



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL
EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

DIEGO HABIB SANTOS NOLASCO

**ALGORITMOS FUZZY PARA DIAGNÓSTICO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
EM NÍVEIS DE BAIXA TENSÃO**

**ILHÉUS-BA
2015**

DIEGO HABIB SANTOS NOLASCO

**ALGORITMOS FUZZY PARA DIAGNÓSTICO DE
QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM NÍVEIS DE BAIXA
TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia
da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte
das exigências para obtenção do título de Mestre em
Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira

ILHÉUS-BA
2015

N789 Nolasco, Diego Habib Santos.

Algoritmos Fuzzy para diagnóstico de qualidade de energia elétrica
em níveis de baixa tensão/ Diego Habib Santos Nolasco. - Ilhéus-BA, 2015.
123 f.:il.;anexo.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Santa Cruz. Pro-
grama de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.
Inclui referências.

1. Controladores programáveis. 2. Sistemas difusos. 3. Sistemas de
controle inteligente. 4. Energia Elétrica - Qualidade. I.Título.

CDD 629.895

DIEGO HABIB SANTOS NOLASCO

**ALGORITMOS FUZZY PARA DIAGNÓSTICO DE
QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM NÍVEIS DE BAIXA
TENSÃO**

Ilhéus-BA, 17/11/2015

Comissão Examinadora

Eduardo Palmeira

Prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira
UESC
(Orientador)

Dany S. Dominguez

Prof. Dr. Dany Sanchez Dominguez
UESC

B

Prof. Dr. Benjamín René Callejas
Béregal
UFRN

Gostaria de dedicar este trabalho aos meus amigos, familiares e principalmente aos mestres que contribuíram para que essa caminhada fosse possível.

Agradecimentos

- Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu Orientador Prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira, pela confiança, pela amizade e pela orientação acadêmica e pessoal.
- Ao meu amigo Diego Bomfim Andrade e a sua empresa DBA Soluções em Engenharia Elétrica, pelo auxílio na coleta dos indicadores de QEE. Sem sua ajuda o desenvolvimento deste trabalho não seria possível.
- A todos os colegas do PPGMC/UESC, que contribuíram de alguma forma no meu trabalho. Em especial ao meu colega e amigo Alexandre dos Santos Silva, por todo apoio e amizade.
- Ao programa PPGMC/UESC, pela oportunidade de aprendizado.
- A coordenação do curso de eletromecânica do IFBA/Campus de Vitória da Conquista, pela compreensão e apoio.
- A minha esposa Deborah Martins, pelo apoio e paciência durante o programa. E aos amigos e familiares que acreditaram que esse sonho seria possível.

"normas de operação para um sistema elétrico também variam de um país para outro, ficando difícil estabelecer critérios gerais para mensurar a qualidade da energia elétrica"(DECKMANN; POMILIO, 2010).

Algoritmos Fuzzy para diagnóstico de qualidade de energia elétrica em níveis de baixa tensão

Resumo

No projeto de pesquisa foi desenvolvido um algoritmo fuzzy para realização de tomadas de decisões com objetivo de diagnosticar a qualidade de energia elétrica consumida em níveis de baixa tensão, 220 Volts monofásico e 380 Volts trifásico. O sistema implementado foi aplicado sobre uma base de dados coletada no ponto de acoplamento comum de uma indústria do ramo alimentício durante um período de pouco mais de 24 horas. Assim, foram obtidos os diagnósticos de qualidade de energia elétrica para os indicadores de distorção harmônica total de tensão e corrente, fator de potência, variação de tensão em regime permanente, e fator de desequilíbrio, através da implementação do método de inferência Mamdani Clássico. O presente trabalho também apresenta uma comparação entre os métodos de inferência de: Mamdani Clássico, Larsen, e Hamacher, através de suas t-normas e t-conormas N-duais.

Palavras-chave: qualidade de energia elétrica, controladores fuzzy, diagnóstico, sistemas de inferência fuzzy.

Fuzzy algorithms for diagnosis of power quality at low voltage levels

Abstract

In the research project it was developed a fuzzy algorithm to perform decision-making in order to diagnose the quality of the electricity consumed in low voltage levels, 220 Volt single-phase and three-phase 380 Volts. The implemented system was constructed on a database collected in the common coupling point of the food industry for a period of just over 24 hours. The power quality diagnostics were obtained by the total harmonic distortion indicators of voltage and current, power factor, voltage variation in steady state, and imbalance factor, through the implementation of Classic Mamdani inference method. This work also presents a comparison between the methods of inference: Classic Mamdani, Larsen, and Hamacher, through its t-norms and t-conorms N-dual.

Keywords: power quality, fuzzy controllers, diagnosis, fuzzy inference systems.

Lista de figuras

Figura 1 – Vista em secção transversal de uma máquina elementar CA trifásica	12
Figura 2 – Vista em secção transversal de um gerador CA trifásico de dois pólos	14
Figura 3 – Tensões trifásicas induzidas no gerador CA de 2 pólos modelado.	16
Figura 4 – Correntes trifásicas induzidas no estator do gerador CA de 2 pólos modelado.	16
Figura 5 – Tensões RMS para fases a, b, e c, medidas in loco, período entre 14:04:00 às 14:16:00 horas do dia 19-03-15.	17
Figura 6 – Correntes RMS para fases a, b, e c, período entre 14:04:00 às 14:16:00 horas do dia 19-03-15.	18
Figura 7 – Exemplos de distúrbios eletromagnéticos que afetam a QEE.	18
Figura 8 – Trajeto percorrido entre dois pontos por um automóvel.	52
Figura 9 – Diagramas de Venn de um Conjunto Crisp e Fuzzy.	53
Figura 10 – Função de pertinência clássica para pessoas maiores de idade.	54
Figura 11 – Função de pertinência fuzzy para pessoas maiores de idade.	55
Figura 12 – Função de pertinência de forma triangular.	56
Figura 13 – Função de pertinência com diversas formas.	57
Figura 14 – Operações básicas – união, interseção e complemento de um conjunto fuzzy.	58
Figura 15 – Conjuntos fuzzy essencialmente não satisfazem a lei do terceiro excludido.	58
Figura 16 – Variáveis linguísticas para o conceito de idade.	66
Figura 17 – Arquitetura do controlador Fuzzy.	67
Figura 18 – Fuzzificadores para um possível exemplo de avaliação com relação a maioridade penal.	69
Figura 19 – Base de regras para um possível exemplo de avaliação com relação a maioridade penal.	70
Figura 20 – Gráfico de saída do sistema de defuzzificação	72
Figura 21 – Gráfico de saída sem defuzzificação para a inferência de Mamdani Clássico.	72
Figura 22 – Gráfico de saída sem defuzzificação para a inferência de Larsen.	73
Figura 23 – Saída crisp para método centro de gravidade aplicado sobre inferência de Mamdani Clássico	74
Figura 24 – Saída crisp para método centro de gravidade aplicado sobre inferência de Larsen.	75
Figura 25 – Saída crisp para método centro dos máximos aplicado sobre inferência de Mamdani Clássico.	75

Figura 26 – Saída crisp para método centro dos máximos aplicado sobre inferência de Larsen.	76
Figura 27 – Fluxograma proposto para o sistema de diagnóstico de QEE.	77
Figura 28 – Coleta de dados no point of common coupling.	80
Figura 29 – Fração da base de dados a ser analisada.	80
Figura 30 – Base de regras utilizadas para os quatro controladores.	83
Figura 31 – Visualização do menu de opções inicial do programa de diagnóstico da QEE.	84
Figura 32 – Visualização do menu de configurações do programa de diagnóstico da QEE.	84
Figura 33 – Visualização do menu de configurações gerais do programa de diagnóstico da QEE.	84
Figura 34 – Visualização do menu de configuração das inferências do programa de diagnóstico da QEE.	85
Figura 35 – Visualização do menu de configuração do controlador 01.	85
Figura 36 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 01.	86
Figura 37 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 02.	86
Figura 38 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 03.	86
Figura 39 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 04.	87
Figura 40 – Visualização do processo de defuzzificação pelo método centro de gravidade aplicado no controlador 01.	87
Figura 41 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP01.	88
Figura 42 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP02.	88
Figura 43 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP03.	88
Figura 44 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP04.	89
Figura 45 – Gravação do diagnóstico de saída parcial do controlador 03 em arquivo .txt.	89
Figura 46 – Resultado - controlador 01 no período entre 10:49:49 até 10:50:49. . .	92
Figura 47 – Resultado - controlador 02 no período entre 10:49:49 até 10:50:49. . .	92
Figura 48 – Resultado - controlador 03 no período entre 10:49:49 até 10:50:49. . .	93
Figura 49 – Resultado - controlador 04 no período entre 10:49:49 até 10:50:49. . .	93
Figura 50 – Resultado - controlador 02 no período entre 11:58:52 até 11:59:50. . .	94
Figura 51 – Resultado - controlador 03 no período entre 11:58:52 até 11:59:50. . .	95
Figura 52 – Resultado - controlador 04 no período entre 11:58:52 até 11:59:50. . .	95
Figura 53 – Resultado - controlador 03 no período entre 12:30:50 até 12:31:50. . .	96
Figura 54 – Resultado - controlador 02 no período entre 12:40:50 até 12:41:50. . .	96
Figura 55 – Resultado - controlador 03 no período entre 12:40:50 até 12:41:50. . .	97
Figura 56 – Resultado - controlador 04 no período entre 12:40:50 até 12:41:50. . .	97
Figura 57 – Resultado - controlador 03 no período entre 12:43:50 até 12:44:50. . .	98

Figura 58 – Resultado - controlador 01 no período entre 13:38:50 até 13:39:50. . .	99
Figura 59 – Resultado - controlador 02 no período entre 13:38:50 até 13:39:50. . .	100
Figura 60 – Resultado - controlador 03 no período entre 13:38:50 até 13:39:50. . .	100
Figura 61 – Resultado - controlador 04 no período entre 13:38:50 até 13:39:50. . .	101
Figura 62 – Resultado - controlador 04 no período entre 15:45:51até 15:56:51. . .	101
Figura 63 – Resultado - controlador 01 no período entre 17:18:51 até 17:18:51. . .	103
Figura 64 – Resultado - controlador 02 no período entre 17:18:51 até 17:18:51. . .	103
Figura 65 – Resultado - controlador 03 no período entre 17:18:51 até 17:18:51. . .	104
Figura 66 – Resultado - controlador 04 no período entre 17:18:51 até 17:18:51. . .	104
Figura 67 – Resultado - controlador 01 no período entre 18:51:51até 18:52:51. . .	105
Figura 68 – Resultado - controlador 02 no período entre 18:51:51até 18:52:51. . .	105
Figura 69 – Resultado - controlador 02 no período entre 06:02:32 até 06:03:32. . .	107
Figura 70 – Resultado - controlador 03 no período entre 06:02:32 até 06:03:32. . .	107
Figura 71 – Defuzzificação pelo método de centro de gravidade aplicado sobre a inferência de Mamdani Clássico para leitura das 16:13:21 horas.	113
Figura 72 – Defuzzificação pelo método de centro de gravidade aplicado sobre a inferência de Larsen para leitura das 16:13:21 horas.	114
Figura 73 – Defuzzificação pelo método de centro de gravidade aplicado sobre a inferência de Hamacher para leitura das 16:13:21 horas.	114

