obtém-se sinais nas seguintes faixas:

Detalhes:

- Primeiro nível – 1920Hz a 3840Hz.
- Segundo nível – 960Hz a 1920Hz.
- Terceiro nível – 480Hz a 960Hz.
- Quarto nível – 240Hz a 480Hz.
- Quinto nível – 120Hz a 240Hz.

Aproximação:

- Nível único – 0 a 120Hz.

Com base na energia contida em cada um destes níveis é possível verificar a predominância de determinados distúrbios no sinal. Maiores informações podem ser verificados em [1].

6.1.3 Cálculos Estatísticos

Informações como a média e variância são fundamentais no estabelecimento de limites e padrões. A utilização do *skewness* facilita a determinação da simetria do sinal em relação ao eixo temporal e o *kurtosis* traz informações relevantes sobre sinais com elevados picos. São principalmente aplicados para caracterizar os fenômenos transitórios em oscilatórios ou impulsivos.

Durante o estabelecimento dos limites de flutuações de tensão (efeito *flicker*), foi necessária a utilização de técnicas para aproximação de funções para a consulta de tabelas.

Os valores consultados determinam pesos que ponderam as frequências presentes no sinal. Com tais valores é possível determinar a variação do fluxo luminoso durante um intervalo de tempo pré-determinado (1 minuto). Os resultados quantificam a sensação do cérebro humano ao efeito *Flicker*.

6.1.4 Testes Binários

Principalmente fenômenos relacionados às variações de tensão de curta duração e variações de tensão sustentadas, necessitam de testes binários constantes. A ultrapassagem de limites superiores e inferiores pré-estabelecidos é verificada a cada semiciclo do sinal. Variações da frequência fundamental são verificadas da mesma maneira.

Outros fenômenos baseados em cálculos estatísticos prévios necessitam de testes binários para classificação. São os casos de classificação de fenômenos transitórios e nível CC, que são determinados pela ultrapassagem de determinados limites.

6.1.5 Inteligência Artificial

Existem técnicas de inteligência artificial associadas ao bloco de processamento de sinais que são utilizadas para a classificação correta dos distúrbios. Para estimar a frequência fundamental, nos intervalos de regime permanente, utilizou-se uma rede *Adaline* (filtro adaptativo). O algoritmo proposto para a mesma mostrou alto grau de robustez além de considerável exatidão. A técnica se mostrou imune aos efeitos de harmônicas e de ruídos aleatórios [53]. Para estimação das amplitudes, fases e taxas de distorção harmônica do sinal, também foi utilizada uma rede neural do tipo *Adaline*.

Tendo como variáveis as amplitudes estimadas pela rede e suas respectivas taxas de variação, propôs-se um sistema *Fuzzy*, capaz de classificar alguns distúrbios. Até o momento os distúrbios avaliados por este bloco são afundamentos, elevações e interrupções de tensão, harmônicos e variações de frequência. Futuramente, a expansão do banco de regras, e a inserção de novas variáveis, possibilitarão a classificação de todos os distúrbios unicamente por este bloco inteligente.

A fim de avaliar a severidade dos afundamentos de tensão (*sags*), em relação a equipamentos de informação, montou-se um sistema baseado em lógica *Fuzzy*, cujas regras estão embasadas em critérios previamente determinados [44].

Como ferramenta de pré-análise, alertando sobre a predominância de possíveis cargas não lineares presentes no sistema, desenvolveu-se também um sistema *Fuzzy*, cujas

regras estão baseadas no conteúdo harmônico das tensões e corrente do sistema em questão.

Nas seções seguintes será explicada a filosofia seguida para aplicação das ferramentas apresentadas nesta seção. Procurou-se apresentar uma descrição seqüencial das rotinas utilizadas, descrevendo como cada ferramenta contribuiu para a composição do *software*.

6.2 Detecção de Janelas de Eventos Transitórios e em Regime Permanente

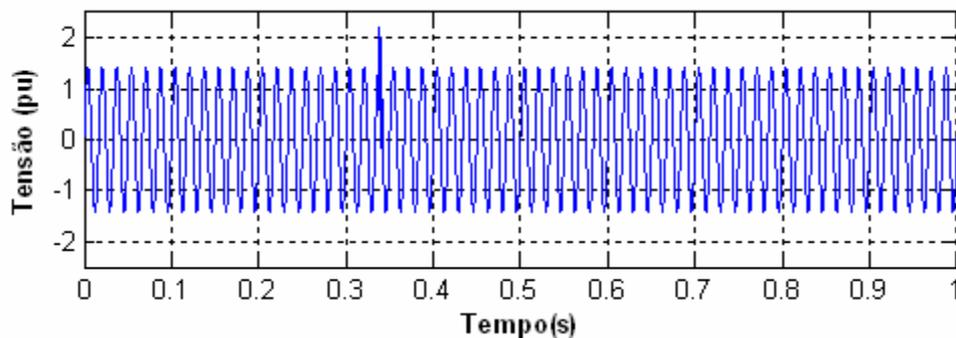
Após o carregamento dos sinais de tensão e corrente de um barramento a ser analisado, o primeiro passo consiste em localizar fenômenos transitórios. A utilização da DWT nesta etapa torna-se fundamental.

Através da técnica de análise em multiresolução (MRA) é possível encontrar os coeficientes das decomposições *wavelets*. Utilizando o primeiro nível de decomposição de uma *wavelet daubechies 5 (db5)*, um limiar é calculado com base neste próprio nível, e desta maneira torna-se possível localizar instantes de alterações ocorridas no sinal. A Figura 6.2 ilustra a análise descrita.

É importante salientar que a duração do fenômeno transitório é definida pelo tempo que os coeficientes de nível 1 ficam acima do limiar estipulado. Coeficientes que ultrapassam o limiar em intervalos de tempo inferiores a um quarto de ciclo (entre eles), são caracterizados como referentes ao mesmo evento.

Quanto ao limiar apresentado na Figura 6.2 é válido observar que o mesmo é estipulado por cálculos estatísticos, porém este valor pode ser alterado pelo usuário para valores mais adequados. Essa flexibilidade permite a inclusão ou exclusão de janelas que contenham informações relevantes do sinal.

Uma vez que as janelas de tempo referentes aos distúrbios transitórios estão definidas, as janelas referentes à operação em regime permanente corresponderão aos intervalos de tempo restantes.



(a) Sinal de tensão ao longo do tempo.

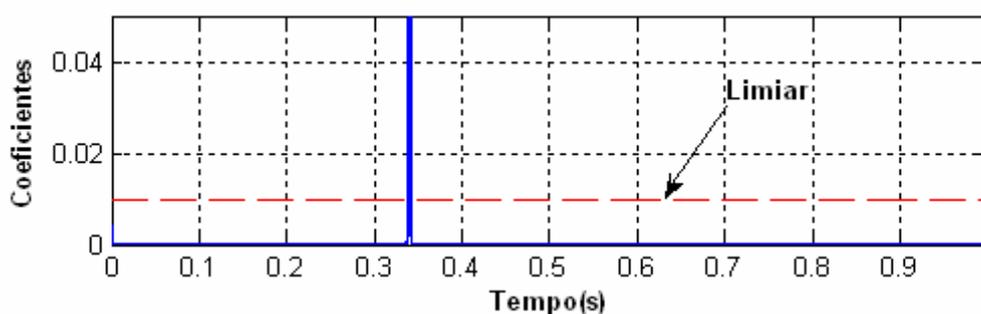
(b) Decomposição de primeiro nível utilizando *wavelet daubechies 5*

Figura 6.2. Detecção de Intervalos Transitórios no Sinal.

6.3 Caracterização das Janelas de Sinais

Os intervalos cujo sinal encontra-se em regime permanente são analisados quanto ao conteúdo de frequência utilizando a FFT. Sendo assim torna-se possível o levantamento das principais frequências associadas aos sinais de corrente e tensão. A presença de nível CC é facilmente encontrada uma vez que a magnitude da componente contínua é apresentada no resultado da FFT.

Após a verificação dos principais conteúdos associados, verifica-se ainda a presença de ruídos através do levantamento de componentes de baixa amplitude. O uso de filtros digitais facilita a separação destes conteúdos para melhores análises.

Os intervalos cujos sinais se encontram em regime transitório necessitam de análise mais apurada. Através da MRA o sinal é decomposto em 5 níveis. As aproximações são filtradas e finalmente utilizando STFT localiza-se o conteúdo frequência predominante, a fim de se caracterizar o tipo de transitório.

Nos intervalos transitórios, a presença de nível CC é mais difícil de ser caracterizada. Sendo assim torna-se necessária a extração da componente fundamental do sinal para posteriormente se calcular o valor médio do sinal restante. Se o valor calculado ultrapassa 0.01% da fundamental, caracteriza-se a presença de nível CC no transitório.

Os transitórios impulsivos são caracterizados verificando o *skewness* do intervalo transitório sem a presença da fundamental. Se o valor calculado diferencia-se muito de zero caracteriza-se o distúrbio.

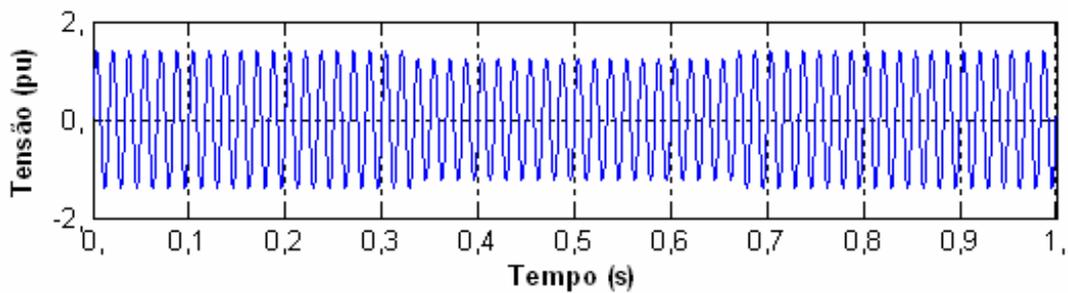
6.4 Demais Análises

As variações de tensão e interrupções são obtidas através do cálculo do valor eficaz da tensão. Para o valor eficaz utilizaram-se intervalos de meio ciclo. Ou seja, a cada semiciclo é obtido um valor RMS para o sinal, e desta maneira é possível verificar se tais valores ultrapassam os limites apresentados na Tabela 2.1. É importante salientar que a duração destes fenômenos é fundamental para a correta classificação dos distúrbios.

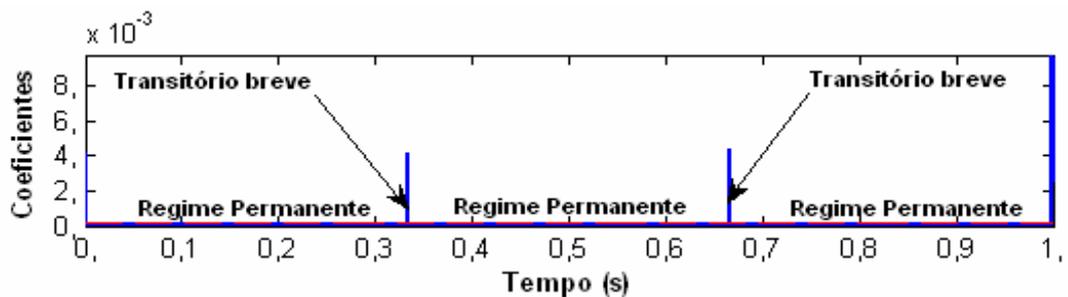
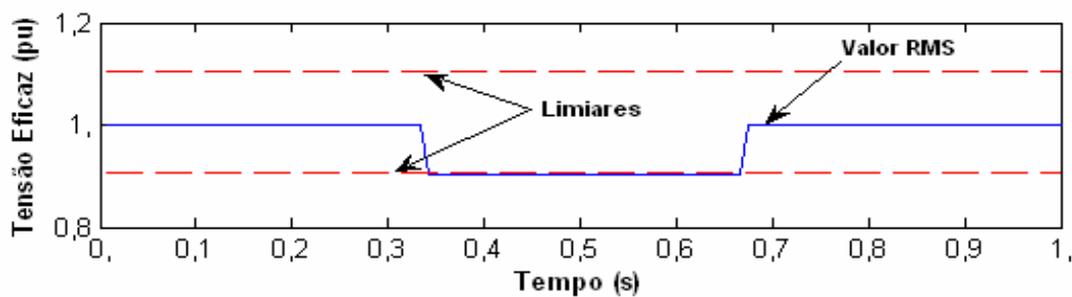
Desta maneira novas classes de distúrbios são obtidas juntamente com suas durações e instantes que acontecem. A Figura 6.3 apresenta a variação do valor RMS de um sinal e também os intervalos transitórios e de regime permanente associados ao mesmo.

A presença de flutuações de tensão é facilmente caracterizada através da envoltória do sinal de entrada. Uma vez que as oscilações estão mais bem caracterizadas em frequências entre 1 e 30Hz, uma análise espectral da envoltória possibilita o cálculo de índices [47] utilizados para definir a presença ou não de um comportamento comprometedor. A Figura 6.4 apresenta a flutuação de tensão (linha contínua) e a envoltória (linha tracejada) que foi citada anteriormente.