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo das características dos distúrbios relacionados com a QEE.	21
Tabela 2 – Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos.	22
Tabela 3 – Lista de países para possível análise das normas/regulamentações referentes a QEE.	43
Tabela 4 – Limites para distorção harmônica total de tensão dos países/regiões analisadas.	45
Tabela 5 – Limites para desequilíbrio de tensão dos países/regiões analisadas.	46
Tabela 6 – Limites para variação de frequência da rede elétrica dos países/regiões analisadas.	46
Tabela 7 – Índice de compatibilidade de cintilação luminosa e níveis de planejamento dos países / regiões analisadas.	47
Tabela 8 – Valores para o fator de potência dos países/regiões analisadas.	48
Tabela 9 – Tensão em regime permanente na Europa conforme EN 50160.	48
Tabela 10 – Tensão em regime permanente nos USA conforme ANSI C84.1-2011.	48
Tabela 11 – Tensão em regime permanente no Canadá conforme CSA CAN3 C235.	49
Tabela 12 – Tensão em regime permanente, comparação entre alguns países.	49
Tabela 13 – Análise comparativa entre regulamentações nacionais e internacionais.	50
Tabela 14 – Tabelas verdades crisp - conjunção, disjunção, negação, e implicação	60
Tabela 15 – Descrição dos intervalos utilizados para as funções de pertinências dos módulos de fuzzificação com base nas diferenças entre as normas estudadas.	82
Tabela 16 – Descrição dos intervalos utilizados para as funções de pertinências dos módulos de defuzzificação.	82
Tabela 17 – Defuzzificação para o controlador 04 pela inferência pelos métodos de inferência de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher.	109
Tabela 18 – Defuzzificação para o controlador 04 pela inferência pelos métodos de inferência de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher.	109
Tabela 19 – Resultado das operações lógicas no sistema de inferências de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher para o controlador 01.	111
Tabela 20 – Resultado das operações lógicas no sistema de inferências de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher para o controlador 04.	112

Lista de quadros

Quadro 1 – Comparativo de indicadores de procedimentos de distribuição - PRODIST	26
Quadro 2 – Terminologia adotada pelo Módulo 8 do PRODIST.	26
Quadro 3 – Valores de referência para fator de potência no sistema de distribuição.	27
Quadro 4 – Valores de referência das distorções harmônicas totais de tensão.	28
Quadro 5 – Valores de referência para desequilíbrio de tensão em porcentagem.	29
Quadro 6 – Valores de referência para PstD95% e PltS95%.	30
Quadro 7 – Fatores de Transferência para obtenção dos PstD95% e PltS95%.	31
Quadro 8 – Classificação das variações de tensão de curta duração.	32
Quadro 9 – Faixas de classificação das tensões em regime permanente.	35
Quadro 10 – Classificação de possíveis distúrbios no sistema elétrico de potência.	39
Quadro 11 – Limites para distorção harmônica total de tensão, comparação entre as normas IEEE e IEC.	39
Quadro 12 – Limites para distorção harmônica total de tensão em baixa tensão.	39
Quadro 13 – Limites para distorção harmônica total de corrente em um sistema geral de distribuição, comparação entre as normas IEEE 519 (120V $< V_N \leq 69\text{kV}$) e IEC 61000-3-6 (1kV $< V_N \leq 35\text{kV}$).	40
Quadro 14 – Classificação das variações de tensão de curta duração.	42
Quadro 15 – Classificação das variações de tensão de longa duração.	42
Quadro 16 – Comparaçao das normas IEC e IEEE para os indicadores Pst e Plt.	42

Lista de abreviaturas e siglas

UESC	Universidade Estadual de Santa Cruz
DCET	Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas
PPGMC	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FMM	Força Magnetomotriz
QEE	Qualidade de energia elétrica
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
IRE	<i>Institute of Radio Engineers</i>
ANSI	<i>American National Standard</i>
JIS	<i>Japanese Industry Standard</i>
NER	<i>National Electricity Regulator</i>
NTCSE	<i>Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
DTHV	Distorção Harmônica Total de Tensão
DTHI	Distorção Harmônica Total de Corrente
FD	Desbalanceamento de Tensão ou Fator de Desequilíbrio de Tensão
FP	Fator de Potência
VTRP	Variação de Tensão em Regime Permanente

BT	Baixa Tensão
MT	Média Tensão
AT	Alta Tensão
MF	Módulo de Fuzzificação
MTD	Módulo de Tomada de Decisão
SBR	Sistema Baseado em Regras
SI	Sistema de Inferência
MD	Módulo de Defuzzificação
RMS	<i>Root Mean Square</i>
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
DITH%	Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem n
Pst	Indicadores de Severidade de Cintilação de Curta Duração
Plt	Indicadores de Severidade de Cintilação de Longa Duração
PstD95%	Pst - Percentil Diário 95%
PltS95%	Plt - Percentil Semanal 95%
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
ITT	Interrupção Temporária de Tensão
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
ETT	Elevação Temporária de Tensão
FT	Fator de Transferência

Lista de símbolos

V	Tensão elétrica
I	Corrente elétrica
$B_{máx}$	Densidade de fluxo magnético
μ_0	Permeabilidade do vácuo no entreferro
g	Comprimento do entreferro
N_f	Total de espiras em série no enrolamento de campo
k_f	Fator de enrolamento de campo
I_f	Corrente de campo
λ_a	Fluxo concatenado da fase a
k_{enr}	Fator de enrolamento da fase a
N_{fases}	Total de espiras em série da fase a
Φ_p	Fluxo magnético de entreferro por pólo
$d\theta_r$	Ângulo medido a partir do eixo magnético do rotor
r	Raio até o entreferro
l	Comprimento axial do entreferro da estator/rotor
ω_{me}	Velocidade angular mecânica do rotor
V_{fa}	Tensão induzida na fase a
V_{fb}	Tensão induzida na fase b
V_{fc}	Tensão induzida na fase c
n_s	Velocidade síncrona
I_{fa}	Corrente induzida na fase a
I_{fb}	Corrente induzida na fase b
I_{fc}	Corrente induzida na fase c
μ	Pertinências fuzzy

χ	Pertinências fuzzy
\neg	Conectivo lógico de negação
\wedge	Conectivo lógico de conjunção
\vee	Conectivo lógico de disjunção
\rightarrow	Conectivo lógico de implicação
\leftrightarrow	Conectivo lógico de equivalência
Δ	Conectivo lógico fuzzy de conjunção
∇	Conectivo lógico fuzzy de disjunção
N	Operador fuzzy negação
T	Operador fuzzy t-norma
S	Operador fuzzy t-conorma

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Descrição do Problema de Pesquisa	1
1.2 Importância da Teoria Fuzzy	2
1.3 Objetivos da Pesquisa	3
2 – Estado da Arte	4
3 – Condições Ideais e os Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica	10
3.1 Condições Ideais de Operação em um Sistema Elétrico	10
3.2 Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica	17
4 – Regulamentações – Qualidade de Energia Elétrica	23
4.1 Normas e Regulamentações Nacionais	23
4.1.1 Fator de Potência	26
4.1.2 Distorções Harmônicas	27
4.1.3 Desequilíbrio de Tensão	28
4.1.4 Flutuação de Tensão	29
4.1.5 Variação de Tensão de Curta Duração	31
4.1.6 Variação de Frequência	33
4.1.7 Tensões em Regime Permanente	34
4.2 Normas e Regulamentações Internacionais	35
4.2.1 Normas e Regulamentos Sobre QEE – Padrão: IEC e IEEE	35
4.2.1.1 Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente	39
4.2.1.2 Desbalanceamento ou Desequilíbrio de Tensão	40
4.2.1.3 Variação Temporária de Frequência	41
4.2.1.4 Variação de Tensão de Curta e Longa Duração	41
4.2.1.5 Flutuação de Tensão ou Flicker	41
4.2.1.6 Variação de Tensão em Regime Permanente e Fator de Potência	41
4.2.2 Normas e Regulamentos Sobre QEE – Diretrizes de Alguns Países/Região	41
4.2.2.1 Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente	44
4.2.2.2 Desbalanceamento ou Desequilíbrio de Tensão	44
4.2.2.3 Variação Temporária de Frequência	44
4.2.2.4 Variação de Tensão de Curta e Longa Duração	45
4.2.2.5 Flutuação de Tensão ou Flicker	45
4.2.2.6 Fator de Potência	47

4.2.2.7	Variação de Tensão em Regime Permanente	47
4.3	Considerações Finais	48
5 – Tópicos em Teoria Fuzzy	51
5.1	Teoria dos Conjuntos Fuzzy	52
5.1.1	Representação de Conjuntos Fuzzy	53
5.1.2	Representação de Conjuntos Fuzzy Através de Formas Finitas . .	55
5.1.3	Operações sob Conjuntos Fuzzy	57
5.2	Noções de Lógica Fuzzy	59
5.2.1	Lógica Proposicional Clássica – Conectivos Básicos	59
5.2.2	Lógica Fuzzy - Conectivos Básicos	61
5.2.3	Inferência - Modus Ponens Generalizado	64
5.3	Controladores Fuzzy	65
5.3.1	Modificadores Linguísticos e Variáveis Linguísticas Fuzzy	65
5.3.2	Arquitetura dos Controladores Fuzzy	66
5.3.3	Módulo de Fuzzificação	67
5.3.4	Módulo de Tomada de Decisão	69
5.3.4.1	Sistema Baseado em Regras Fuzzy	69
5.3.4.2	Sistema de Inferência	70
5.3.5	Módulo de Defuzzificação	71
6 – Metodologia Utilizada	77
6.1	Fluxograma Proposto	77
6.2	Arquitetura Desenvolvida	78
6.3	Estrutura do Programa	83
7 – Discussão dos Resultados	90
7.1	Algoritmo Desenvolvido	90
7.2	Modelagem Através do Método de Inferência de Mamdani Clássico . .	91
7.3	Comparação entre as Inferências de: Mamdani Clássico, Larsen, e Hamacher	106
8 – Conclusão	115
9 – Trabalhos Futuros	118
Referências	119
Anexos	122
ANEXO A – Arquitetura do algoritmo modelado.	123

1 Introdução

1.1 Descrição do Problema de Pesquisa

No sistema elétrico de baixa tensão (menor que 1000 volts) das indústrias, comércios e residências, ocorrem comumente diversos distúrbios (interferências eletromagnéticas) causados por vários fatores. Na grande maioria das vezes, esses fatores estão relacionados aos tipos de cargas conectadas a rede elétrica de forma inadequada, sem um estudo técnico prévio. Nas unidades industriais, tem-se uma preocupação ainda maior com relação aos problemas que a má qualidade da energia elétrica pode causar, já que as indústrias possuem equipamentos com custos bastante elevados, tanto de compra quanto de manutenção.

Normalmente, quando o sistema elétrico começa a apresentar características que acusam problemas, tais como: desligamentos, queima ou diminuição da vida útil de equipamentos elétricos e eletrônicos, explosões de banco de capacitores, aquecimentos de cabos, dentre outros. Um profissional do setor elétrico é chamado para fazer um estudo e diagnosticar as prováveis causas e as possíveis soluções para essas perturbações. Muitas vezes quando isso ocorre, diversos equipamentos já foram danificados, causando prejuízos e até parando o processo produtivo como no caso das indústrias.

O fato da qualidade de energia elétrica ser monitorada pelos fornecedores somente no ponto de entrega, e o fato de não existirem punições severas para consumidores que geram perturbações no sistema elétrico interligado local, faz com que muitos consumidores não se preocupem com as possíveis condições dos seus sistemas. Assim, cargas elétricas são acopladas em suas instalações sem que haja nenhum acompanhamento técnico especializado, gerando distúrbios que afetam ao próprio consumidor, e até mesmo consumidores circunvizinhos.

Observa-se ainda que as normas e regulamentações nacionais são bastante limitadas com relação a determinações de limites ou valores de referência para grande parte dos indicadores de QEE (Qualidade de Energia Elétrica). Se comparado com normas internacionais IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e de outros países, tem-se que as determinações nacionais apresentam diferenças, principalmente no que se refere a valores de limites ou de referência para os indicadores, e com relação as possíveis punições em caso de não cumprimento de tais determinações. Em alguns casos, tais questões nem mesmo são indicadas nas normativas nacionais.

Como as perturbações eletromagnéticas são prejudiciais a todo o sistema elétrico,

tanto de consumo como de fornecimento, desenvolver métodos que consigam monitorar e diagnosticar os indicadores que influenciam na qualidade de energia elétrica em tempo real é de fundamental importância para que medidas corretivas possam ser adotadas de forma rápida e eficaz. Já que a falta de padrão entre as diversas normas nacionais e internacionais, no que se refere a delimitação de valores limites para os indicadores da QEE não permitem diagnósticos de forma precisa.

1.2 Importância da Teoria Fuzzy

A teoria fuzzy tem ganhado cada vez mais espaço no meio acadêmico. Isso acontece principalmente pelo fato desta, permitir a modelagem de sistemas considerando as incertezas existentes, o que não é possível através da lógica clássica. Desta forma, a teoria difusa tem sido utilizada em pesquisas diversas, tais como: modelagem de sistemas dinâmicos, controle de processos industriais, inteligência artificial, dentre outras.

No que se refere a qualidade de energia elétrica, o Brasil hoje não apresenta de forma clara e completa, em suas legislações, valores que delimitem ou que referencie os níveis máximos e mínimos permitidos, para as medidas elétricas dos indicadores que afetam a QEE. Aliado a essa questão, tem-se ainda que as legislações nacionais, não apresentam estudos com relação aos impactos que a má QEE pode causar no sistema elétrico de baixa, média e alta tensão, e também não apresenta medidas punitivas com relação aos consumidores que poluem o sistema elétrico. Aliado a essa questão, tem-se também que as legislações nacionais, apresentam divergências ou são omissas, se comparadas com algumas normativas e legislações internacionais.

O outro fator importante, é que os níveis percentuais que determinam os limites de certas perturbações permitidos nos sistemas elétricos, dependem de estudos que levam também em consideração o clima da região. Por exemplo, as características elétricas de países com temperaturas muitas baixas, não serão as mesmas de países com temperaturas muito elevadas. Neste contexto, tem-se que o Brasil por possuir um extensão territorial muito vasta, apresenta diversos tipos de climas que variam de forma sazonal desde o sul até norte. Assim sendo, quaisquer limites ou valores de referência com relação aos percentuais de perturbações permitidos para determinados indicadores da QEE nos sistemas elétricos, deveriam levar em consideração tais questões, o que não acontece atualmente nas legislações nacionais vigentes.

Assim sendo, um sistema de diagnóstico para a QEE, depende fortemente de todos esses critérios descritos anteriormente. Ou seja, um modelo clássico não conseguiria fornecer uma resposta que levasse em conta todas essas questões, já que elas são imprecisas, e até subjetivas. No trabalho aqui desenvolvido a teoria fuzzy se aplica

justamente na modelagem das diferenças entre as normas nacionais e internacionais no que se refere aos valores que determinam os limites para os indicadores de qualidade de energia aqui tratados.

1.3 Objetivos da Pesquisa

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver um algoritmo fuzzy que fosse capaz de fazer um diagnóstico real da QEE com relação aos indicadores de distorção harmônica total de corrente e tensão, fator de potência, variação de tensão em regime permanente, e desequilíbrio de tensão, no sistema elétrico de baixa tensão de uma indústria. A partir do objetivo principal, surgiram novos objetivos de pesquisa, tais como avaliar as: possíveis respostas que o uso de controladores fuzzy em modelo cascata poderiam fornecer, e como a mudança do método de inferência de Mamdani Clássico, por outros métodos de inferência, poderiam influenciar no diagnóstico final do sistema, dentre outros.

Em contra partida a muitos trabalhos desenvolvidos, que utilizam controladores fuzzy através de modelos computacionais prontos, como por exemplo o toolbox do matlab. Teve-se como um dos objetivos desenvolver um algoritmo em linguagem de alto nível, que fosse capaz de tratar toda a base de dados coletada no ponto de acoplamento comum de baixa tensão de forma rápida, fornecendo uma resposta de fácil interpretação e eficaz. Também buscou-se utilizar como entrada para os controladores fuzzy subsequentes, as saídas fuzzy dos controladores antecedentes, já que os métodos de defuzzificação e fuzzificação aplicados entre as associações destes controladores, resultam em perdas de informação, o que pode ser prejudicial para o modelo desenvolvido.

Para implementação do algoritmo, foi utilizado duas base de dados, uma base de dados fictícia que simulasse diversos tipos de condições para os indicadores modelados. E por fim, foi feito um estudo de caso real onde aplicamos o algoritmo sobre uma base de dados coletada no ponto de acoplamento comum de uma indústria do ramo alimentício localizada na região de Santo Antônio de Jesus -BA. Assim, foi obtido o diagnóstico da QEE para os indicadores aqui modelados, durante um período de 24 horas.

Como objetivos futuros tem-se o desenvolvimento de um sistema embarcado que permita a medição dos indicadores, a transmissão dos dados, e o diagnóstico em tempo real destes. Desta forma, medidas de controle e correções automáticas podem ser desenvolvidas e aplicadas.

2 Estado da Arte

Desde a inicialização do mundo industrializado, a demanda energética tem sido cada vez maior no decorrer das décadas. Dentre os diversos tipos de fontes energéticas existentes, a energia elétrica tem se destacado como uma fonte de energia de extrema importância para manutenção da sociedade atual. A medida que os anos passam, a humanidade tem se tornado cada vez mais dependente da eletricidade. O principal incentivo a essa dependência foi o surgimento dos equipamentos eletroeletrônicos, e o incentivo ao uso destes pela economia capitalista. Por esse motivo, o padrão de consumo da energia elétrica tem se tornado cada vez mais diversificado. Segundo [Aneel \(2008, p. 45\)](#), a energia elétrica no Brasil foi à modalidade mais consumida no país em 2007, e o que pode ser observado nos últimos sete anos é que esse consumo tem sido cada vez maior. Nas décadas anteriores, os grandes consumidores das fontes energéticas no mundo, eram os grandes centros industrializados, já que as indústrias dos diversos setores necessitavam de uma grande quantidade de energia, principalmente a do tipo elétrica, para desenvolver seus produtos. Por esse motivo, tem-se que o crescimento de um país pode ser medido tanto pelo PIB como pelo crescimento de sua matriz energética, ou seja, capacidade de fornecimento de energia elétrica e de outras fontes de energéticas, já que quanto mais um país produz, maior é sua demanda por energia. Outro fator importante é que a matriz elétrica deve ser segura, ou seja, diversificada para evitar a dependência de apenas uma fonte primária de energia.

A partir desse ano, porém, ingressou em ritmo acelerado de crescimento - 6,5% em 2003; 5,2% em 2004; 4,2% em 2005 e 3,9% em 2006 - o que provocou, inclusive, preocupações com relação à capacidade de a oferta acompanhar esta evolução. ([ANEEL, 2008, p. 45](#))

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, elaborado em 2008 pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, já se constatava a necessidade do aumento da capacidade de geração de energia elétrica de forma a acompanhar o crescimento econômico do país, como pôde ser observado na citação acima. O Brasil é um país que sempre dependeu fortemente dos recursos hídricos para geração de energia elétrica. Segundo [Aneel \(2003\)](#) a matriz referente a geração de energia elétrica apontava: Hidroelétricas - 79,09%, Termoelétricas - 18,51%, Termonucleares - 2,37%, e Outros tipos - 0,03%. Os dados apresentados pela [Aneel \(2008\)](#) são: Hidroelétricas - 73,60%, Termoelétricas - 24,22%, Termonucleares - 1,92%, Eólica - 0,26%. A Empresa de Pesquisas Energéticas - [EPE \(2014\)](#), apresentou um relatório final do balanço da matriz energética do Brasil para o ano base 2013, onde tem-se: Hidroelétricas - 70,60%, Termonucleares - 2,4%, Eólica - 1,1%. O Núcleo de Estudos Estratégicos em Energia - [NEEE \(2015\)](#) apresentou

os seguintes resultados para o ano de 2014: Hidroelétricas - 68,00% sendo destas 63,80% nacional e 4,2% importada, Termoelétricas - 27,10%, Termonucleares - 1,4%, Eólica - 3,5%, e Solar - 0,011%.

Observando os dados referentes às políticas de desenvolvimento da geração de energia elétrica brasileiro fornecidos pela ANEEL e o Ministério de Minas e Energia, tem-se que o país continua fortemente dependente dos recursos hídricos para geração de energia elétrica. Foram feitos alguns investimentos em usinas termoelétricas que teve um aumento de capacidade de geração entre 2003 e 2008 de aproximadamente 5,7%. E nos últimos anos tem-se investido na geração de energia eólica que atualmente se apresenta como a terceira maior fonte de geração de energia elétrica, segundo [NEEE \(2015\)](#). Pode-se concluir então, que os investimentos em outras formas de geração de energia elétrica apesar de terem melhorado, ainda precisam aumentar de forma substancial.

O que ocorre é que o maior país da América Latina, ainda é fortemente dependente da hidroeletricidade, e enfrenta em 2015 uma das maiores secas de sua história. A falta de chuva que vem se prolongando nos reservatórios desde 2013, fez com que os níveis dos reservatórios das hidroelétricas do Brasil alcançassem o menor nível de sua história, cerca de 10% de sua capacidade. Aliado a essa questão pode-se ressaltar também a mudança no comportamento do consumo de energia residencial dos grandes centros urbanos. Devido aos incentivos de consumo energético adotados pelo governo brasileiro em 2013, tais como, diminuição das tarifas elétricas em torno de 18% e a facilitação de crédito para compra de eletrodomésticos. As características dos picos de consumo elétrico têm mudado neste último período, principalmente devido ao uso de aparelhos de ar-condicionado nas regiões mais quente do país. Assim, horários que antes tinham baixa demanda de fornecimento elétrico, como por exemplo, o período entre 12:00 e 15:00 horas, agora apresentam picos de consumo elevados nos grandes centros urbanos. Tais problemas faz com que o sistema elétrico entre em colapso ocorrendo o desligamento deste para evitar danos aos equipamentos de geração e proteção interligados a rede elétrica.

Como dito o crescimento do PIB de um país, depende diretamente do crescimento da capacidade de fornecimento energético. Ou seja, caso a energia elétrica não seja suficiente para atender as necessidades demandadas pelos setores produtivos, ou mesmo que suficientes, tenha um custo final muito elevado. O país sofrerá forte perda de competitividade comercial, já que toda a cadeia produtiva é afetada, o que pode gerar uma queda no crescimento. Segundo [Trancredi e Abbud \(2013, p. 10\)](#), o custo final da energia elétrica no Brasil para o período entre 2005 e 2010 era de 84,58 R\$/KWh para as hidroelétricas de grande porte e 599,05 R\$/KWh para as termoelétricas a óleo combustível.

O simples susto com a eventualidade de um racionamento de energia, por si só, gera consequências nefastas para a economia. E, uma vez caracterizado o risco, também as providências para que ele não se concretize. A principal delas é o aumento das tarifas de energia elétrica, causado pela necessidade de lançar mão da geração térmica, mais cara que a hidroelétrica. ([TRANCREDI; ABBUD, 2013](#), p. 10).

Aliado a todos os problemas existentes e já citados, outro fator importante a ser considerado, é a qualidade do produto fornecido, ou seja, a Qualidade da Energia Elétrica - QEE. Diversas são as definições encontradas para este termo, já que concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos, definem a QEE de forma distinta. Do ponto de vista acadêmico, qualidade de energia elétrica é a disponibilidade da energia elétrica, com forma de onda senoidal e pura, sem alterações na amplitude, emanando de uma fonte de potência infinita. [Alves \(2010, p. 05\)](#).