A envoltória da tensão, conhecida como modulante [47 e 48], também é utilizada para cálculo de subharmônicas. A resolução adotada para verificação de subharmônicas é de 1Hz, o que implica necessariamente que o sinal analisado tenha pelo menos 1 segundo de duração.



(a) Sinal de tensão ao longo do tempo.

(b) Decomposição de primeiro nível utilizando *wavelet daubechies 5*

(c) Valor Eficaz da tensão ao longo do tempo.

Figura 6.3. Variação do valor RMS, intervalos transitórios e intervalos de regime permanente que compõem o sinal.

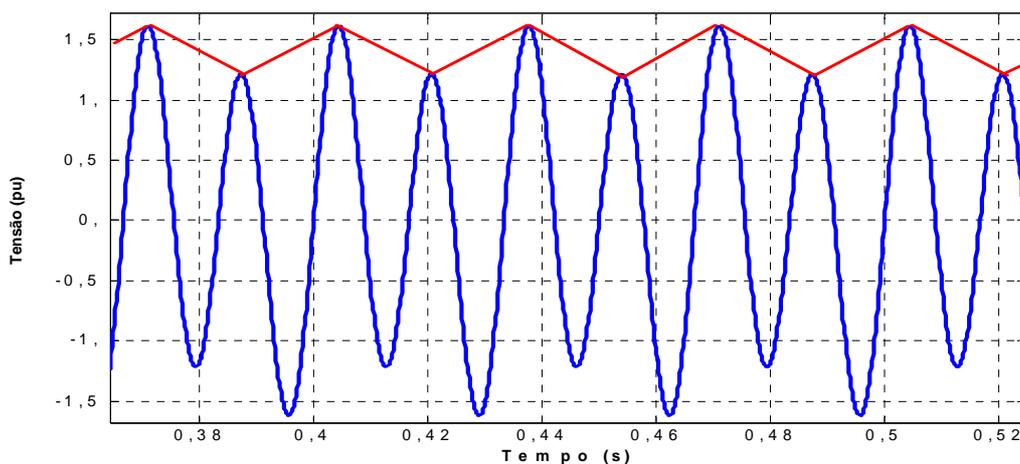


Figura 6.4 Flutuação de tensão e envoltória para análises.

6.5 Associação às Fontes de Distúrbios

Após serem listados todos os distúrbios localizados pelo sistema, o operador do *software*, com base nos resultados e demais conhecimentos, escolhe o intervalo de tempo a ser analisado bem como os fenômenos julgados mais relevantes para o referido intervalo.

Como apresentado na Figura 6.1, podem ser inseridos componentes específicos que estejam presentes no sistema elétrico em análise. Desta maneira estes componentes são associados às classes de fontes de distúrbios já presentes no banco de dados, sendo possível obter uma resposta mais precisa sobre qual o agente do circuito que possa estar envolvido com o(s) distúrbio(s) detectado(s).

6.6 Aplicação do Diagnóstico de Falhas Múltiplas – Multiple Faults Diagnosis (MFD)

Devido ao elevado custo computacional que a técnica MFD exige, esta análise foi disponibilizada no sistema como um item opcional. Após o primeiro diagnóstico ser obtido utilizando técnicas menos precisas, o operador tem a opção de refinar suas respostas utilizando a técnica MFD. As respostas mais precisas representariam os primeiros itens a serem analisados em uma planta elétrica em estudo, sendo que os mesmos também estariam associados aos componentes que estão instalados no circuito.

Para a seleção dos melhores conjuntos é necessária a representação do sistema de potência como um *Digraph Model* [54]. De maneira simplificada pode-se descrevê-lo como:

- Um conjunto S de fontes de distúrbios. $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$;
- Um conjunto T de distúrbios. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$;
- Probabilidades associadas às fontes de distúrbios. $p(S) = \{p(s_1), p(s_2), \dots, p(s_m)\}$;
- Uma matriz de dependência, $D = [d_{ij}]$;

O desafio do problema é encontrar o conjunto $X \subseteq S$ que seja consistente com os distúrbios que foram encontrados. Estatisticamente pode-se escrever:

$$\max_{X \subseteq S} P(X | T_p, T_f) \quad (6.1)$$

onde T_p e T_f representam respectivamente os distúrbios não detectados (testes aprovados) e distúrbios detectados (testes reprovados).

Para auxílio dos cálculos define-se um vetor x de tamanho m , onde $x_i = 1$ se a fonte de distúrbio faz parte de um conjunto X previamente escolhido e onde $x_i = 0$, caso contrário.

Valendo-se do teorema de Bayes tem-se que:

$$\max_{X \subseteq S} P(X | T_p, T_f) = \max_{X \subseteq S} \frac{P(T_p, T_f | X) \cdot P(X)}{P(T_p, T_f)} \quad (6.2)$$

Considerando o termo $P(T_p, T_f)$ uma constante, pode-se reescrever a expressão (6.2):

$$\arg \max_{X \subseteq S} P(X | T_p, T_f) = \arg \max_{X \subseteq S} P(T_p | X) \cdot P(T_f | X) \cdot P(X) \quad (6.3)$$

onde:

$$P(X) = \prod_{i=1}^m p(s_i)^{x_i} \cdot (1 - p(s_i))^{1-x_i} \quad (6.4)$$

Para melhor entender a expressão (6.3) pode-se avaliar $P(T_p | X)$ e $P(T_f | X)$ através da matriz dependência D. Deste modo tem-se:

$$P(T_p | X) = \prod_{t_j \in T_p} p(t_j \in T_p | X) \quad (6.5)$$

$$P(T_f | X) = \prod_{t_k \in T_f} p(t_k \in T_f | X) \quad (6.6)$$

e finalmente:

$$p(t_j \in T_p | X) = \prod_{i=1}^m (1 - d_{ij})^{x_i} \quad (6.7)$$

$$p(t_k \in T_f | X) = 1 - p(t_k \in T_p | X) \quad (6.8)$$

Importante verificar que tanto em (6.7) como em (6.8) assume-se que os testes são condicionalmente independentes, o que se considera um padrão em problemas de testes de hipóteses. Assume-se também que todos os distúrbios não detectados garantem integralmente a não presença de fontes destes distúrbios. Distúrbios detectados (testes reprovados) implicam necessariamente na associação de uma ou mais fontes de falhas. Em outras palavras, os testes apresentam probabilidade igual a unidade para afirmar a verdade sobre um evento e zero para falsas indicações. Porém é muito importante citar que a metodologia apresentada pode ser facilmente estendida para o caso em que os testes venham a ser assimétricos, ou seja, probabilidades diferentes de 1 para detecções e diferentes de zero para a possibilidade de falsidade na indicação. O caso geral, cujas detecções de distúrbios são diferentes da unidade, pode ser verificado em [55].

6.6.1 Exemplo de MFD

A fim de garantir um melhor entendimento sobre a técnica de seleção proposta será apresentado um exemplo com um pequeno modelo.

Suponha-se que seja possível a verificação de três distúrbios, por exemplo: harmônicas, transitórios com harmônicas de baixa ordem e flutuações de tensão. Suponha que os equipamentos fontes de distúrbios sejam um banco de capacitor, cargas não-

lineares, um motor de grande porte e uma máquina de solda. Para as fontes de distúrbios citadas e respectivos distúrbios tem-se a matriz de dependência D apresentada na Tabela 6.2.

Assumem-se que as probabilidades associadas a cada fonte sejam $p(s_1)=0,25$, $p(s_2)=0,33$, $p(s_3)=0,25$ e $p(s_4)=0,65$ para as respectivas cargas relacionadas anteriormente. Assume-se também que após rigorosa análise dos sinais de tensão e corrente do sistema observou-se a presença de dois dos três distúrbios relacionados, a saber, transitórios e harmônicas. Ou seja, os distúrbios presentes nos sinais correspondem aos testes reprovados.

Tabela 6.1 – Matriz de Dependência para sistema hipotético.

	Harmônicas	Transitórios de Baixa Ordem	Flutuações de Tensão
Banco de Capacitores {1}	0	1	0
Cargas não Lineares {2}	1	0	0
Motor de Grande Porte {3}	0	1	1
Máquina de Solda {4}	0	0	1

Como apresentado na Tabela 6.1 as fontes de distúrbios serão consideradas por números para facilitar a notação de conjuntos. Os conjuntos possíveis de serem compostos por estas cargas são: {1}, {2}, {3}, {4}, {1,2}, {1,3}, {1,4}, {2,3}, {2,4}, {3,4}, {1,2,3}, {1,2,4}, {1,3,4}, {2,3,4}, {1,2,3,4}. Na Tabela 6.2 são apresentadas as probabilidades parciais e resultantes de cada conjunto, calculadas a partir das equações (6.4) a (6.8).

Observa-se através da Tabela 6.2 que dentre todos os conjuntos somente 3 são caracterizados como possíveis causadores dos fenômenos. Devido a maior ocorrência de distúrbios associados às cargas não lineares (representadas pelo conjunto {2}), pode-se apontá-las como a causa com maior chance de estar vinculada aos testes reprovados. Na seqüência, pode-se verificar que com a segunda maior probabilidade, os bancos de capacitores podem estar associados aos distúrbios ocorridos. E finalmente, embora com a menor probabilidade, pode-se verificar a possibilidade da coexistência de duas fontes geradoras de problemas, o banco de capacitores e a carga não linear.

Com base num estudo exaustivo de causas de distúrbios levantou-se a Tabela 6.3. Estes dados são utilizados pelo sistema a fim de escolher conjuntos de cargas que apresentem maior probabilidade de estarem associados a um ou mais distúrbios. Os

distúrbios estão apresentados por siglas que podem ser decifradas na Lista de Abreviaturas contida na página “x”.

Tabela 6.2 – Resultados de Probabilidades dos Conjuntos.

Conjunto	Probabilidade Parcial	Probabilidade Final
{1}	0,044	0,044
{2}	0,065	0,065
{3}	0,044	0
{4}	0,245	0
{1,2}	0,022	0,022
{1,3}	0,015	0
{1,4}	0,082	0
{2,3}	0,022	0
{2,4}	0,121	0
{3,4}	0,082	0
{1,2,3}	0,007	0
{1,2,4}	0,040	0
{1,3,4}	0,023	0
{2,3,4}	0,040	0
{1,2,3,4}	0,013	0

Tabela 6.3 – Tabela de Associação de Distúrbios às Fontes.

Fontes	IS	ICD	SS	AT	SBS	ET	TI	TO	RS	HS	FT	NCC	SH	VF
Descargas Atmosféricas	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Problemas de equipotencialização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Cargas em Geral</i>														
Partida de cargas	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Desconexão de cargas	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Carga de grande porte	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Desconexão de um grande bloco de cargas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Fechamento de contatos	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Transformadores</i>														
Ferroressonância	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Energização de transformadores	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tap de transformador incorreto	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transformadores à vazão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Rompimento de condutor em transformador	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Capacitores</i>														
Capacitores para correção de FP	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Energização Back to Back de Capacitores ¹	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Energização de bancos de capacitores	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Chaveamento de banco de capacitores	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cargas Especiais</i>														
Cargas não lineares	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Reatores eletrônicos	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Controles de luminosidade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Controladores de velocidade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Retificadores de meia onda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cargas utilizando SCR	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Snubbers ²	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Motores de indução e fornos a Arco	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
Chaveamentos	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Soldadores ou fornos a arco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
<i>Geração de Energia</i>														
Desligamento de fonte geradora de potência elevada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ajuste impróprio em regulador de tensão	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Instabilidade em UPS	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Falhas de controle	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Sistemas Elétricos</i>														
Falha na fiação ou disjuntores	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Curto Circuito	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Falta momentânea	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Falta na fase medida	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Faltas em fase não medida	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Falhas de equipamentos	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distúrbios na rede	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rede em nível de tensão reduzido	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erro de ajuste em regulador de tensão	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sobrecarga	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rompimento na linha de transmissão	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distúrbio advindo de fontes externas ou concessionária	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Isolamento de trecho longo da linha de transmissão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

¹ Chaveamento temporário, utilizado em linhas de transmissão visando a elevação do efeito capacitivo.

² Os *Snubbers* mais comuns são circuitos RC ou RLC que têm como objetivo filtrar oscilações durante chaveamentos, garantindo o funcionamento otimizado de interruptores.

7. Resultados

A seguir serão apresentados detalhes referentes ao *software* PQMON, desenvolvido no BATLAB-1 (Laboratório de Inteligência Artificial, Sistemas Digitais, Eletrônica de Potência e Acionamentos de Máquinas) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Inicialmente serão apresentadas descrições gerais da interface do *software*. O *software* foi concebido prevendo-se duas possibilidades quanto aos dados de entrada. A primeira, caso se tenha apenas sinais medidos de tensão e a segunda, tendo-se sinais de tensão e corrente. A Figura 7.1 mostra a interface referente ao *software*.