Do ponto de vista da concessionária, a qualidade de energia elétrica pode ser definida pela ausência de desligamentos, flutuações de tensão, transitórios e harmônicos, medidos no ponto de entrega de energia. Esta definição é, pelo menos, o que almejam as concessionárias e que os consumidores gostariam de receber, entretanto, sabemos que o fornecimento da energia elétrica, de forma contínua e isenta de perturbações não é uma tarefa realista, visto que o próprio consumo de eletricidade e fenômenos naturais geram perturbações e problemas no sistema elétrico. ([JUNIOR, 2011, p. 29](#)).

Do ponto de vista do consumidor, a QEE pode ser definida como sendo a ausência de formas de perturbação manifestadas na energia consumida, ou seja, na tensão, corrente ou frequência que resultem em falhas ou má operação de seus equipamentos. Entretanto, tem-se que as perturbações provocadas por outros consumidores, ou mesmo pela carga do próprio consumidor, afetam a percepção deste em relação à qualidade da energia elétrica.

([ABREU, 2005](#)) definiu de forma mais abrangente a Qualidade de Energia Elétrica como sendo a perfeita combinação entre características quase ideais do produto eletricidade (qualidade do produto/conformidade) e um bom sistema e serviço de fornecimento (qualidade do serviço/continuidade), aliadas a tal qualidade do atendimento que permita satisfazer as expectativas do cliente (qualidade do atendimento).

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência constantes. Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros é considerado um problema de qualidade de energia ([BONATTO et al., 1999](#)).

Desta forma, a má qualidade da energia pode gerar diversos prejuízos, tais como, danificar equipamentos elétricos e eletrônicos e perda de eficiência gerando aumentos de custos e diminuindo a competitividade.

A qualidade da energia elétrica se tornou, atualmente, fator preponderante para a competitividade de alguns setores industriais e de prestação de serviços. O setor da energia elétrica, nos últimos anos, passa por profundas mudanças devido a alteração do perfil das cargas consumidoras, dos hábitos de consumo dos usuários frente ao uso da energia elétrica, a desregulamentação do setor elétrico em nível mundial, a proliferação de auto-produtores, o surgimento de novas tecnologias de gerações, a questão da sustentabilidade ambiental associada ao advento das tecnologias. ([SILVA, 2008](#), p. 40).

Tem-se também que o crescente uso de cargas não lineares por parte das residências nos últimos anos, tem contribuído para piorar a qualidade da energia elétrica do sistema.

Com a evolução tecnológica, a expansão e modernização dos sistemas elétricos e o crescente uso de cargas eletrônicas não lineares, alguns fenômenos eletromagnéticos têm provocado distúrbios na operação das redes e cargas elétricas, ocasionando problemas técnicos e trazendo preocupações e prejuízos financeiros. Além disto, tanto as concessionárias, como os usuários finais de energia estão se tornando cada vez mais preocupados com a qualidade da energia elétrica. ([SOUZA, 2011](#), p. 01).

Verifica-se que tanto no nível de cargas domésticas, comerciais como industriais, os consumidores estão cada vez mais sensíveis e dependentes das condições de operação do sistema de energia elétrica. Isso se deve ao aumento da complexidade das funções que as cargas elétricas devem desempenhar através de controle de processos, mesmo em equipamentos domésticos (fornos de microondas, máquinas de lavar, relógios digitais, vídeo, etc.). Basta lembrar as dificuldades enfrentadas pelos consumidores, quando se verificaram interrupções de energia elétrica, causando perda de produtos perecíveis, paralisação de serviços em escritórios, perda de sinalização no trânsito, desligamento de fornos, paralisação de atividades essenciais em redações de jornais, hospitais, etc. Até mesmo os meios de comunicações podem ser afetados pela falta prolongada de suprimento da rede. ([DECKMANN; POMILIO, 2010](#), p. 05).

Porém, a aumento do uso de equipamentos eletrônicos não é uma particularidade dos centros urbanos. O setor industrial também tem aumentado drasticamente o uso de equipamentos eletrônicos, principalmente devido na necessidade de informatizar e automatizar tantos os processos de produção como toda a logística do sistema industrial. No entanto, muitos sistemas automatizados encontrados em diversas indústrias, tem um alto custo de aquisição e de manutenção. Desta forma, o fato desses sistemas serem extremamente sensíveis a variações na qualidade da energia elétrica fornecida aos equipamentos de automação, faz com que as indústrias tenham ainda mais preocupação com relação ao estado da QEE consumida. De acordo com [Melo \(2008\)](#), tem aumentado a preocupação com a QEE fornecida e consumida pelas indústrias. Isso se dá principalmente devido ao uso cada vez mais frequente de equipamentos eletronicamente controlados e da automação nos processos indústrias. Já que, tais dis-

positivos são extremamente sensíveis e necessitam de energia com mais qualidade e com pequenas flutuações de frequência e tensão.

No Brasil, o problema de Qualidade da Energia Elétrica é semelhante ao de outros países como os EUA, e tem sido agravado nos últimos anos à medida que as indústrias, em geral, têm investido em automatização de seus sistemas produtivos, na busca de obter uma melhoria nos seus processos a fim de enfrentar a concorrência devido à globalização da economia. (MELO, 2008, p. 15).

Assim, o tema qualidade de energia elétrica se torna cada vez mais importante e mais difícil de ser tratado, tanto de forma teórica como prática. Por isso, é necessário que sejam adotadas novas políticas de investimento em pesquisa e inovação tecnológica, que permitam o desenvolvimento de novas metodologias de análise ou a melhoria das existentes. Já que os custos da má qualidade de energia elétrica geram um enorme prejuízo financeiro ao país. Como o custo do processo de monitoramento e controle da qualidade de energia elétrica é bastante elevado, poucas indústrias investem nessa tecnologia, já que a mesma não é obrigatória por requisitos legais. Esse fato também inviabiliza o uso desta forma de controle nos setores comerciais e residenciais.

Aliado a esse problema tem-se também a necessidade de melhorias das normas existentes, atualmente as normas referentes a QEE regulamentam apenas os níveis de fornecimento de energia elétrica em média e alta tensão. Esse fato faz com que apenas as concessionárias sejam responsabilizadas caso haja problemas de QEE com relação aos indicadores existentes nas normatizações atuais, em sua rede de fornecimento, ou seja, no ponto de entrega. Porém, não existe um controle eficaz de baixo custo dos índices de qualidade de energia elétrica para o consumo em baixa tensão. Desta forma, muitos consumidores não se preocupam com os possíveis problemas que diversos aparelhos podem causar na rede elétrica, caso sejam instalados de forma inadequada. Ou seja, sem o acompanhamento de um profissional qualificado e habilitado. Logo os prejuízos são diversos, desde o aumento do faturamento da conta de energia, e danos a equipamentos eletroeletrônicos.

Os indicadores de qualidade do fornecimento da energia elétrica no Brasil utilizados atualmente são definidos mediante patamares e índices de interrupção denominados "continuidade", ou de "flutuação de energia" denominados "conformidade". Entretanto, não são incluídos conceitos e procedimentos de Qualidade de Energia Elétrica a partir de um ponto de vista global dos sistemas elétricos que levem em consideração os impactos econômicos que a perda de qualidade da energia elétrica causará no mercado industrial regional. Verifica-se, portanto, que a metodologia atualmente utilizada para avaliação ainda necessita de aperfeiçoamento com dados e indicadores adicionais que levem em consideração tanto os aspectos econômicos associados, bem como as características e peculiaridades das empresas industriais situadas em uma determinada região. (MELO, 2008, p. 16).

Existem estudos que mostram os custos relacionados com perda de qualidade da energia elétrica. Na IEEE Spectrum de fevereiro de 2002 menciona-se que a indústria manufatureira americana tem custos da ordem de 10 bilhões de dólares associados as interrupções de processos. Outro estudo realizado na Europa, apresentado em fevereiro de 2002, indica que os custos associados com vários tipos de distúrbios podem chegar a 1,5% do PIB do país. Além dos números atualmente serem elevados, estima-se que tais custos subirão rapidamente se não forem tomadas medidas saneadoras desde já. Isso se deve aos efeitos cumulativos que a perda de qualidade pode impor, seja através da redução da vida útil de dispositivos, limitação da capacidade efetiva dos equipamentos, mau funcionamento de máquinas além das perdas elétricas em si.([DECKMANN; POMILIO, 2010](#), p. 06).

Assim, é necessário que sejam desenvolvidas normas que regulamentem a qualidade da energia elétrica em níveis de baixa tensão, ou seja, não apenas no ponto de entrega, mas também durante o consumo. É importante também que hajam investimentos em pesquisas que desenvolvam analisadores de qualidade de energia que possam não só coletar os dados mas também diagnosticar em tempo a QEE, permitindo que ações corretivas possam ser tomadas de forma rápida e eficaz.

Existem diversos projetos de pesquisa a nível de mestrado e doutorado, que tratam do tema QEE em linhas de transmissão e distribuição. Porém, a maioria das pesquisas encontradas buscam desenvolver metodologias para classificar e localizar os distúrbios eletromagnéticos que ocorrem nas redes elétricas. Dentre estas, pode-se citar: [Ferreira \(2010\)](#); [Goh et al. \(2013\)](#); [Kumar et al. \(2014\)](#); [Lima e Minussi \(2013\)](#); [Malange \(2010\)](#). Assim, após um série de pesquisas em bancos de dados acadêmicos nacionais e internacionais, não foram encontrados projetos ou artigos científicos que tratassesem do tema: algoritmos para realização de diagnóstico da QEE em baixa tensão, seja ele de forma clássica ou fuzzy, com exceção de [Gonçalves \(2010\)](#) que trata do tema com relação ao indicador de distorção harmônica através de uma modelagem fuzzy feita no toolbox do matlab.

Assim, a metodologia desenvolvida e apresentada no Capítulo 6, teve o intuito de modelar um sistema que fosse capaz de fornecer um diagnóstico da QEE onde fosse que considerado as discrepâncias entre as normas e legislações nacionais e internacionais vigentes. Para tal, foi necessário utilizar os conceitos da teoria fuzzy para tratar tais divergências.

3 Condições Ideais e os Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica

Os fenômenos relativos à qualidade da energia elétrica podem ser considerados como sendo um subconjunto de um grupo mais amplo de fenômenos eletromagnéticos. As perturbações, ou distúrbios que afetam a QEE são provenientes tanto do sistema de fornecimento de energia elétrica por parte da concessionária, como dos próprios equipamentos consumidores interligados à rede elétrica. Porém, existem alguns distúrbios que são inevitáveis por serem causados por fenômenos naturais, tais como as descargas atmosféricas.

É importante conhecer e estudar os tipos de perturbações que podem afetar a QEE, com o objetivo de obter formas de minimizar os seus impactos no sistema elétrico em geral. Assim, a caracterização dos distúrbios eletromagnéticos é importante para que sejam possíveis as detecções e posteriores classificações desses sinais em tempo real.

Primeiramente vamos analisar quais seriam as condições ideais de operação em um sistema elétrico, para posteriormente verificarmos quais são a principais distúrbios que podem afetar a QEE neste sistema.

3.1 Condições Ideais de Operação em um Sistema Elétrico

De acordo com [Deckmann e Pomilio \(2010\)](#), e [Ferreira \(2010\)](#), para que um sistema elétrico trifásico seja considerado ideal, devem-se garantir as seguintes operações em regime permanente:

1. Tensões e correntes alternadas, com formas senoidais;
2. Amplitudes constantes, nos valores nominais;
3. Frequência constante, no valor síncrono;
4. Tensões trifásicas equilibradas;
5. Fator de potência unitário nas cargas;
6. Perdas nulas na transmissão e distribuição.

Para um sistema elétrico que opere em corrente alternada, com frequência dentro dos padrões normatizados, as seis condições ideais descritas acima, garantem o funcionamento do sistema de forma adequada para qualquer carga prevista.

De acordo com [Fitzgerald et al. \(2014\)](#), uma máquina elétrica de corrente alternada elementar, as bobinas do rotor e as bobinas do estator podem ser representadas como sendo uma concentração de múltiplas espiras. Desta forma uma máquina com enrolamentos distribuídos pode ser representada através da multiplicação do número de espiras em série no enrolamento por um fator de enrolamento.

[Fitzgerald et al. \(2014\)](#) considera que para um entreferro pequeno, pode-se assumir que o enrolamento de campo produz um fluxo radial espacial fundamental com uma densidade de fluxo máxima no entreferro. Desta forma se o entreferro da máquina de corrente alternada for uniforme, a densidade máxima de fluxo magnético $B_{máx}$ pode ser representada pela seguinte forma:

$$B_{máx} = \frac{4\mu_0}{\pi g} \cdot \left(\frac{k_f N_f}{pólos} \right) \cdot I_f \quad (1)$$

onde,

$B_{máx}$ → densidade de fluxo magnético [T];

μ_0 → permeabilidade do vácuo no entreferro;

g → comprimento do entreferro [m];

N_f → total de espiras em série no enrolamento de campo;

k_f → fator de enrolamento de campo;

I_f → corrente de campo [A];

A Equação (1), descrita acima modela matematicamente de forma geral, ou seja, para (n) pólos, a densidade máxima de fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo em uma máquina CA síncrona. Analisando a Figura 1, tem-se que quando os pólos do rotor estão alinhados com o eixo magnético da fase da armadura, ocorre que o fluxo magnético concatenado com o enrolamento de fase do estator é:

$$\lambda_a = k_{enr} \cdot N_{fases} \cdot \Phi_p \quad (2)$$

onde,

λ_a → fluxo concatenado da fase a ;

k_{enr} → fator de enrolamento da fase a ;

N_{fases} → total de espiras em série da fase a ;

Φ_p → fluxo magnético de entreferro por pólo [Wb];

Sabendo que a variação senoidal da densidade de fluxo magnético no entreferro

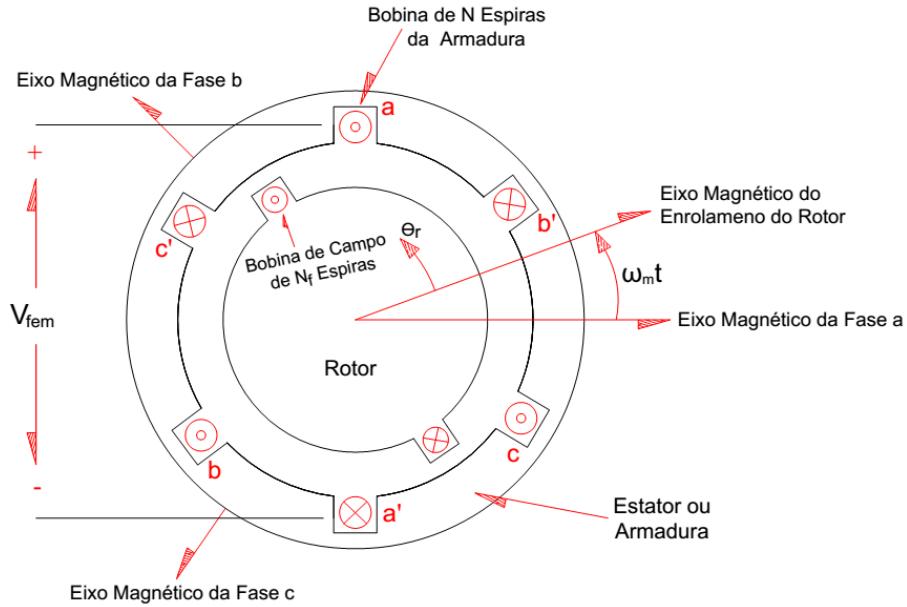


Figura 1 – Vista em secção transversal de uma máquina elementar CA trifásica

Fonte: Adaptado de Fitzgerald, 2014

é representada como sendo:

$$B = B_{máx} \cdot \cos\left(\frac{pólos}{2}\theta_r\right) \quad (3)$$

Se integrarmos linearmente a densidade de fluxo magnético através do comprimento axial do entreferro da estator/rotor, podemos obter o fluxo magnético no entreferro Φ_p por pólo, descrito através da Equação (4).

$$\Phi_p = l \cdot B_{máx} \cdot r \cdot \int_{+\pi/pólos}^{-\pi/pólos} \cos\left(\frac{pólos}{2}\theta_r\right) \cdot d\theta_r \quad (4)$$

$$\Phi_p = \left(\frac{2}{pólos}\right) \cdot 2 \cdot l \cdot r \cdot B_{máx} \quad (5)$$

onde,

$d\theta_r$ —> ângulo medido a partir do eixo magnético do rotor;

r —> raio até o entreferro;

l —> comprimento axial do entreferro da estator/rotor;

Desta forma, a medida que o rotor gira, o fluxo magnético concatenado varia senoidalmente com o ângulo entre os eixos magnéticos dos enrolamentos de campo e de armadura. Com o rotor girando a uma velocidade angular constante (ω_m), o fluxo

concatenado com a bobina de estator da fase a será:

$$\lambda_a = k_{enr} \cdot N_{fases} \cdot \Phi_p \cdot \cos \left(\left(\frac{pólos}{2} \right) \cdot \omega_m \cdot t \right) \quad (6)$$

Tendo que a velocidade angular mecânica do rotor (ω_{me}) em radianos por segundos elétricos, é dada por:

$$\omega_{me} = \left(\frac{pólos}{2} \right) \cdot \omega_m \quad (7)$$

Substituindo (ω_m) da Equação 7 na Equação 6), temos:

$$\lambda_a = k_{enr} \cdot N_{fases} \cdot \Phi_p \cdot \cos (\omega_{me} \cdot t) \quad (8)$$

O tempo (t) é escolhido arbitrariamente como sendo zero quando o pico da onda de densidade de fluxo se alinha com o eixo magnético da fase a .

De acordo com [Fitzgerald et al. \(2014\)](#), considerando agora que a tensão induzida regida pela Lei de Faraday representada pela Equação 1, seja a taxa de variação no tempo do fluxo magnético concatenado na fase a da máquina CA descrita pela Equação 9).

$$V_{fa} = \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (9)$$

substituindo a Equação 8 na Equação 9),

$$V_{fa} = k_{enr} \cdot N_{fases} \cdot \frac{d\Phi_p}{dt} \cdot [\cos (\omega_{me} \cdot t)] \quad (10)$$

derivando em função do tempo obtemos a tensão induzida para máquina elétrica de corrente alternada.

$$V_{fa} = -\omega_{me} \cdot k_{enr} \cdot N_{fases} \cdot \Phi_p \cdot \sin (\omega_{me} \cdot t) \quad (11)$$

onde,

$V_{fa} \rightarrow$ tensão induzida na fase a .

Vale ressaltar que apesar da Equação 11 ter sido modelada supondo-se que apenas o enrolamento de campo estivesse produzindo fluxo magnético no entreferro, a equação aplica-se igualmente bem ao caso geral em que Φ_p é o fluxo líquido por pólo no entreferro, produzido por correntes tanto do rotor como do estator, [Fitzgerald et al. \(2014\)](#). A tensão induzida na fase a (V_{fa}) pode ser também denominada como sendo a tensão de velocidade gerada pelo movimento da onda de fluxo magnético no

entreferro em relação a bobina da armadura. A Equação (11) é válida considerando a máquina rotativa operando em regime permanente, onde a amplitude da onda de fluxo magnético no entreferro é constante. Considerando o fluxo magnético no entreferro como sendo constante, podemos dizer que a amplitude ($V_{máx}$) da tensão induzida na fase a é dada por:

$$V_{máx} = -\omega_{me} \cdot k_{enr} \cdot N_{fases} \cdot \Phi_p \quad (12)$$

Pode-se partir da análise da Figura 2 descrever matematicamente as tensões induzidas nas demais fases, considerando um gerador trifásico síncrono de 2 pólos, com velocidade síncrona (n_s) igual a 3200 rotações por minuto (rpm), ligado em estrela com neutro aterrado.

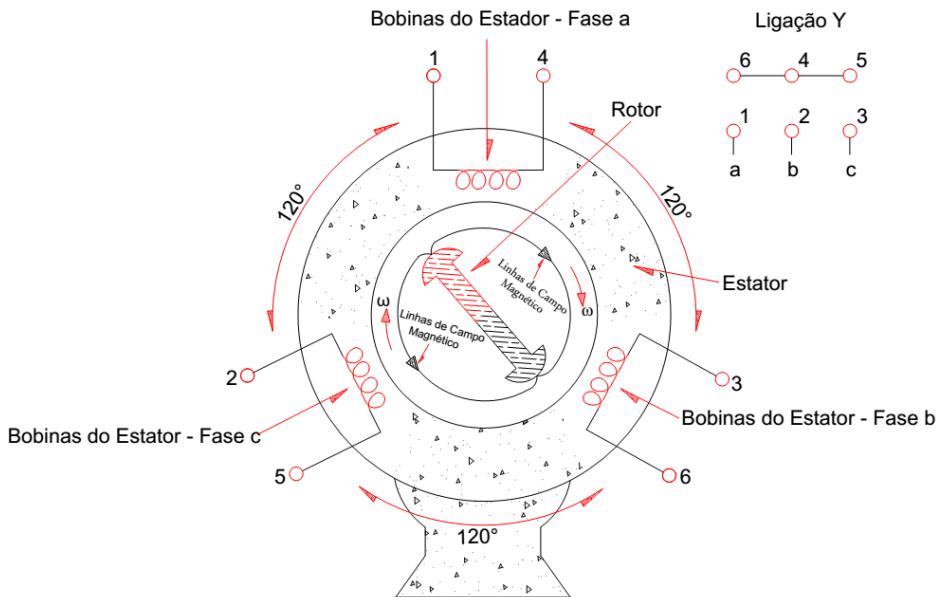


Figura 2 – Vista em secção transversal de um gerador CA trifásico de dois pólos

Analizando a Figura 2, observamos que os enrolamentos das fases individuais estão afastados em 120° elétricos no espaço ao redor da circunferência do entreferro da armadura. Isso pode ser observado através das bobinas das fases a , b e c . As tensões induzidas produzidas pelas ondas fundamentais espaciais de força magnetomotriz (FMM), das três fases estão deslocadas em 120° elétricos no espaço. Desta forma, a partir das Equações (11) e (12) que representam a tensão induzida para fase a em um gerador CA de 2 pólos, podemos reescrever matematicamente as tensões induzidas para as três fases da máquina trifásica. Considerando ω_{me} com sendo apenas ω , temos:

$$V_{fa} = V_{máx} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (13)$$

$$V_{fb} = V_{máx} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (14)$$

$$V_{fc} = V_{máx} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3}\pi\right) \quad (15)$$

onde,

V_{fa} → tensão induzida na fase a [V];

V_{fb} → tensão induzida na fase b [V];

V_{fc} → tensão induzida na fase c [V].

De forma análoga a modelagem matemática desenvolvida para obtenção das tensões elétricas trifásica do gerador CA, tem-se que em uma máquina elétrica CA as tensões, correntes, potências (ativa, reativa, aparente), estão diretamente relacionadas. Ou seja, podem-se obter os valores de corrente para cada fase, através de uma análise vetorial ou fasorial do circuito elétrico da máquina.

Fazendo uma consideração mais intuitiva, o ideal é que o gerador opere em uma velocidade síncrona (n_s) constante, para que desta forma o mesmo mantenha a frequência da tensão alternada constante. Quando uma carga é conectada ao gerador CA trifásico, uma corrente elétrica com características senoidais idênticas à tensão elétrica trifásica, irá circular nos enrolamentos de armadura ou estator.

Logo podemos descrever a corrente elétrica como sendo:

$$I_{fa} = I_{máx} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (16)$$

$$I_{fb} = I_{máx} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (17)$$

$$I_{fc} = I_{máx} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3}\pi\right) \quad (18)$$

onde,

I_{fa} → corrente induzida na fase a [A];

I_{fb} → corrente induzida na fase b [A];

I_{fc} → corrente induzida na fase c [A].