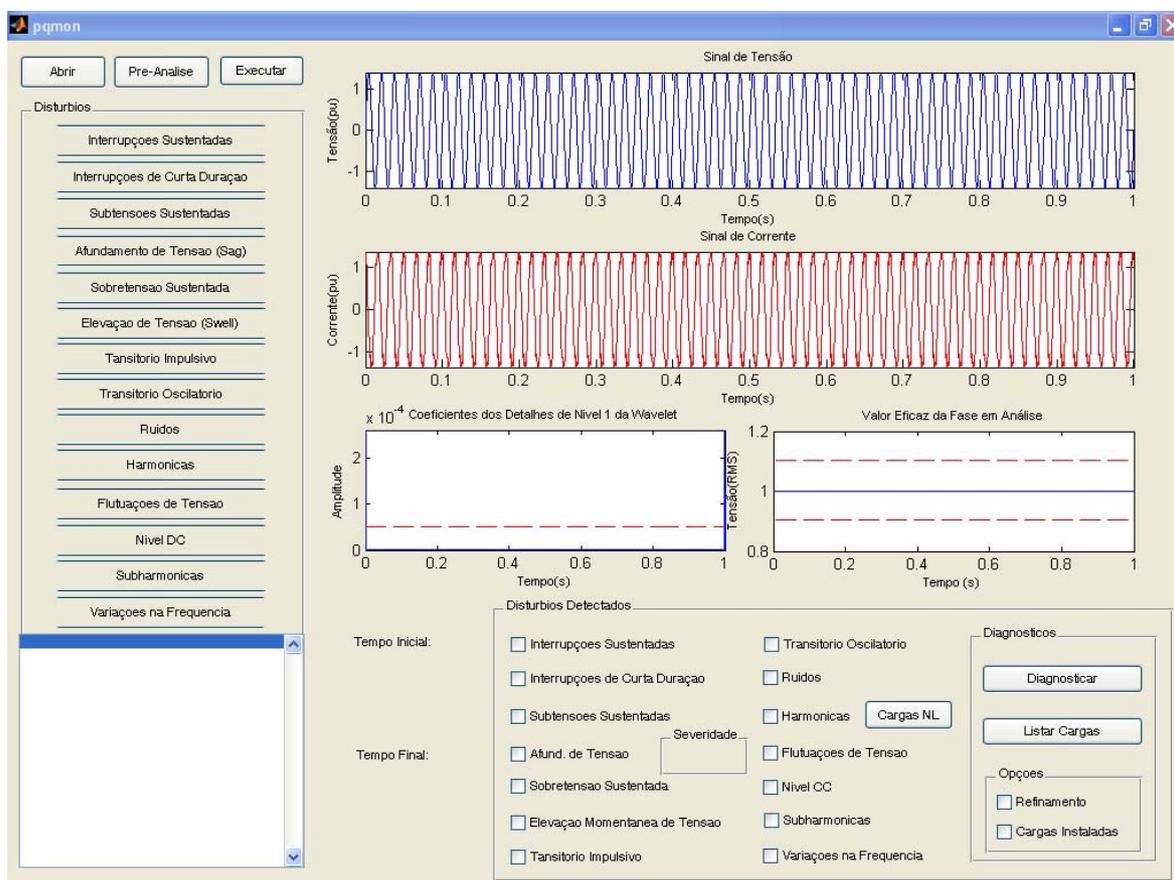


Figura 7.1. Janela do PQMON durante Processamento de Sinal.

Através do botão “Abrir” carregam-se os sinais a serem analisados. A função “Pré-Análise” possibilita a verificação do comportamento da tensão ou corrente ao longo do tempo. Sendo assim processa-se o respectivo sinal verificando as variações da amplitude, fase, frequência e THD. Neste instante já possível avaliar a presença de harmônicas,

variações de tensão de curta duração e variações na frequência. Utilizando a função “Executar”, os sinais são processados de modo que todos os distúrbios possam então ser caracterizados através das técnicas discutidas anteriormente.

O primeiro gráfico (Figura 7.1) mostra uma representação do sinal de tensão, neste caso com duração de 1 segundo. Importante observar que não existe limitação, a não ser do processamento do computador, para o tamanho do sinal a ser analisado. O gráfico logo abaixo apresenta a corrente. É importante observar que a corrente deve ser amostrada em um condutor comum às tensões medidas, caso contrário podem ocorrer inconsistências nas avaliações a serem realizadas pelo *software*.

Abaixo do sinal de corrente (Figura 7.1), à esquerda, encontram-se os detalhes de primeiro nível da MRA. Estes coeficientes são fundamentais para a definição de intervalos transitórios e de regime permanente. O limiar tracejado é calculado internamente, mas pode ser definido pelo usuário dependendo da situação em estudo. À direita, tem-se o gráfico que descreve o comportamento do valor eficaz da tensão. As linhas tracejadas determinam os níveis superior e inferior, que caso ultrapassados pelo valor eficaz, definem as sobretensões e subtensões, respectivamente. Os distúrbios capazes de serem localizados pelo PQMON podem ser observados na extrema esquerda da Figura 7.1.

Após executar o processamento dos sinais, os distúrbios encontrados são referenciados nas caixas de checagem. Assim o operador pode verificar os intervalos em que cada distúrbio ocorreu, aprovando ou não a análise realizada pelo sistema. O botão “Diagnosticar” ativa o bloco inteligente do sistema que passa a relacionar os distúrbios detectados às possíveis fontes geradoras dos mesmos. Caso o botão de checagem “Refinamento” esteja ativado, o diagnóstico será mais seletivo, isto porque serão aplicadas as técnicas de Diagnóstico de Falhas Múltiplas. O resultado do diagnóstico é apresentado numa nova janela e é constituído das fontes genéricas e fontes específicas dos distúrbios, dicas de como evitar os mesmos e cuidados a serem tomados para impedir conseqüências catastróficas. A Figura 7.2 mostra como é a janela de diagnósticos. Numa próxima versão do PQMON, haverá a possibilidade de exportar o diagnóstico para um documento de texto, incluindo gráficos e índices.

Buscando um diagnóstico que aponte as cargas que estão presentes no sistema em análise, pode-se escolher no painel de diagnósticos a opção “Cargas Instaladas”. Quando esta função é ativada, os resultados de possíveis fontes (casos genéricos) são cruzados com as cargas que compõem o circuito a fim de verificar se alguma delas enquadra-se no

distúrbio gerado. Uma vez que as cargas variam de sistema para sistema, existe a opção “Listar Cargas”, onde o operador tem a possibilidade de inserir ou excluir cargas que venham a compor ou não o circuito. A Figura 7.3 apresenta a janela que resume as características da função “Listar Cargas”.

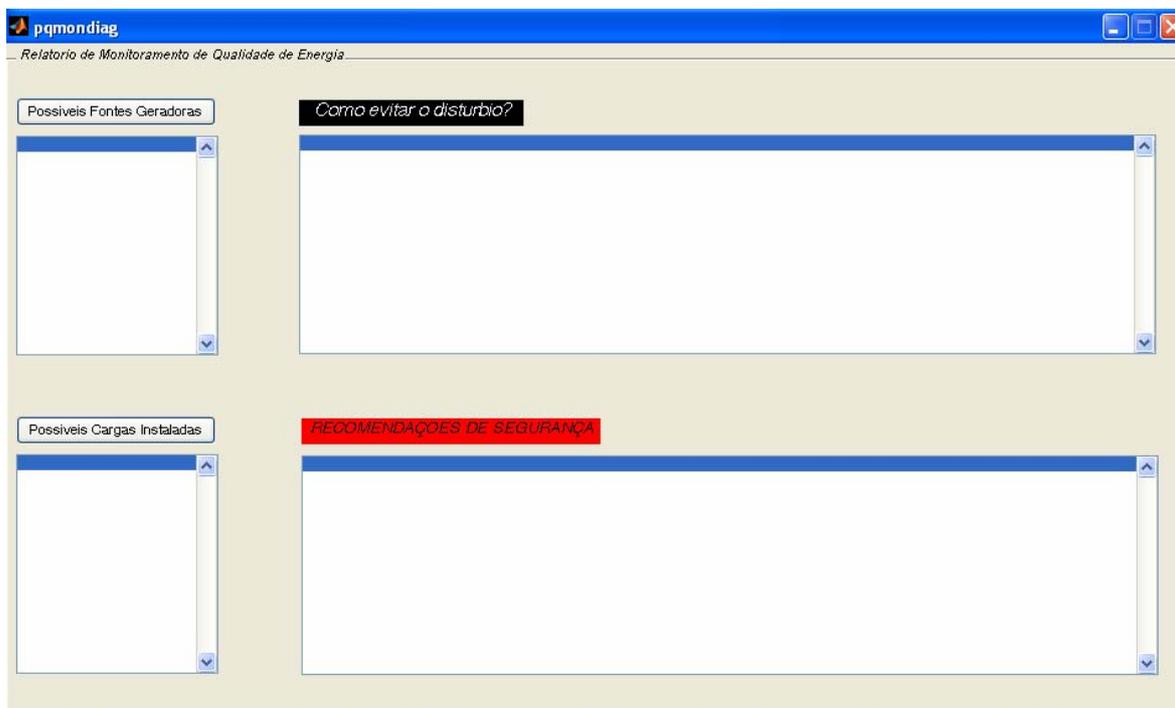


Figura 7.2. Janela que apresenta o relatório do diagnóstico.

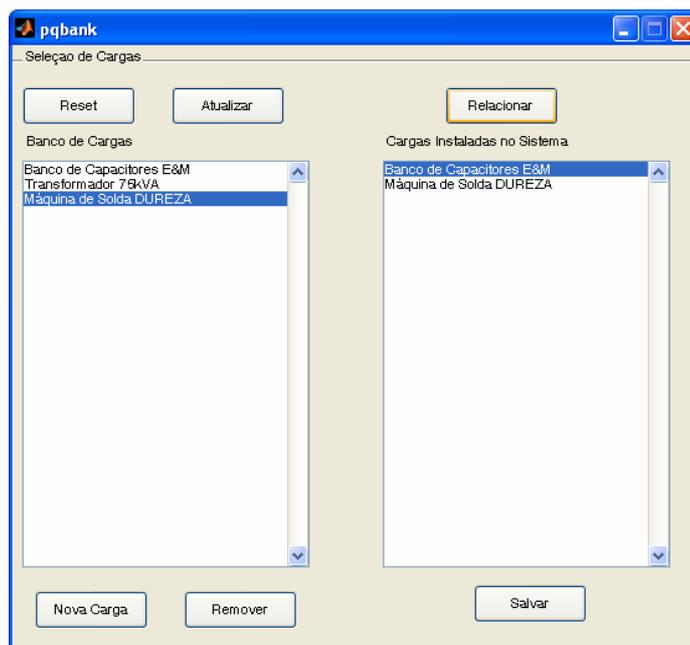


Figura 7.3. Janela para listagem de cargas que compõem o sistema em análise.

A inserção de novas cargas se dá através do botão “Nova Carga”. Importante salientar que ao inserir uma nova carga é necessário indicar as categorias de fontes de distúrbios que ela se enquadra. Por exemplo, se vamos inserir um inversor de frequência, ele estará enquadrado nas fontes referentes à “Cargas Não Lineares” e “Chaveamentos”. A Figura 7.4 mostra o painel para inclusão de novas cargas ilustrando o exemplo citado anteriormente.

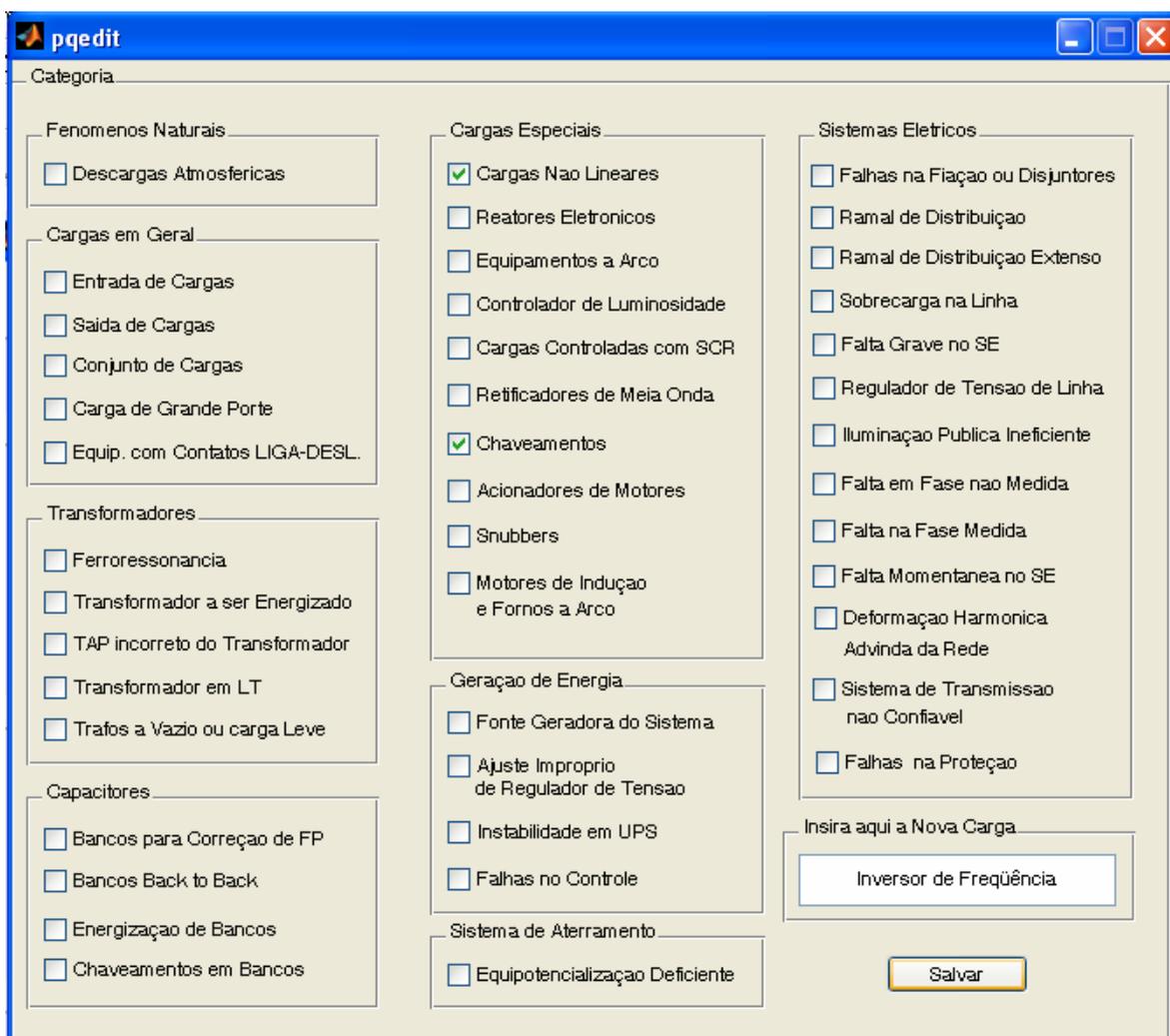


Figura 7.4. Painel para inclusão de cargas presentes no sistema.