Nas Figuras 3 e 4, pode-se observar o comportamento senoidal para as ondas de tensão e de corrente induzidas em cada fase do gerador CA. Como já foi descrito, no sistema trifásico as tensões e correntes induzidas estão defasadas em 120° elétricos,

porém a tensões trifásicas estão em fase com suas respectivas correntes. Tem-se também que as ondas induzidas são sinais senoidais periódicas no tempo.

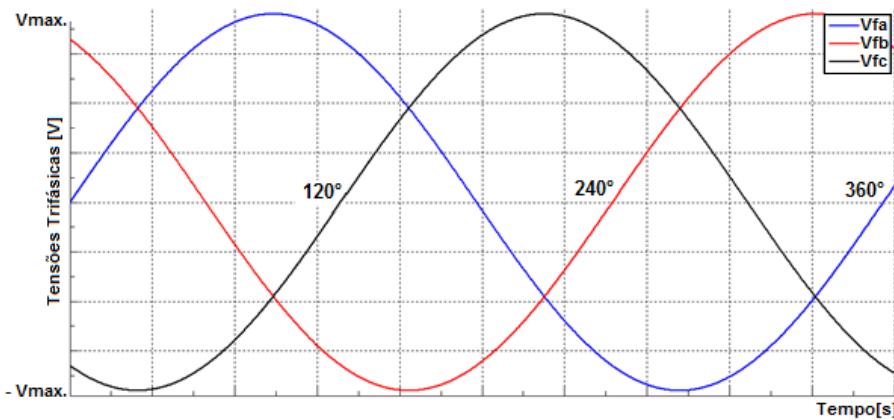


Figura 3 – Tensões trifásicas induzidas no gerador CA de 2 pólos modelado.

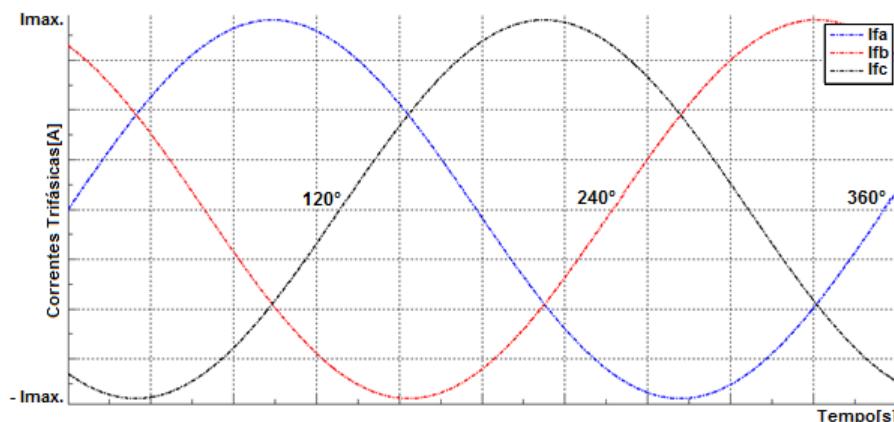


Figura 4 – Correntes trifásicas induzidas no estator do gerador CA de 2 pólos modelado.

As tensões e correntes elétricas senoidais representadas nas Figuras 3 e 4, descrevem o comportamento totalmente ideal do ponto de vista matemático em sistema elétrico. Pois são representadas por formas de ondas senoidais, com amplitudes e frequências constantes, e perfeitamente equilibradas, ou seja, defasadas em 120° elétricos, e com fator de potencia unitário, já que não existe defasagem entre as tensões e correntes elétricas.

Porém tal situação não ocorre na realidade, já que as tensões e correntes geradas são induzidas por campos eletromagnéticos, e esses campos sofrem diversos tipos de interferências decorrentes do sistema elétrico. Dentre os diversos tipos de interferências que podem afetar o sistema elétrico, podemos destacar as distorções harmônicas de tensão e corrente, fator de potência, fator de desequilíbrio, e variação de tensão em regime permanente (ou seja variação de amplitude). É importante observar, que o indicador de distorção harmônica em condições críticas afeta diretamente os demais

indicadores, já que este deforma a forma de onda senoidal apresentada pelas Figuras 3 e 4.

É importante ressaltar que por mais que nos esforcemos, nas aplicações práticas ou reais os sinais elétricos sempre vão possuir alguns tipos de perturbações por menores que elas sejam. Assim, o ideal seria um sinal com o mínimo de distúrbios possíveis para as tensões e correntes trifásicas. Nas Figuras 5 e 6 podemos visualizar um exemplo real para as tensões e correntes elétricas trifásicas medidas na baixa tensão de uma indústria, ou seja, na etapa de consumo. Essas representações gráficas foram obtidas através do analisador de qualidade de energia modelo EMBRASUL RE6081/B/H N.S: 98200532.

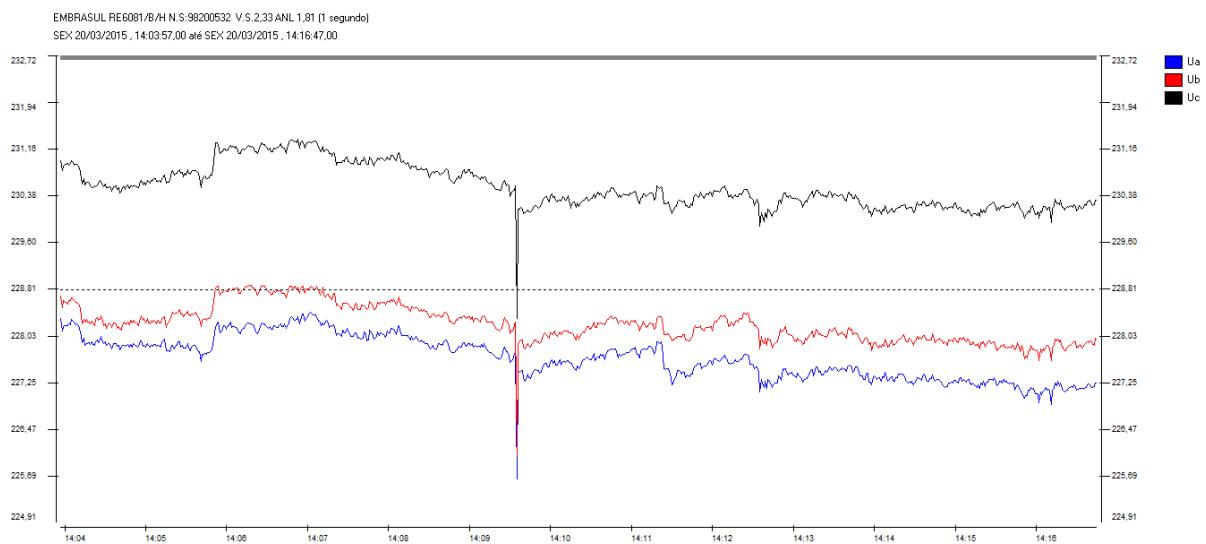


Figura 5 – Tensões RMS para fases a, b, e c, medidas in loco, período entre 14:04:00 às 14:16:00 horas do dia 19-03-15.

3.2 Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica

Os fenômenos relativos à Qualidade da Energia Elétrica podem ser considerados como sendo um subconjunto de um grupo mais amplo de fenômenos eletromagnéticos. Assim distúrbios que afetam a QEE são provenientes de equipamentos consumidores, do próprio sistema elétrico de geração, transmissão e distribuição, e de fenômenos naturais.

A Figura 7, exemplifica alguns dos distúrbios eletromagnéticos que contribuem para a perda da qualidade de um suprimento elétrico.

Desta forma, é importante conhecê-los e estudá-los, de modo a desenvolver novas tecnologias no intuito de reduzir as suas ocorrências, quando possível. E em casos inevitáveis reduzir os impactos causados por estes distúrbios ao sistema elétrico, seja ele de baixa, média ou alta tensão. De acordo com [Arruda \(2003\)](#), [IEEE1159 \(2009\)](#),

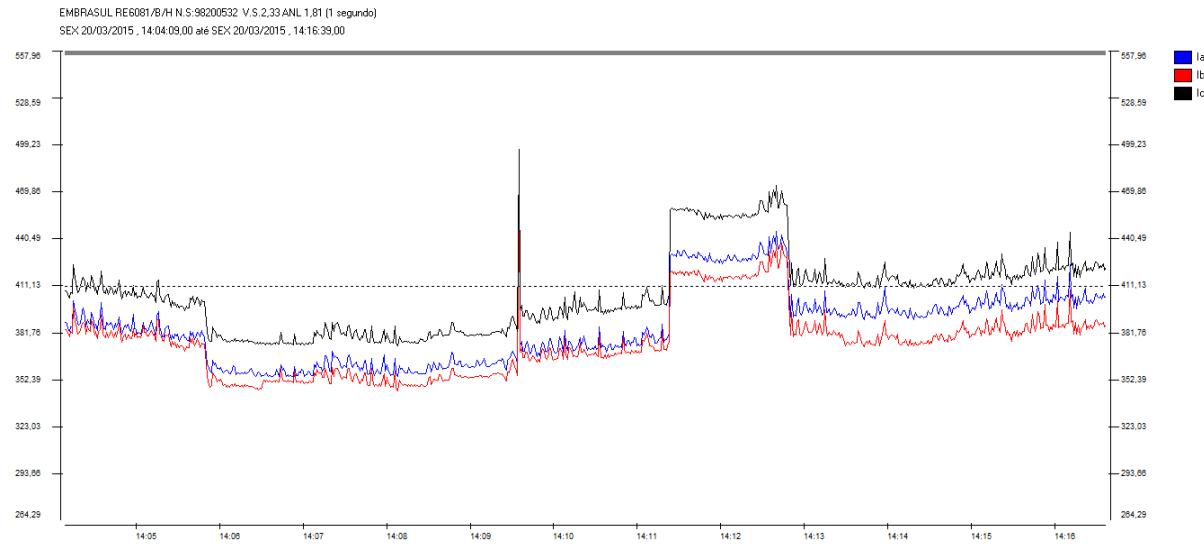


Figura 6 – Correntes RMS para fases a, b, e c, período entre 14:04:00 às 14:16:00 horas do dia 19-03-15.

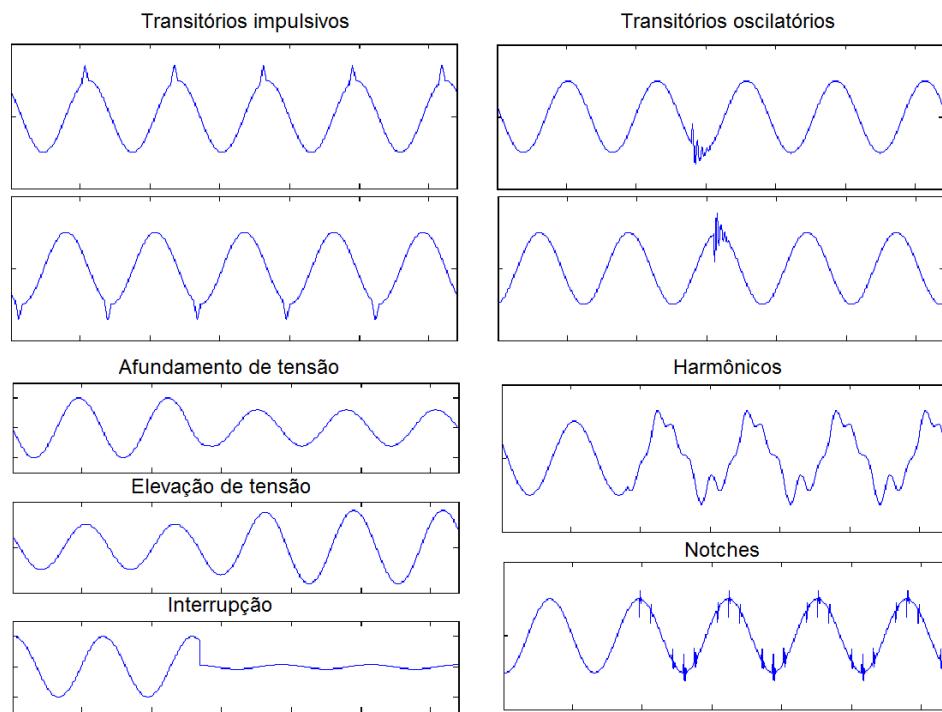


Figura 7 – Exemplos de distúrbios eletromagnéticos que afetam a QEE.