7.1 Casos Hipotéticos

A seguir serão analisados quatro casos de distúrbios hipotéticos sendo observados seus respectivos diagnósticos. Todos os sinais foram obtidos através de simulação de sistemas elétricos em *software* Simulink/MATLAB 7.0[®]. As cargas instaladas (componentes dos sistemas cujos sinais foram simulados) foram inseridas no banco de dados do PQMON a fim de possibilitar diagnósticos mais precisos. O procedimento de análise do caso apresentado na seção 7.1.1 será descrito detalhadamente. Os casos das seções subseqüentes serão analisados de modo mais resumido.

7.1.1 Transitório Oscilatório Gerado por Banco de Capacitores Destinado a Correção de Fator de Potência

Na Figura 7.5 tem-se os sinais gerados pelo chaveamento de um banco capacitivo. O caso aqui apresentado corresponde a uma situação bastante típica, onde um banco de capacitores é inserido para compensação da potência reativa consumida por uma série de cargas indutivas.

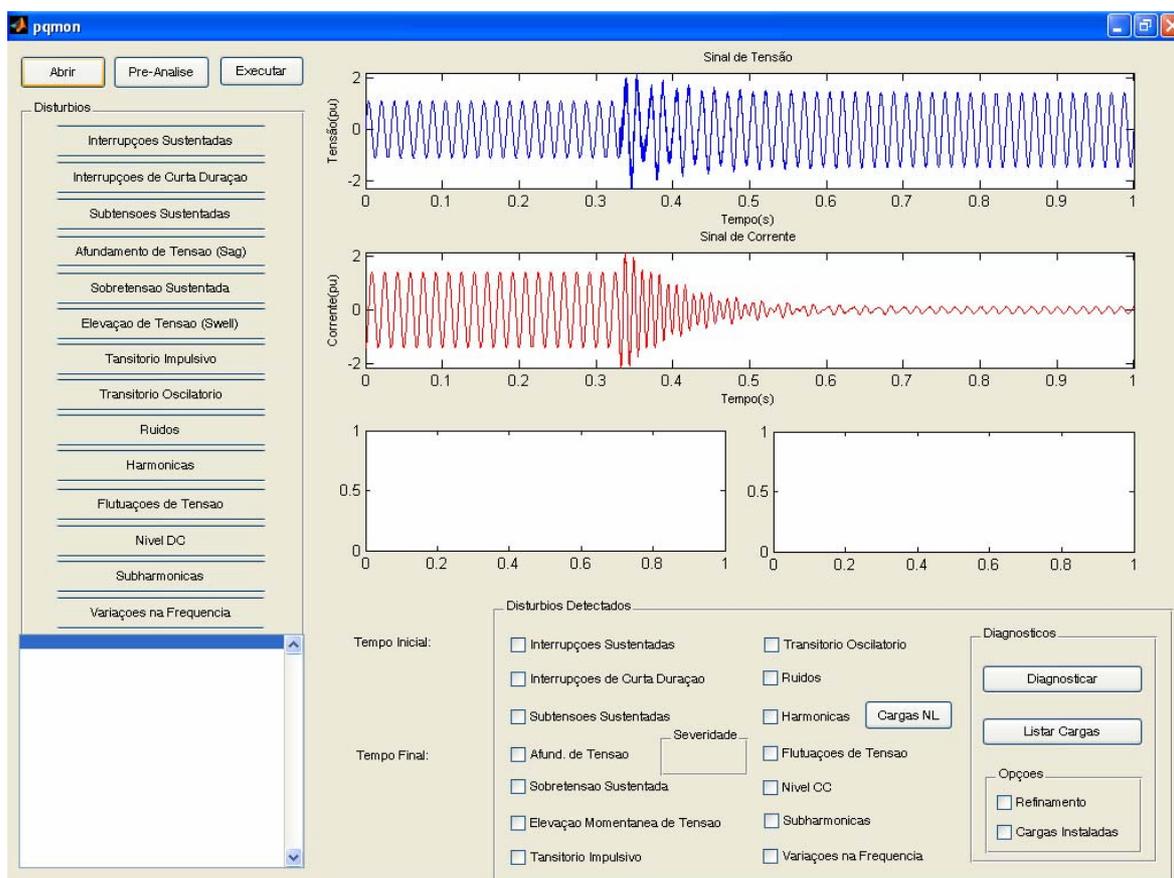


Figura 7.5. Sinais carregados para avaliação com o PQMON.

Inicialmente os sinais passam pela função “Pré-Análise” onde é possível estimar através de técnicas de inteligência artificial o comportamento das amplitudes, frequências, taxas de distorção harmônica e fases em cada instante. A função “Pré Análise” possibilita ao usuário uma idéia genérica do comportamento do sinal, sendo muito importante principalmente na confirmação de resultados e decisões. Além disso, a identificação e classificação de alguns distúrbios necessitam desta etapa. A Figura 7.6 apresenta os gráficos dos resultados estimados.

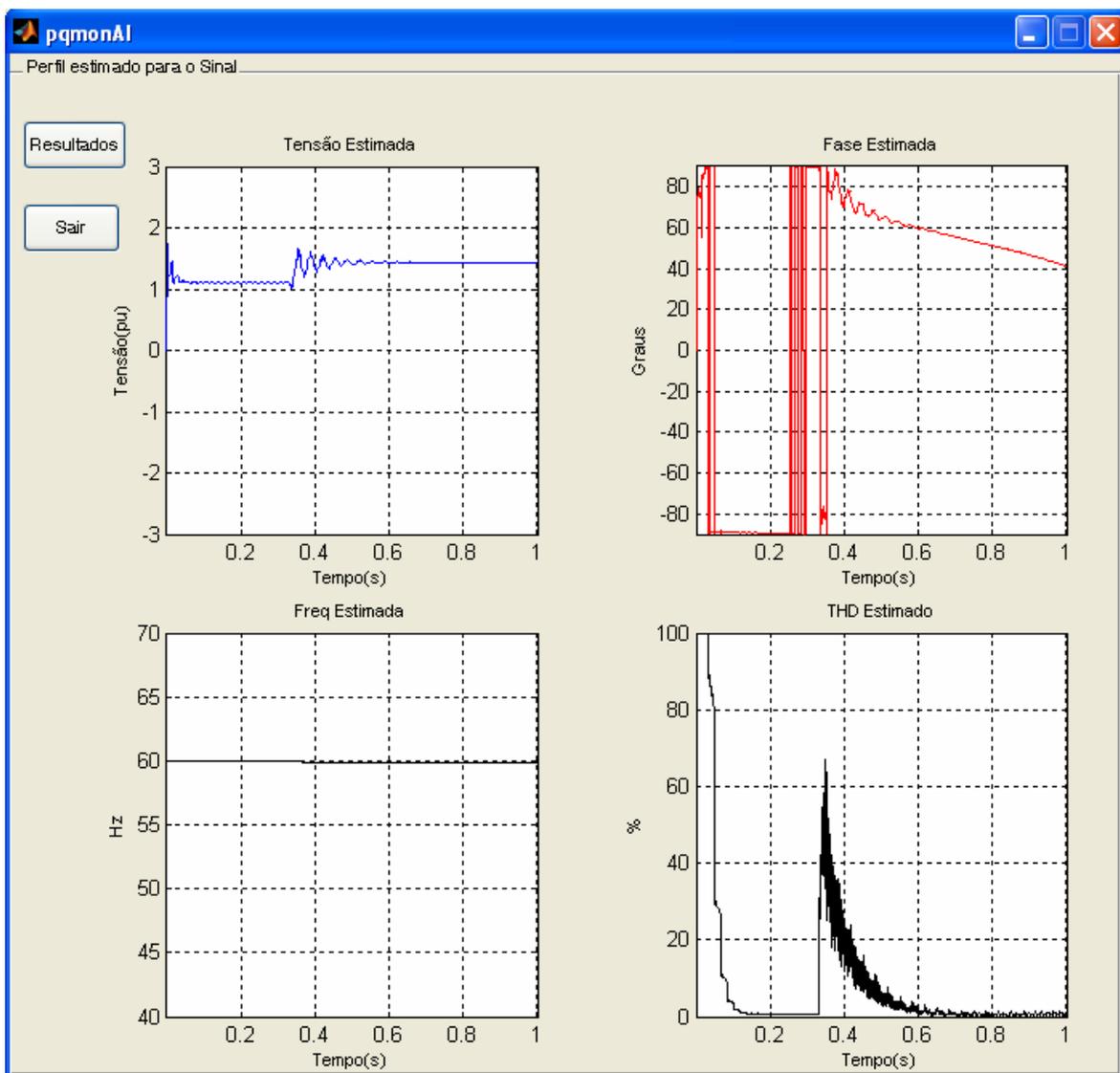


Figura 7.6. Resultados após análise prévia.

Como pode ser observado na Figura 7.6, a elevação do valor eficaz da tensão (gráfico superior à esquerda) e a frequência de operação do sistema (gráfico inferior à esquerda) estão bem caracterizadas. Já a fase estimada (gráfico superior à direita) sofre oscilações entre os ângulos de 90° e -90° durante os períodos de treinamento da rede

neural adaptativa. Num primeiro momento, logo no princípio do sinal, observou-se a fase em aproximadamente -90° , porém verifica-se que o tempo restante, após o transitório ocorrido no sinal, não foi suficiente para o cálculo do novo valor da fase do sinal.

A Taxa de Distorção Harmônica (gráfico inferior à direita) é calculada com base nas amplitudes das componentes harmônicas estimadas pela rede neural. Como se pode observar, durante os instantes iniciais ou transitórios, a rede não está devidamente treinada o que provoca variações consideráveis no valor do THD.

Realiza-se então o processamento do sinal para detecção de outros distúrbios através do botão “Executar”. Após a execução dos cálculos pôde-se verificar que entre todas as possibilidades de distúrbios a serem detectadas, foram observados pelo PQMON “Transitórios Oscilatórios”, “Afundamentos de Tensão” e “Elevações de Tensão”. Clicando nos botões referentes a cada um dos distúrbios (à esquerda), pode-se verificar o intervalo em que cada fenômeno foi localizado. A Figura 7.7 apresenta a *interface* contendo os distúrbios.

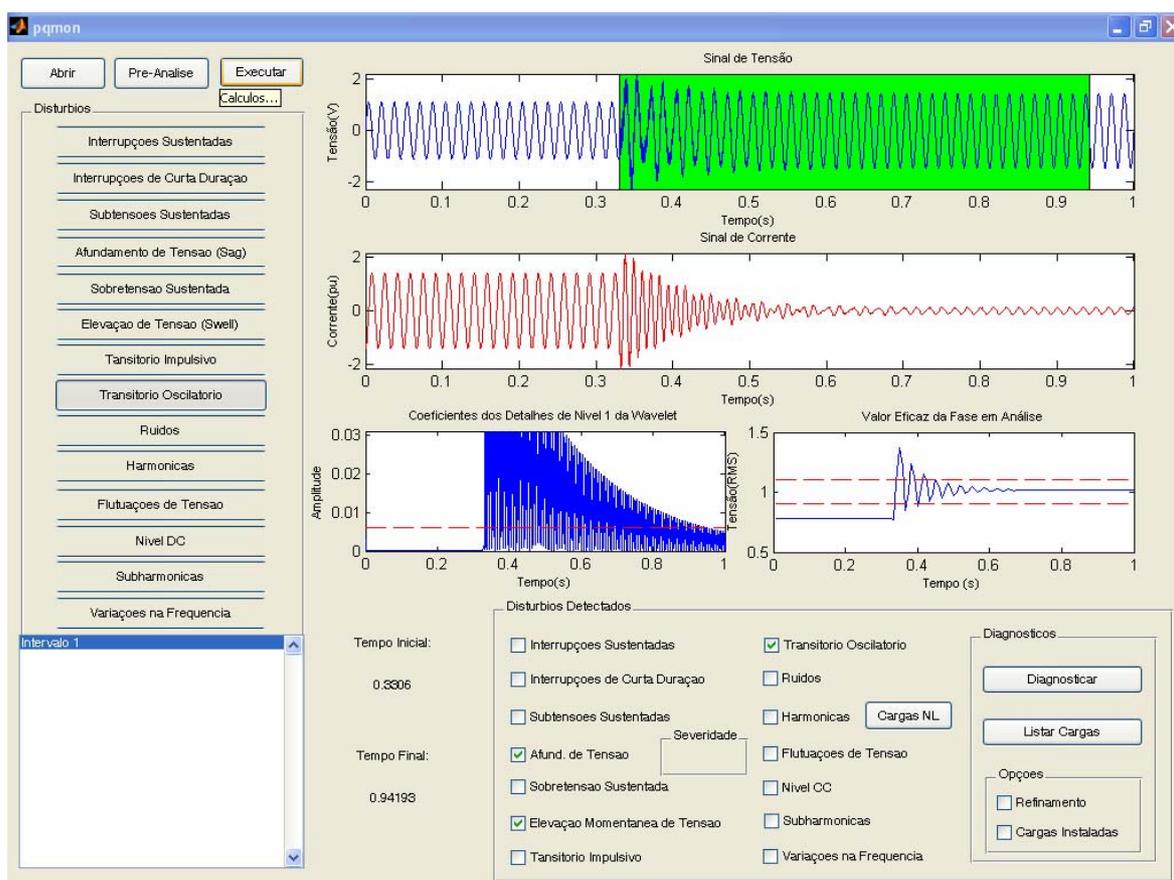


Figura 7.7. PQMON em análise de sinal referente a chaveamento de Banco Capacitivo.