Fonte: Adaptado Ferreira, 2010

e Kusko e Thompson (2007) os principais fenômenos eletromagnéticos associados à Qualidade de Energia Elétrica são subdivididos em:

- Transitórios:

[Ferreira \(2010\)](#) afirma que o termo transitório é empregado para caracterizar a ocorrência de eventos de curta duração no sistema elétrico. Esses fenômenos podem ser de dois tipos: impulsivos ou oscilatórios e ocorrem no sistema em função de diversas condições. Muitos transitórios são decorrentes de variações instantâneas na corrente, as quais interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Podem também ser consequências de cargas com operações intermitentes, chaveamentos de bancos de capacitores, faltas fase-terra, operação de dispositivos de semicondutores e falhas em condutores. Descargas atmosféricas são um caso especial de transitórios devido aos níveis extremamente altos de energia e intervalo de tempo bastante reduzido.

- Variação de tensão de curta duração:

As variações de tensão de curta duração podem ser do tipo instantâneo, momentâneo ou temporário, sendo estes caracterizados pelo afundamento (sag), ou elevação (swell) da amplitude da tensão no sistema durante um curto intervalo de tempo. A redução da amplitude da tensão a valores inferiores a 0,1 p.u. caracteriza uma interrupção momentânea do sistema. Os limites de tempo de ocorrência e intervalo de variação da amplitude da tensão para estes eventos são mostrados na Tabela 2. [Ferreira \(2010\)](#), [Arruda \(2003\)](#) informam que tais variações de tensão são, geralmente, causadas por condições de falta, energização de grandes cargas as quais requerem altas correntes de partida, curto-circuitos, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. A Figura 7 ilustra variações de tensão com afundamento, elevação e interrupção.

- Variação de tensão de longa duração:

[Arruda \(2003\)](#), [Ferreira \(2010\)](#), [Kusko e Thompson \(2007\)](#), e [IEEE1159 \(2009\)](#), descrevem as variações de tensão de longa duração como sendo caracterizadas pela alteração do valor RMS (*Root Mean Square*) da tensão na frequência fundamental do sistema por um período maior que 1 minuto. Estas variações podem ser positivas, caracterizando uma sobretensão, ou negativas, ocasionando uma subtensão. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema. A interrupção permanente do sistema, também é classificado como sendo uma variação de tensão de longa duração, pelo [IEEE1159 \(2009\)](#). Atualmente no Brasil, a [Aneel \(2001\)](#) determina valores limites e de referência para esses fenômenos.

- Distorções da forma de onda:

[Arruda \(2003\)](#), e [Rosa \(2006\)](#) descrevem as distorções da forma de onda como sendo um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na

frequência fundamental, sendo caracterizada pelo seu conteúdo espectral. Assim as distorções da forma de onda podem ser caracterizadas como sendo: Nível de corrente contínuo (CC), Harmônicos, Inter-harmônicos, *Notching*, e Ruídos. A Figura 7 apresenta um exemplo de comportamento para fenômenos do tipo harmônicos e *Notching*. Para um entendimento mais detalhado destes fenômenos consultar: [Rosa \(2006\)](#), [Silva \(2008\)](#), [Rey e Muneta \(2011\)](#), [Arrillaga e Watson \(2003\)](#).

- Flutuação ou oscilação de tensão:

[Arruda \(2003\)](#) destaca a flutuação ou oscilação de tensão como sendo variações sistemáticas entre 95% e 105% do valor eficaz da tensão. Geralmente são causadas por cargas de grande porte, a exemplo das industriais, e manifestam-se das três formas destacadas a seguir. Aleatórias: que tem como fonte principal os fornos a arco, sendo que as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação. Repetitivas: as máquinas de solda e elevadores de minas são grandes causadores deste tipo de flutuação, devido ao seu regime periódico. Esporádicas: seu principal efeito nas instalações é a oscilação de potência e torque em máquinas rotativas, interferências em sistemas de proteção e o efeito *flicker*.

- Desequilíbrio de tensão:

[Ferreira \(2010\)](#), e [Rosa \(2006\)](#) descrevem o desbalanceamento de tensão como sendo a razão da componente de sequência negativa (ou de sequência zero) para a componente de sequência positiva. As tensões de sequência negativa ou zero no sistema de energia geralmente resultam do desbalanceamento de cargas causando o fluxo de correntes de sequência negativa ou zero. Este desequilíbrio é causado basicamente pela ligação de cargas em duas fases ou entre fase e neutro, na rede elétrica. Tensões desequilibradas prejudicam a qualidade da energia fornecida pelas concessionárias e podem manifestar-se de três formas distintas: amplitudes diferentes, assimetria nas fases, e assimetria conjunta de amplitude e fase.

- Variação na frequência do sistema elétrico:

Para [Arruda \(2003\)](#), e [IEEE1159 \(2009\)](#), qualquer desvio da frequência fundamental do sistema na faixa de (50 ou 60 Hz) $\pm 0,5\text{Hz}$, pode ser definido como variação de frequência. A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o mesmo e, pequenas variações de frequência, podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração. 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 operação de uma grande fonte de geração. Tais variações afetam o funcionamento de máquinas rotativas ou processos que derivam seu tempo à partir da frequência de alimentação, como é o caso do relógio

A Tabela 2, descreve as características dos distúrbios eletromagnéticos levando em consideração seus conteúdos espectrais, tempo de duração e variações na amplitude, indicados na normativa IEEE1159 (2009). Já a Tabela 1, apresenta os tipos de distúrbios, suas possíveis causas e efeitos, e possíveis soluções para cada tipo de fenômeno.

Tabela 1 – Resumo das características dos distúrbios relacionados com a QEE.

Tipos de Distúrbios	Causa	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	Descargas atmosféricas; Chaveamentos de cargas.	Excitação de circuitos ressonantes; Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	Filtros; Supressores de surto; Transformadores isoladores.
Transitórios Oscilatórios	Descargas atmosféricas; Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	Mal funcionamento de equip. controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	Filtros; Supressores de surto; Transformadores isoladores.
Sub e Sobretensões	Partidas de motores; Variações de cargas; Chaveamento de capacitores.	Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; Falhas em equipamentos eletrônicos; Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP e TCs; Operação indevida de relés de proteção.	Reguladores de tensão; Fontes de energia de reserva; Chaves estáticas; Geradores de energia.
Interrupções	Curto-circuito; Operação de disjuntores; Manutenção.	Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; Desligamento de equipamentos; Interrupção do processo produtivo (altos custos);	Fontes de energia sobressalentes; Sistemas "no-break"; Geradores de energia.
Desequilíbrios	Fornos a arco; Cargas monofásicas e bifásicas; Assimetrias entre as impedâncias.	Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; Geração pelos retificadores de 3 harmônico e seus múltiplos.	Operação simétrica; Dispositivos de compensação.
Nível CC	Operação ideal de retificadores de meia-onda, etc.	Saturação de transformadores; Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	
Harmônicos	Cargas não-lineares.	Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; Danificação de capacitores, etc.	Filtros; Transformadores isoladores.
Inter harmônicos	Conversores estáticos de potência; Ciclo conversores; Motores de indução; Equipamentos a arco, etc.	Interferências na transmissão de sinais "carrier"; Indução de "flicker" visual no "display" de equipamentos.	
Notching	Equipamentos de eletrônica de potência.		
Ruídos	Chaveamento de equip. eletrônicos de potência; Radiações eletromagnéticas.	Distúrbios em equip. eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	Aterramento das instalações; Filtros.
Oscilações de Tensão	Cargas intermitentes; Fornos a arco; Partidas de motores.	"Flicker"; Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; Queda de rendimento de equipamentos elétricos; Interferência nos sistemas de proteção.	Sistemas estáticos de compensação de reativos; Capacitores série.
Variações na Frequência do Sistema Elétrico	Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas,etc.	

Fonte: Arruda, 2003.

Tabela 2 – Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos.

Categorias	Espectro	Duração	Tensão
1.0 Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5ns pico	<50ns	
1.1.2 Microsegundos	1us pico	50ns - 1ms	
1.1.3 Milisegundos	0,1 ms pico	>1ms	
1.2 Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	<5kHz	0,3 - 0,5ms	0 - 4pu
1.2.2 Média Frequência	5 - 500kHz	20us	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5 - 5MHz	5us	0 - 4pu
2.0 Variações de Curta Duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos - 3s	<0,1pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30 ciclos - 3s	0,1 - 0,9pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,2pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3s - 1min.	<0,1pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3s - 1min.	0,1 - 0,9pu
2.3.3 Elevação (Swell)		3s - 1min.	1,1 - 1,2pu
3.0 Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupção Permanente		>1min.	0,0pu
3.2 Subtensão		>1min.	0,8 - 0,9pu
3.3 Sobretensão		>1min.	1,1 - 1,2pu
4.0 Desequilíbrio de Tensão		Est. Perman.	
5.0 Distorção da Forma de Onda			
5.1 Nível CC (DC offset)		Est. Perman.	0 - 0,1%
5.2 Harmônicas	0 - 100	Est. Perman.	0 - 20%
5.3 Inter Harmônicas	0 - 6kHz	Est. Perman.	0 - 2%
5.4 Recortes de Comutação (Notching)		Est. Perman.	
5.5 Ruído (Noise)	Banda Larga	Est. Perman.	0 - 1%
6.0 Flutuação de Tensão	<25Hz	Est. Perman.	0,1 - 7%
7.0 Variação de Frequência		<10s	

Fonte: IEEE 1159/2009.

4 Regulamentações – Qualidade de Energia Elétrica

Vamos analisar as regulamentações sobre a Qualidade de Energia Elétrica – QEE de duas formas: As normas e regulamentações nacionais e as normas e regulamentações internacionais, para posteriormente fazermos uma comparação para obtermos os parâmetros necessários para desenvolvimento do algoritmo proposto neste trabalho.

4.1 Normas e Regulamentações Nacionais

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL aprovou em dezembro de 2008 a primeira versão de um conjunto de documentos para tratar do tema: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Onde, de acordo com ([PRODIST, 2012](#), md. 01/09):

Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST constitui um conjunto de diretrizes e procedimentos para o segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil, descritas em oito módulos. Desta forma os oito módulos do PRODIST são regulatórios que padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição.

De acordo com [Prodist \(2012, md. 01/09\)](#), os seus principais objetivos são:

- Garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- Propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- Disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- Estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- Assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;

- Disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.

No Brasil a regulamentação da qualidade do produto energia elétrica, pode ser dividida em duas formas. A primeira visa à normatização da QEE no âmbito do Sistema Interligado Nacional (Rede Básica), ou seja, as linhas de transmissão que no Brasil são projetadas em corrente alternada com níveis de tensão normalmente acima de 69kV, ou seja, alta tensão. A segunda visa normatizar a QEE no âmbito do sistema de distribuição de energia elétrica, ou seja, redes de distribuição com níveis de tensões iguais ou abaixo de 69kV.