Finalmente, após todo processamento do sinal, pode-se realizar o diagnóstico para identificação das fontes prováveis. Inicialmente será apresentado o diagnóstico sem acionar as funções “Refinamento” e “Cargas Instaladas”. Espera-se neste primeiro momento um diagnóstico com um número maior de fontes capazes de ocasionar estes distúrbios. Um fato relevante a ser considerado é que o diagnóstico pode ser realizado independentemente para cada distúrbio ou grupo de distúrbios. É importante destacar que isto pode alterar os resultados, uma vez que em situações que existam mais de um distúrbio selecionado, será levada em consideração a interação entre eles.

A Figura 7.8 contém o diagnóstico para o caso analisado. Observa-se através da Figura 7.9 que acionando as funções “Refinamento” e “Cargas Instaladas”, além dos resultados ficarem mais seletivos, tem-se a apresentação das cargas ou componentes do circuito que estejam associados aos eventos detectados previamente.

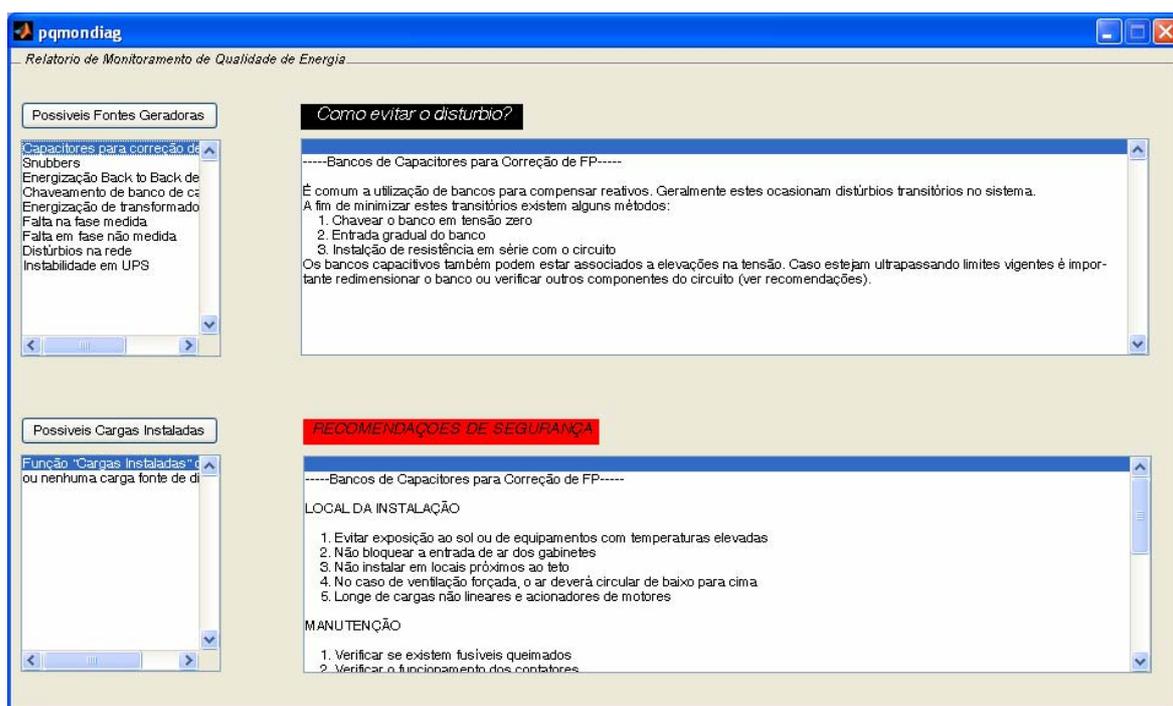


Figura 7.8. Diagnóstico simples do caso em análise.

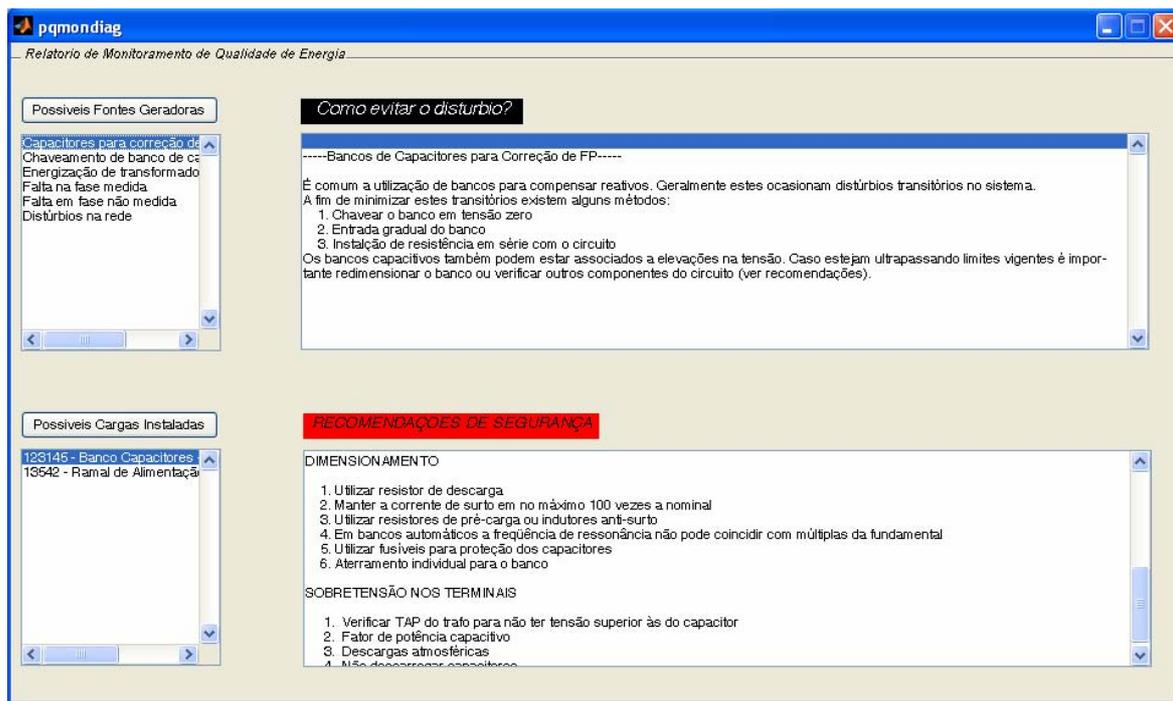


Figura 7.9. Diagnóstico seletivo do caso analisado.

As possíveis fontes apresentadas no diagnóstico estão associadas às combinações dos fenômenos presentes no sinal original: transitório oscilatório, afundamento de tensão e elevação de tensão. Analisando as Figuras 7.8 e 7.9 percebe-se a presença das fontes “Capacitores para Correção do Fator de Potência” e “Chaveamento de Bancos Capacitivos”, confirmando assim a coerência dos diagnósticos com o caso simulado. Os componentes presentes no sistema que possivelmente estão relacionados aos fenômenos também foram identificados: “Banco de Capacitores” e “Ramal de Alimentação”. São estes componentes que devem ser analisados para garantir bom funcionamento do circuito.

A fim de minimizar os impactos causados pelos distúrbios são apresentadas sugestões para extinção dos defeitos ou recomendações para convivência com os mesmos, minimizando a chance de consequências catastróficas, que coloquem em risco equipamentos e/ou pessoas. É importante destacar que agregando o software a um sistema de aquisição adequado, os diagnósticos poderão ser apresentados em tempo real, garantindo maior aplicabilidade na redução de catástrofes.

7.1.2 Variação de Tensão de Curta Duração Ocasionada por Falta Monofásica na Fase Medida

Na Figura 7.10 estão os sinais obtidos pela simulação de uma falta na fase medida do sistema em estudo. Após processamento dos sinais observaram-se os seguintes

distúrbios: “Afundamento de Tensão de Alta Severidade”, “Transitório Oscilatório” e “Ruídos”. A DWT permite a detecção exata do intervalo de tempo em que cada fenômeno ocorre (área em destaque do gráfico de tensão).

O diagnóstico é realizado utilizando as funções “Refinamento” e “Cargas Instaladas”. Como resultados observam-se as prováveis fontes de distúrbios: “Energização de Transformadores”, “Falta na Fase Medida” ou “Fenômeno Proveniente de outro Sistema Interligado”. Embora o PQMON não tenha reduzido a resposta a uma única fonte, o item “Falta na Fase Medida” encontra-se no conjunto de diagnóstico de máxima probabilidade. Este fato garante a veracidade da resposta.

Ao se referir aos componentes específicos instalados no sistema elétrico, o *software* propõe a verificação do ramal de entrada e o ponto de tomada de energia, locais estes onde existe maior probabilidade da ocorrência de faltas. Além disso, são apresentadas medidas preventivas para evitar o distúrbio e também recomendações de segurança que garantam a integridade física do sistema caso distúrbios de natureza semelhante venham ocorrer novamente.

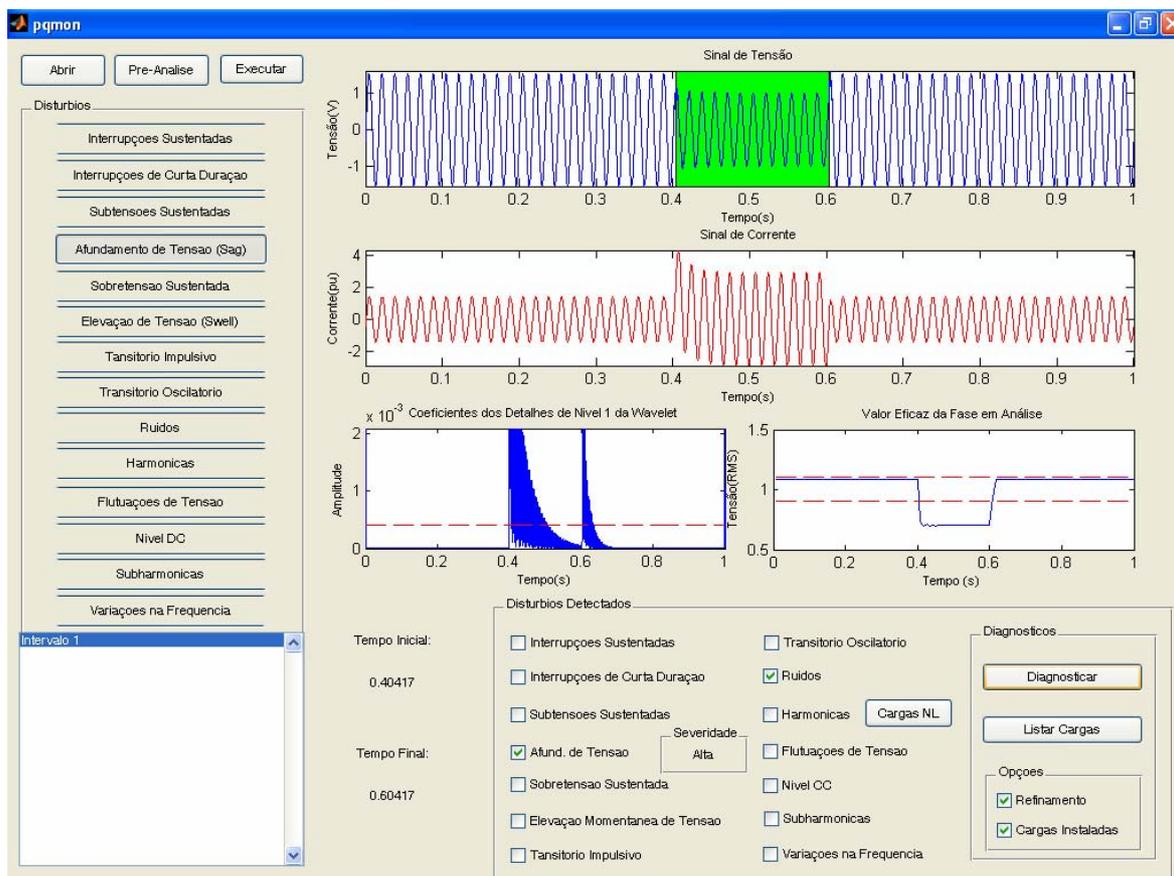


Figura 7.10. PQMON em análise de sinal referente à falta monofásica na fase medida.



Figura 7.11. Diagnóstico referente à condição de falta monofásica na fase medida.

7.1.3 Variação de Tensão de Curta Duração Ocasionada por Falta Monofásica em Fase não Medida

Este caso corresponde à mesma condição de falta do sistema apresentado na seção 7.1.2. A diferença reside apenas nas medições. Ao invés de serem observadas a tensão e corrente na fase onde ocorreu a falta, as medidas são efetuadas em uma das outras fases. Respeitando a teoria de componentes simétricos, pode-se confirmar a elevação desta tensão conforme a Figura 7.12.

O diagnóstico também é realizado ativando as funções “Refinamento” e “Cargas Instaladas”. A provável fonte de distúrbio resultante foi: “Falta em Fase não Medida”. Neste caso os distúrbios localizados conduziram a uma resposta única, exata e que confirma o diagnóstico da seção 7.1.2. Aqui entra uma discussão interessante: caso as duas fases fossem analisadas simultaneamente, haveria uma contribuição coletiva de informações, conduzindo a um diagnóstico mais preciso. Vê-se então a possibilidade da próxima versão do PQMON analisar sinais trifásicos, melhorando assim a qualidade dos relatórios gerados.

Como ocorreu na seção 7.1.2, referindo-se aos componentes específicos instalados no sistema, o PQMON propõe a verificação do ramal de entrada e o ponto de tomada de energia. Na Figura 7.13 também são apresentadas as recomendações para prevenção do distúrbio e recomendações de segurança.

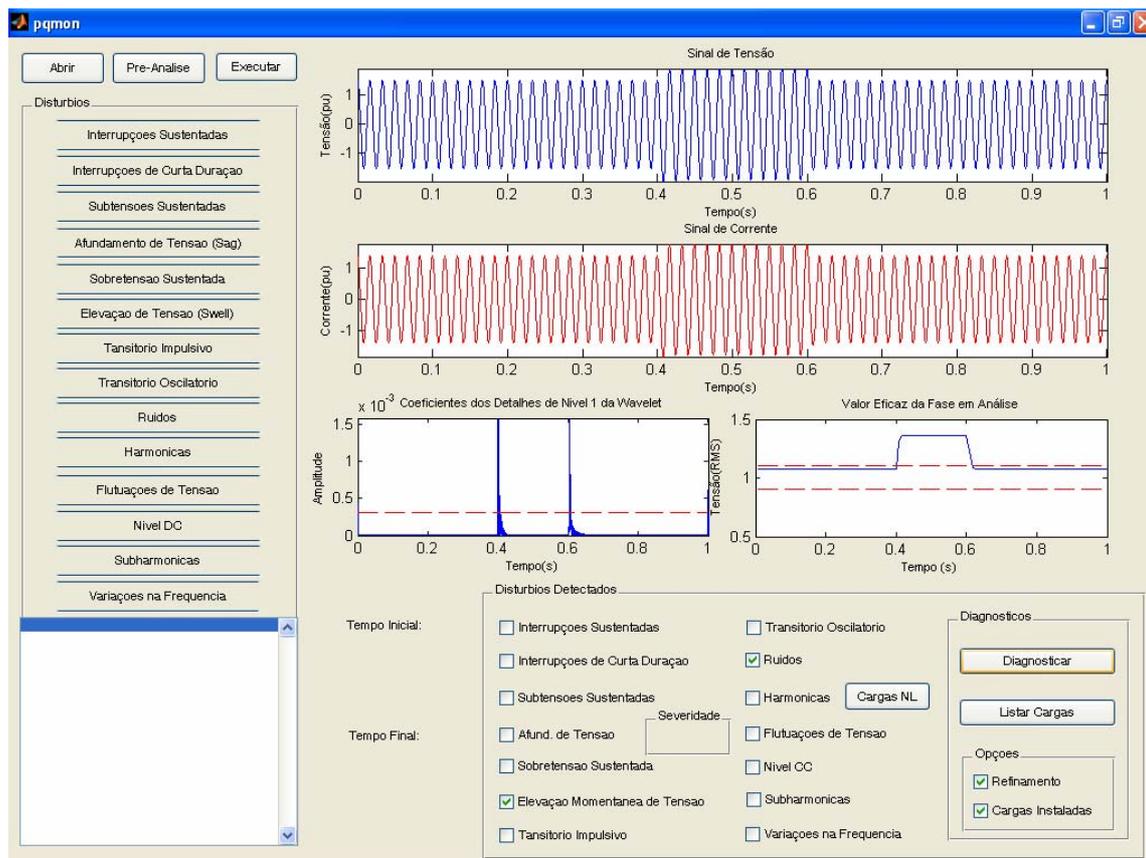


Figura 7.12. PQMON em análise de sinal referente à falta monofásica em fase não medida.



Figura 7.13. Diagnóstico referente à condição de falta monofásica em fase não medida.

7.1.4 Cargas Não Lineares Introduzindo Distorções Harmônicas

Neste caso simulou-se um sistema elétrico bastante simples. Além do gerador, um simples ramal de alimentação e um transformador, existia também um conjunto de retificadores de seis pulsos. Os resultados da análise prévia estão apresentados na Figura 7.14.

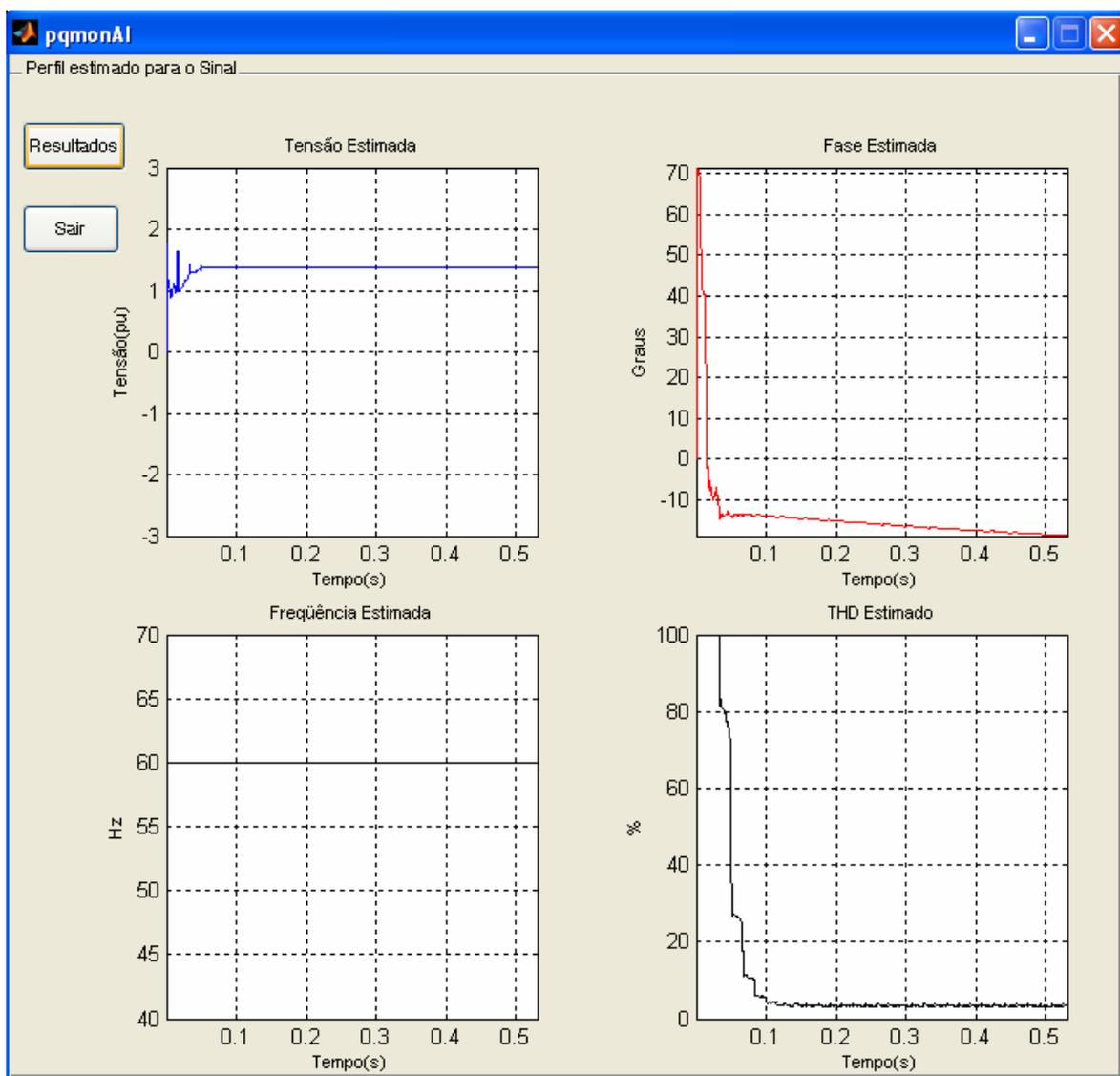


Figura 7.14. Resultados encontrados para estimação de parâmetros da tensão.

Como pode-se observar, os parâmetros foram coerentemente estimados pela rede neural adaptativa. Localizou-se a fundamental com valor eficaz e frequência constantes. A distorção estimada para a tensão foi pouco inferior a 4%. A estimação da fase é mais lenta que as demais, porém tende ao valor aproximado de -20° .

Processando o sinal através da função “Executar”, foi possível localizar a presença dos distúrbios referentes a “Harmônicas” e “Ruídos”. Os resultados estão na Figura 7.15.

Para casos onde se verifica a presença de harmônicas, pode-se utilizar a função “Cargas NL”. Esta função permite verificar qual o tipo de carga não linear poderia drenar a corrente apresentada. É uma função baseada em Lógica *Fuzzy* e apresenta como saídas possíveis as seguintes cargas não lineares: “Controladores de Velocidade de Motores”, “Fontes Chaveadas”, “Retificadores”, “Circuitos com modulação PWM” e “Lâmpadas de Descarga”.

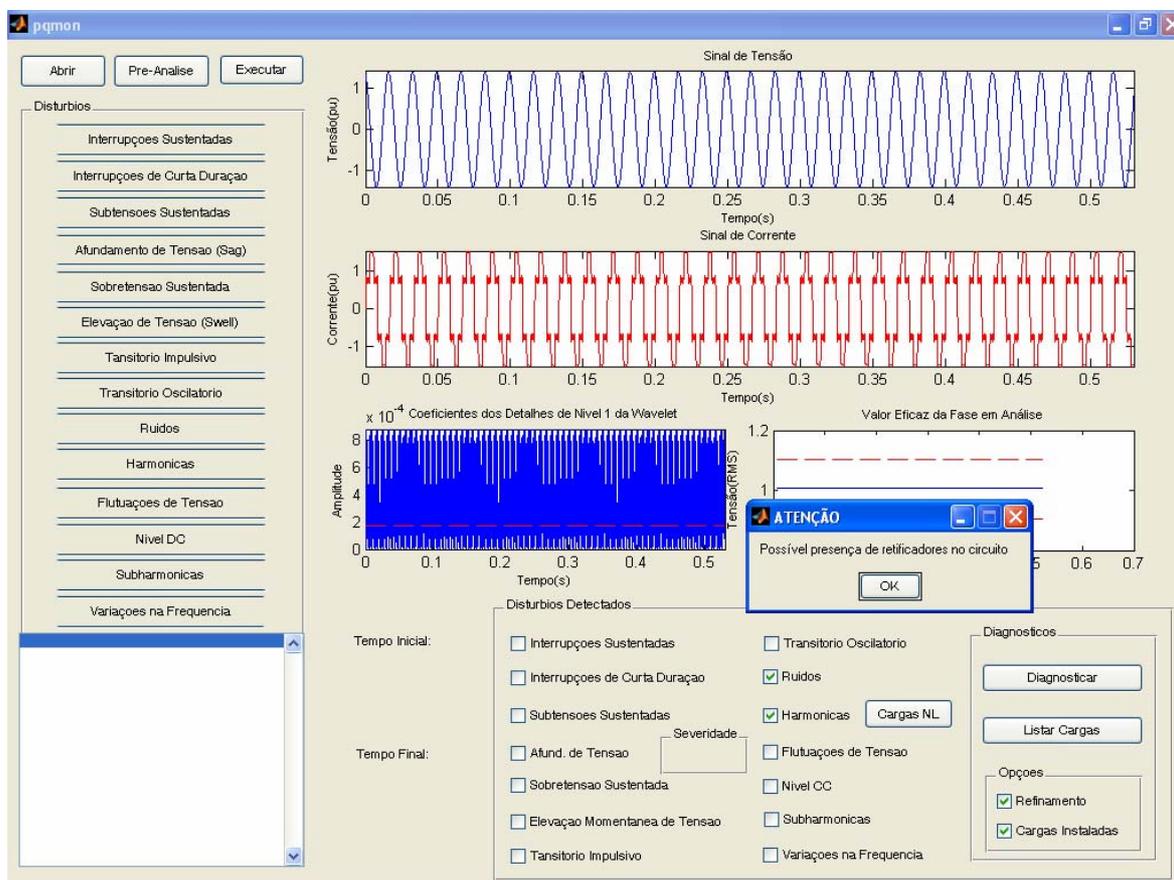


Figura 7.15. PQMON em análise de simulação de carga não linear.

Nas próximas versões do PQMON, será possível a estimação de mais cargas com base em novas regras a serem inseridas no sistema *Fuzzy*. A resposta obtida após a utilização da função “Cargas NL” também se encontra na Figura 7.15.

Finalmente realiza-se o diagnóstico. O conjunto de fontes prováveis inclui a presença genérica de cargas não lineares confirmando a validade da resposta. Analisando as cargas listadas do circuito, o refinamento é ainda maior, apresentando como possível carga geradora do distúrbio um retificador de seis pulsos. A Figura 7.16 contém o quadro resumo do diagnóstico.



Figura 7.16. Diagnóstico referente à condição de presença de carga não linear.

7.2 Caso Real

A fim de validar o sistema proposto vê-se a necessidade da realização de análises de casos reais. Neste primeiro momento, analisou-se somente um caso com dados colhidos de uma rede real.

7.2.1 Sinal da Concessionária Enersul - Energias do Brasil

Os sinais foram capturados com auxílio de um osciloscópio Tektronix TDS 420A. A taxa de amostragem foi de 2.5kHz. Considerando que o *software* foi desenvolvido para análises de sinais amostrados a 7680Hz, foi necessária uma simples adequação no mesmo. O local de aquisição dos sinais foi um dos barramentos do quadro de distribuição do BATLAB-1. Durante a aquisição, as cargas presentes no sistema eram computadores, lâmpadas fluorescentes (reatores), estabilizadores de tensão, um refrigerador e condicionadores de ar.

Após a execução do *software* confirmou-se a presença harmônica e de ruídos. Com base nas harmônicas que distorcem o sinal, a função “Cargas NL” prevê a predominância de fontes chaveadas no circuito. A Figura 7.17 apresenta os resultados da análise.

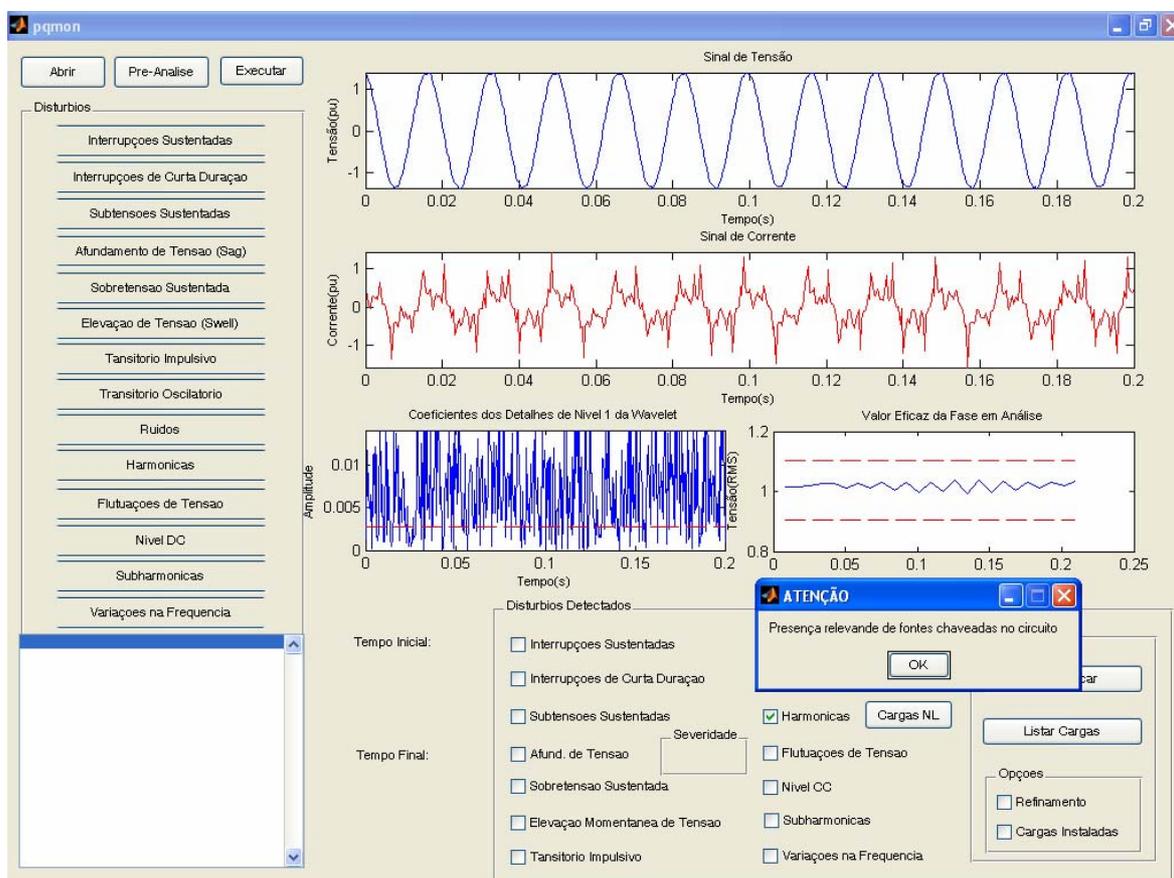


Figura 7.17. Resultados do PQMON em análise de sinais reais.

Na seqüência é solicitado ao PQMON que apresente um diagnóstico de prováveis causas associadas aos distúrbios observados. Os conhecimentos de engenharia levam a crer que o diagnóstico deva apresentar principalmente cargas não lineares (por inserirem harmônicos) como as principais fontes dos distúrbios. A Figura 7.18 contém os resultados do diagnóstico.

Como se pode confirmar, de um modo geral, as prováveis soluções de fontes dos distúrbios são de fato as cargas não lineares. As opções encontradas foram “Controladores de Velocidade”, “Cargas Não Lineares”, “Reatores Eletrônicos” e “Distúrbio Advindo de Fontes Externas”. A opção “Cargas Não Lineares” é uma opção genérica que deverá ser cruzada com as cargas instaladas no sistema para um diagnóstico mais preciso. O item “Distúrbio Advindo de Fontes Externas” admite a possibilidade de fontes presentes em outros circuitos estarem contribuindo para a distorção. Como pode ser observado na Figura

7.19, caso a função “Refinamento” não tivesse sido ativada, seria relacionada também a possibilidade de controladores de luminosidade como uma possível fonte dos distúrbios verificados.



Figura 7.18. Possíveis cargas instaladas no BATLAB-1 para geração dos distúrbios verificados no caso real.

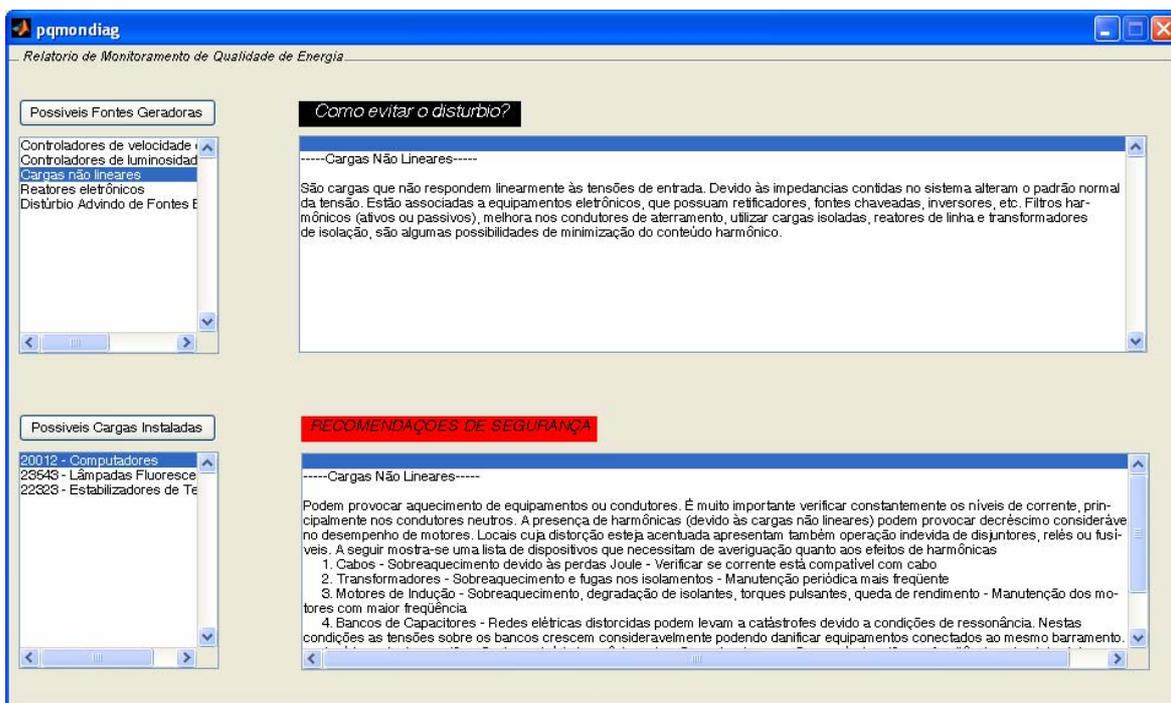


Figura 7.19. Possíveis cargas instaladas sem a presença de refinamento.

A ativação da função “Cargas Instaladas”, possibilita ao *software* informar quais são os equipamentos instalados no BATLAB-1 que possam estar associados às deformações no sinal. Deste modo, dentre as cargas, pode-se observar a possibilidade de computadores, lâmpadas fluorescentes e estabilizadores de tensão, estarem envolvidos nos distúrbios.

8. Conclusões

Deve-se considerar que os distúrbios que afetam a QE num determinado sistema elétrico, bem como suas fontes geradoras, são informações consideradas cada vez mais preciosas. Elas possibilitam a prevenção de conseqüências capazes de provocar desde prejuízos financeiros até danos físicos em objetos ou pessoas.

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de detectar, classificar e diagnosticar distúrbios em um sistema elétrico qualquer. O *software* resultante corresponde a uma composição de funções estocásticas, funções binárias, redes neurais artificiais, sistemas baseados em lógica Fuzzy, índices, e relações de causa e efeito. Desta maneira, esta ferramenta reúne informações suficientes para promover um ganho considerável nos conhecimentos referentes à QE.

Inicialmente foi estabelecida uma apurada revisão bibliográfica em busca dos principais distúrbios que afetam os Sistemas Elétricos de um modo geral. Deste modo foi possível reunir além das características peculiares a cada fenômeno, padrões e índices regidos por normas nacionais e internacionais. A quantidade, bem como o tipo dos distúrbios, reduziu-se àquilo que se tem de mais comum na literatura e com maiores impactos nos Sistemas Elétricos.

Posteriormente o estudo foi direcionado para as fontes geradoras de distúrbios. Possibilitou-se a associação de cargas, fenômenos naturais e eventos diversos às deformações verificadas em formas de ondas de tensões e correntes. Claramente este consiste em um estudo essencialmente qualitativo, onde se buscou definir classes de cargas e eventos principais que possam estar presentes em qualquer Sistema Elétrico.

Conhecidos os principais distúrbios e suas principais fontes geradoras, o grande desafio estabeleceu-se em reunir as principais técnicas de processamento digital de sinais. Observou-se em trabalhos mais antigos que a única técnica que era empregada para extração de características de sinais era a Transformada de Fourier (computacionalmente: FFT). Porém, o desenvolvimento de novas técnicas e estudos mais recentes mostraram que novas ferramentas como a STFT (*Short-Time Fourier Transform*) e *wavelets*, vêm sendo amplamente utilizadas em processamento de sinais, apresentando desempenho excelente.

Deste modo buscou-se um sistema capaz de adequar cada ferramenta a sua aplicação mais apropriada. Sendo assim o *software* resultante veio a reunir uma série de

componentes, a saber: filtros utilizados para pré-processamento dos sinais evitando principalmente o efeito de aliasing; DWT utilizada para localização de faixas de altas frequências e conseqüentemente o início e fim de distúrbios; cálculos estatísticos para definição de índices e padrões de classificação; FFT utilizada para definir o conteúdo espectral em intervalos que se observe um comportamento em regime permanente; Periodograma Médio utilizado para definição de baixas frequências, inclusive a fundamental, principalmente em sinais que apresentam intervalos em regime transitório; STFT associada ao Periodograma Médio para caracterização de frequências ao longo das janelas pré-estabelecidas nos sinais.

Além das ferramentas supracitadas utilizaram-se também técnicas de inteligência artificial. Para localização de distúrbios referentes à variação de frequência no sistema foi utilizada uma rede neural adaptativa. Tal rede é capaz de estimar a frequência do sistema, permitindo observar os instantes de possíveis variações. Além das estimações de frequências, redes neurais artificiais também foram aplicadas na estimação de amplitudes, fases e taxas de distorção harmônica dos sinais. Foi desenvolvido um sistema *Fuzzy* para avaliação da severidade de subtensões de curta duração. Foi desenvolvido também um bloco baseado em Lógica *Fuzzy* para caracterização de cargas não lineares. Neste bloco as regras estão baseadas no conteúdo espectral das correntes drenadas.

Para diagnóstico das fontes associadas aos distúrbios utilizou-se um algoritmo de faltas múltiplas. Tal técnica baseia-se em omitir fontes que estejam associadas a distúrbios não verificados e procurar o conjunto que reúna a maior probabilidade de estar associado aos fenômenos constatados nos sinais.

Com auxílio do Simulink/MATLAB[®] foram modelados sistemas elétricos diversos, e simularam-se 50 condições diferentes. A detecção dos distúrbios foi precisa em todas as situações e os diagnósticos foram condizentes com o conhecimento adquirido ao longo do trabalho. Foram analisados sinais com até 8 minutos de duração, amostrados a 7,68kHz, e não foi observado comprometimento do processador CELERON[®], 1,4GHz, utilizado neste estudo. Com auxílio de um osciloscópio Tektronix TDS 420A, foram também colhidos sinais da rede elétrica, com frequência de amostragem de 2,5kHz, e analisados pelo *software* PQMON. Todos os resultados foram satisfatórios.

O *software* PQMON abre a possibilidade para estudos mais amplos e significativos na área de Qualidade de Energia. Associar distúrbios às suas possíveis fontes reside numa

grande contribuição que procura integrar áreas como a Eletrônica de Potência e Sistemas Elétricos de Potência aos conceitos que interferem na Qualidade de Energia.

8.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Alguns detalhes podem ser observados no sentido de melhorar o desempenho do *software*:

- A inserção de análises trifásicas corresponde a um importante avanço. Com isto, além de melhorar a precisão na detecção e classificação das perturbações, novas classes de distúrbios poderão ser analisadas.

- A subdivisão dos transitórios oscilatórios em classes baseadas no conteúdo espectral dominante corresponde a uma importante contribuição para melhorar os diagnósticos. Isto porque embora muitos equipamentos causem transitórios, cada distúrbio possui características suficientes para diferenciar suas fontes.

Outras melhoras significativas estão associadas aos blocos que utilizam inteligência artificial:

- A expansão das regras para caracterizar a severidade das elevações de tensão possibilitará mais uma informação relevante.

- O bloco associado à identificação de cargas não-lineares pode também ser facilmente expandido desde que sejam conhecidas as correntes de novos equipamentos.

- As estimações realizadas pelas redes neurais artificiais podem ser expandidas para análises de flutuações de tensão, conteúdos de frequências subharmônicas e níveis CC. Desta maneira um número maior de distúrbios estará associado às técnicas de inteligência artificial, o que possibilita maior compactação do *software*, com conseqüente melhora no tempo de processamento.

Atualmente o PQMON 1.0 apresenta os diagnósticos numa janela do próprio *software*. É muito importante abrir a possibilidade de uma função que exporte os diagnósticos para um documento de texto. Isso torna possível a inserção ilimitada de gráficos e índices, enriquecendo consideravelmente às informações extraídas dos sinais.

Torna-se essencial a disponibilidade do *software* num modo executável e independente. Atualmente, o MATLAB[®] possibilita a criação de arquivos executáveis, porém observa-se um decréscimo razoável no desempenho dos programas.

Outro detalhe importante está na aquisição dos sinais. A inserção de um módulo capaz de coletar dados em diferentes taxas de amostragem possibilitará a maior

flexibilidade e independência do sistema. Com este melhoramento busca-se um sistema capaz de permanecer conectado a rede elétrica, armazenando dados periodicamente ou quando um distúrbio for detectado. Para a conclusão desta etapa será necessária a implementação de um *hardware* que isole, filtre e amplifique adequadamente os sinais. Será necessária também a utilização de conversores AD antes dos sinais serem disponibilizados para processamento do *software*. A presença de um equipamento analisador de rede capaz de identificar variações nos padrões de tensão permitirá a possibilidade de análises em tempo real. Isto garantirá a disponibilidade de diagnósticos instantâneos, possibilitando a oportunidade de operações cada vez mais adequadas em sistemas elétricos.

Finalmente verifica-se como ponto máximo da evolução do *software* a implementação do mesmo em linguagem de máquina, proporcionando assim um equipamento (*hardware*), que reúna desde as funções de aquisição e tratamento de dados até a realização de diagnósticos de Qualidade de Energia.

Referências

- [1] Gaouda, A. M.; Salama, M. M. A.; Sultan, M. R. *et al.* Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, Oct. 1999.
- [2] Fuller, J. F.; Fuchs, E. F.; Roesler, D. J. Influence of Harmonic on Power Distribution System Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 2, pp. 549-556, Jan. 1997.
- [3] Brooks, D. L.; Dugan, R. C.; Sundaram, M. W. A. Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, Jan. 1998.
- [4] Afonso, J. L.; Martins, J. S. Qualidade de Energia Elétrica. *Revista O Eletricista*, no. 9, ano 3, pp. 66-71, Julho 2004.
- [5] Mazurkiewicz, G. Disponível em <http://www.achrnews.com/CDA>. Acessado em 20 de Agosto de 2006.
- [6] Il-Yop Chung; Dong-Jun Won; Joong-Moon Kim; *et al.* Development of power quality diagnosis system for power quality improvement. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol.2, p. 1261, July 2003.
- [7] Oleskovicz, M. *Qualidade de Energia – Fundamentos básicos*. São Paulo, 2004. Tese (Pós Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, pp. 22-26.
- [8] Stones, J.; Collinson, A. Power Quality. *Power Engineering Journal*, April, 2001.
- [9] Bergeron, R. Voltage Unbalance on Distribution Systems - Phase I. *Canadian Electrical Association*, project no. 231, D 488, Montréal, Jan. 1989.
- [10] Wright, P. An Overview of Harmonic and Flicker Emission Standards and their Associated Measurements. *Power Engineering Journal*, April, 2001.
- [11] Lamba, H.; Grinfeld, M.; McKee, S.; *et al.* Subharmonic Ferroresonance in an LCR Circuit with Hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no.4, July, 1997.
- [12] Oliveira, J. C. *Capítulo II – Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade*. Projeto SIDAQEE – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG.
- [13] Delmont, O. *Utilização da Transformada Wavelet para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica*. São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- [14] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Santoso, S.; *et al.* *Electrical Power Systems Quality*, 2nd Edition, p. 14, New York, Ed. McGraw-Hill, 1996.
- [15] Hunter, I. Power Quality issues a Distribution Company Perspective. *Power Engineering Journal*, April, 2001.
- [16] Conroy, E. Power Monitoring and Harmonic Problems in the Modern Building. *Power Engineering Journal*, April, 2001.
- [17] Arnold, R. Solutions to the Power Quality Problems. *Power Engineering Journal*, April, 2001.
- [18] Proakis, J. G.; Manolakis, D. G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. 3rd edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [19] Oppenheim, A. V.; Schafer, R. W.; Buck, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2^a Edição, pp. 50-85, Prentice-Hall, 1999.
- [20] Cooley, J. W.; Tukey, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.* 19, pp. 297–301, 1965.
- [21] Misiti, M. *et al.* *Wavelet Toolbox: User's Guide*. Natick, MA, 1997.
- [22] Polikar, R. The Wavelet Tutorial – Part 2. Disponível em <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>. Acessado em 27 de Novembro de 2006.
- [23] YuHua Gu; Bollen, M. H. J. Time-Frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, pp. 1279–1284, Oct. 2000.
- [24] Azam, M. *Capacity and reliability analysis of industrial power systems and a dependency model based approach for power quality analysis*. Storrs, 2002. Dissertação (M.S. thesis, Dept. Elect. Comput. Eng.) – Univ. Connecticut.
- [25] Schmid, R. F. Rastreamento Eficiente de Faces em um Subespaço Wavelet. São Paulo, 2001. Dissertação (Instituto de Matemática e Estatística). Universidade de São Paulo.
- [26] Daubechies, I. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36, no.5, pp. 961-1005.
- [27] Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets. *CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics*, no. 61, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.

- [28] Angrsani, L.; Daponte, P.; D'Apuzzo, M.; *et al.* A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis. *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 13, pp. 990–998, Oct. 1998.
- [29] Ibrahim Jury, E. *Theory and Application of the Z-Transform Method*, Krieger Publishing Co., Huntington, New York, 1964.
- [30] Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*. vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [31] Hollander, M.; Wolfe, D.A. *Nonparametric Statistical Methods*, 2nd ed., Wiley, New York, 1999.
- [32] IEEE. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, Std. 1159, 1995.
- [33] Styvaktakis, E. On feature extraction of voltage disturbance signals. Göteborg, Sweden, 2000. Thesis (Degree of Licenciate of Engineering) – Dept. Signals and Systems, Chalmers University of Technology.
- [34] Widrow, B.; Lehr, M. A. 30 Years of Adaptative Neural Networks: Perceptron, Madaline and Backpropagation. *Proc. IEEE*, vol. 78, no. 9, pp. 1415-1442, 1993.
- [35] Shatshat, R. El; Kazerani, M.; Salama, M. M. A. On-line tracking and mitigation of power system harmonics using ADALINE-based active power filter system. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol.4, pp. 2119-2124, 2004.
- [36] Pradhan, A. K.; Routray, A.; Basak, A. Power system frequency estimation using least mean square technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 1812- 1816, 2005.
- [37] Tanaka, K.; Wang, H. O. *Fuzzy Control Systems, Design and Analysis*, John Willey & Sons, 2001.
- [38] Shipp, D. D.; Swartz, M. E.; Woodley N. H. Expert System for Analysis of Electric Power System Harmonics. *IEEE Industry Applications Magazine*, March/April, 1995.
- [39] Nassif, A. B.; Nino, E. E.; Wilsun Xu. A V-I Slope-Based Method for Flicker Source Detection. *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, Oct., 2005.

- [40] Umeh, K.; Mohamed, A. Intelligent System for Identification of Harmonics Originating from Single Phase Nonlinear Loads. *IEEE SoutheastCon*, Proceedings, April, 2005.
- [41] Nawi, S. M.; Johari, J.; Abidin, A. F. A Fuzzy Logic Application for Identification of Harmonics Disturbances Sources. *National Power Energy Conference (PECon)*, Proceedings, Bangi, Malaysia, 2003.
- [42] Bell, S. C.; McArthur, S. D. J.; McDonald, J. R.; *et al.* Protection Performance Monitoring on a Transmission Network. *IEEE Colloquium on Operational Monitoring of Distribution and Transmission Systems (Digest No. 1997/050)*, pp.8/1 – 8/4, 28 January 1997.
- [43] Kopparapu, C.; Chandrasekaran, A. A Study on the Application of Wavelet Analysis to Power Quality. *Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory*, March, 1998.
- [44] Bonatto, B. D.; Niimura, T.; Dommel, H.W. A Fuzzy Logic Application to Represent Load Sensitivity to Voltage Sags. *8th International Conference on Harmonics And Quality Power*, vol. 1, pp. 60-64, Oct., 1998.
- [45] Ibrahim, W. R. A.; Morcos, M. M. A Power Quality Perspective to System Operational Diagnosis Using Fuzzy Logic and Adaptive Techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no 3, July, 2003.
- [46] Azam, M. S.; Fang Tu; Pattipati, K. R.; *et al.* A Dependency Model-Based Approach for Identifying and Evaluating Power Quality Problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, July, 2004.
- [47] Wei-Nan Chang; Chi-Jui Wu; Shih-Shong Yen. A Flexible Voltage Flicker Teaching Facility For Electric Power Quality Education. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 1, Feb. 1998.
- [48] Peixoto, G. R.; Oliveira, J. C.; Oliveira, F. A. A Proposal for Voltage Flicker Measurement in Electrical Power Systems. *Proceedings of the 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, vol. 2, pp. 1309-1312, August, 1995.
- [49] Medeiros, C. A. G. *Contribuições para a Conceituação, Medição, Efeitos e Análise dos Limites Relacionados com Flutuações de Tensão*. Uberlândia, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia.
- [50] International Electrotechnical Commission. *Amendment to include the 120V specification of the IEC 61000-4-15*. IEC 61000-4-15 Amd. 1 Ed. 1.0.

- [51] Salem, M.E.; Mohamed, A.; Samad, S. Abd.; *et al.* Development of a DSP-Based Power Quality Monitoring Instrument for Real-Time Detection of Power Disturbances. *International Conference on Power Electronics and Drives Systems, PEDS*, vol.1, pp. 304–307, Jan. 2006.
- [52] Kreiss, D. G. *The Dranetz Field Handbook for Power Quality Analysis*. Dranetz, 1991.
- [53] Dash, P. K.; Swain, D. P.; Routray, A.; *et al.* An Adaptive Neural Network Approach for the Estimation of Power System Frequency. *Electric Power Systems Research*, no. 41, pp. 203-210, 1997.
- [54] Fang Tu; Pattipati, K.R.; Deb, S.; *et al.* Computationally efficient algorithms for multiple fault diagnosis in large graph-based systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, vol.33, no.1, pp. 73- 85, Jan. 2003.
- [55] Shakeri, M.; Pattipati, R.; Raghavan, V.; *et al.* Optimal and near-optimal algorithms for multiple fault diagnosis with unreliable tests. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C*, vol.28, no.3, pp.431-440, Aug. 1998.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)