No Brasil, a regulamentação da qualidade do produto pode ser estratificada de duas formas, uma visando a normatização do assunto no âmbito do sistema interligado nacional (Rede Básica) e outra no âmbito dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Para o caso da Rede Básica, a regulamentação existente no país resume-se aos submódulos 2.8 e 3.6 dos Procedimentos de Rede, elaborados sob a coordenação do Operador Nacional do Sistema Elétrico e aprovados pela ANEEL. Em relação ao segmento da distribuição de energia elétrica, a regulamentação existente encontra-se disponível nos Módulos 3 e 8 dos Procedimentos de Distribuição. ([OLIVEIRA et al., 2014](#), rt. 01/08, p. 08).

É importante ressaltar que no Brasil a unidade consumidora, é definida pela Resolução 505 da ANEEL como sendo: um conjunto de instalações e equipamentos elétricos caracterizados pelo recebimento de energia elétrica em um só ponto de entrega, com medição individualizada e correspondente a um único consumidor. Pode ter sua unidade de consumo atendida em três níveis distintos de tensão elétrica, são eles:

- Unidade Consumidora atendida em Alta Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal igual ou superior a 69 kV;
- Unidade Consumidora atendida em Média Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV;
- Unidade Consumidora atendida em Baixa Tensão: unidade consumidora atendida com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV;

Este trabalho visa fazer uma análise tanto no âmbito nacional como internacional das diretrizes existentes que regulamentam a qualidade do produto energia elétrica no ambiente do sistema de distribuição de energia elétrica com foco no consumo. Porém como foi visto anteriormente a resolução 505 da ANEEL, classifica a unidade consumidora de energia elétrica em três níveis distintos de tensão: Baixa Tensão, Média Tensão e Alta Tensão.

Desta forma, foi analisado primeiramente as diretrizes atuais considerando os níveis de tensão abaixo de 69kV, ou seja, em Média e Baixa Tensão. Porém, o algoritmo desenvolvido faz o tratamento de dados em níveis de tensão abaixo de 1kV (Baixa Tensão), já que esse representa o nível de tensão no final da cadeia do consumo de energia elétrica. O Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica do PRODIST, define os seguintes aspectos a serem considerados com relação a qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- Tensão em Regime Permanente;
- Fator de Potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de Tensão;
- Flutuação de Tensão;
- Variações de Tensão de Curta Duração;
- Variação de Frequência.

De acordo com [Oliveira et al. \(2014, rt. 01/08, p. 09\)](#), no [Prodist \(2012\)](#) não existem limites publicados para os diversos indicadores associados com a qualidade do produto descritos no Módulo 8. Com exceção, das variações de tensão em regime permanente, para as quais existem limites, prazos de regularização e penalidades.

Os demais indicadores descritos no Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) possuem apenas valores de referência, sem nenhum tipo de penalização ou obrigação quando da violação dos referidos valores. O Quadro 1 descreve um comparativo com relação a valores de referência, limites e possíveis penalidades para os indicadores com relação diretrizes para qualidade do produto no Brasil. Vale ressaltar que o Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) não prevê punição para quem não atender os limites mínimos para o indicador Fator de Potência, esses limites podem ser encontrados através da Resolução Normativa nº 414 ver [Aneel \(2010\)](#).

Observando o Quadro 2 os indicadores Tensão em Regime Permanente, Fator de Potência e Variação de Frequência não são mencionados já que não possuem terminologia específica de acordo com o [Prodist \(2012\)](#).

É importante ressaltar ainda que as diretrizes do [Prodist \(2012\)](#), não fazem nenhum tipo de abordagem com relação a prováveis referências ou limites para à Distorção Harmônica de Corrente.

Quadro 1 – Comparativo de indicadores de procedimentos de distribuição - PRODIST.

Documento	Indicador	Valores de Referência	Limites	Penalidades
Procedimentos de Distribuição	Fator de Potência	SIM	NÃO	NÃO
	Distorções Harmônicas	SIM	NÃO	NÃO
	Desequilíbrios de Tensão	SIM	NÃO	NÃO
	Flutuações de Tensão	SIM	NÃO	NÃO
	Variações de Tensão de Curta Duração	NÃO	NÃO	NÃO
	Variação de Frequência	SIM	SIM	NÃO
	Tensão em Regime Permanente	SIM	SIM	SIM

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2014, rt. 01/08

Quadro 2 – Terminologia adotada pelo Módulo 8 do PRODIST.

Indicador	Terminologia Adotada nos Procedimentos de Distribuição	
	Notação	Designação
Distorção Harmônica de Tensão	DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
	DITH%	Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem n
Desequilíbrio de Tensão	FD	Fator de Desequilíbrio
Flutuações de Tensão	Pst	Indicadores de Severidade de Cintilação de Curta Duração
	Plt	Indicadores de Severidade de Cintilação de Longa Duração
	PstD95%	Pst - Percentil Diário 95%
	PltS95%	Plt - Percentil Semanal 95%
Variações de Tensão de Curta Duração	IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
	AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
	EMT	Elevação Momentânea de Tensão
	ITT	Interrupção Temporária de Tensão
	ATT	Afundamento Temporário de Tensão
	ETT	Elevação Temporária de Tensão

Fonte: ANEEL - Módulo 8 do PRODIST, 2012.

Com base nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [Prodist \(2012\)](#), na Resolução Normativa nº 505 [Aneel \(2001\)](#) que estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, e na Resolução Normativa nº 414 [Aneel \(2010\)](#) que trata sobre as condições gerais de fornecimento de energia elétrica no Brasil. Faremos uma descrição dos valores de referência ou limites estabelecidos para os indicadores do Quadro 1.

4.1.1 Fator de Potência

O Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) considera apenas o cálculo trigonométrico da função cosseno com base nas potências ativa, reativa e aparente, para obtenção do fator de potência. Já a Resolução Normativa 414 [Aneel \(2010\)](#) descreve o Fator de Potência como sendo a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativas e reativas, consumidas num mesmo período

especificado.

Desta forma, as diretrizes destas normativas não consideram o efeito que a distorção harmônica de tensão e de corrente pode causar sobre as potências elétricas para o cálculo do fator de potência.

Os limites mínimos exigidos para o Fator de Potência por estas diretrizes estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores de referência para fator de potência no sistema de distribuição.

Indicador	Valor de Referência	Diretriz	Nível de Tensão
Fator de Potência - fp	0,92 ≤ fp ≤ 1,00 (Indutivo)	PRODIST	≤ 300kV
	0,92 ≤ fp ≤ 1,00(Capacitivo)		
	0,92 ≤ fp ≤ 1,00 (Indutivo)	REN 414/2010	Grupo A e B
	0,92 ≤ fp ≤ 1,00(Capacitivo)		

Fonte: Módulo 8 do PRODIST/2012 e Resolução Normativa 414/2010 - ANEEL.

Apesar do [Prodist \(2012\)](#) não prevê punição para quem não atender os valores de referência com relação ao fator de potência, a Resolução 414 [Aneel \(2010\)](#) prevê punição a partir multas. As multas são aplicadas com base nos cálculos obtidos a partir dos Art. 96 e 97 desta Resolução.

4.1.2 Distorções Harmônicas

As normas e resoluções nacionais com relação à QEE não descrevem valores de referência ou limites para os indicadores de Distorção Harmônica de Corrente e Distorção Harmônica de Tensão nos diferentes níveis de unidade consumidora. A única exceção é o Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) que referencia valores para Distorção Harmônica de Tensão Total e Individual. Desta forma, de acordo com o [Prodist \(2012\)](#), md. 08/09, p. 19), as distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

O [Prodist \(2012\)](#) descreve o modelo matemático utilizado para obtenção das grandezas de Distorção Harmônica Total e Individual de Tensão. Porém, não faz nenhuma abordagem de como podem ser obtidos os valores de Distorção Harmônica Total e Individual de Corrente.

Dois importantes pontos sobre a metodologia a ser utilizada para medição da distorção harmônica são descritos no [Prodist \(2012\)](#), são eles:

- Os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas com estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações utilizadas;

- E o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25^a ordem harmônica ($hm_{\min} = 25$).

Os valores referenciados pelo [Prodist \(2012\)](#) para as Distorções Harmônicas Totais de Tensão estão descritos no Quadro 4. É importante destacar que V_N é a tensão nominal no barramento elétrico.

Quadro 4 – Valores de referência das distorções harmônicas totais de tensão.

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão - DTT [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV \leq V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV \leq V_N \leq 69kV$	6
$69kV \leq V_N \leq 230kV$	3

Fonte: Módulo 8 do PRODIST/2012 – ANEEL.

Como já foi dito antes, as diretrizes nacionais não referenciam valores ou limites para distorções harmônicas totais e individuais para corrente elétrica. Também não fazem nenhum tipo de notação sobre punições com relação a este tipo de indicadores. Vale ressaltar que as distorções harmônicas tanto de corrente como de tensão são um dos principais causadores de distúrbios no sistema elétrico. As distorções harmônicas em valores excessivos afetam diretamente outros indicadores da QEE, tais como: fator de potência, frequência, valor de amplitude da tensão e da corrente.

4.1.3 Desequilíbrio de Tensão

Apenas o [Prodist \(2012\)](#) faz uma simples e modesta indicação sobre valores de referência com relação ao desequilíbrio de tensão no sistema elétrico de distribuição. Mesmo assim, tal referência é indicada para valores tensão acima de 1kV. Ou seja as demais normas regulamentadoras tais como as Resoluções 505 da [Aneel \(2001\)](#) e 414 da [Aneel \(2010\)](#) não fazem nenhum tipo de especificação com relação a esse indicador.

O desequilíbrio de tensão é descrito pelo [Prodist \(2012\)](#) como sendo o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição, onde o fator de desequilíbrio percentual pode ser obtido através da razão entre a magnitude da tensão de sequência negativa pela magnitude da tensão de sequência positiva. Assim, os procedimentos para realização de medições dos desequilíbrios de tensão é realizada de forma a eliminar possíveis efeitos das componentes de sequência zero. O [Prodist \(2012\)](#) solicita que as medições devam ser realizadas para as tensões entre fase-fase e para os valores de referência o ([PRODIST, 2012, md. 08/09, p. 22](#)), diz o seguinte:

O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, será estabelecido em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Com base na citação acima, descrevemos o valor de referência do desequilíbrio de tensão com sendo 2% para unidades consumidoras de Média e Alta tensão, ver Quadro 5. Ou seja, o desequilíbrio de tensão para consumidores de Baixa Tensão não possui valores de referência ou limites referenciados nas diretrizes nacionais. Aliado a falta de indicação de valores de referência ou limites percentuais para o desequilíbrio de tensão, está o fato que não existe nenhum tipo de punição para os consumidores que apresentarem tal perturbação em seu sistema elétrico.

Quadro 5 – Valores de referência para desequilíbrio de tensão em porcentagem.

Indicador	Valor de Referência [%]
	$V_N >1KV$
FD %	2,0

Fonte: Módulo 8 do PRODIST/2012 – ANEEL.

4.1.4 Flutuação de Tensão

Da mesma forma que o indicador de Desequilíbrio de Tensão a Flutuação de Tensão não possui especificação de valores de referência ou limites nas Resoluções 505 da Aneel (2001) e 414 da Aneel (2010). Apenas o Módulo 8 do Prodist (2012) especifica de forma simplificada, ou seja, sem muitos detalhes possíveis valores de referência para este indicador. Vale ressaltar também que nenhum tipo de punição é delimitado para consumidores que apresentarem esse tipo de perturbação em seu sistema elétrico.

O Prodist (2012, md. 08/09, p. 23) ainda descreve a Flutuação de Tensão como sendo uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão.

A determinação da qualidade da tensão de um barramento elétrico do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão, Prodist (2012, md. 08/09, p. 23).

No Prodist (2012) as seguintes considerações são feitas com relação ao indicador Flutuação de Tensão:

- Para a obtenção dos níveis de severidade de cintilação, associados à flutuação de tensão, definidos pelos indicadores Pst e Plt, utilizam-se os procedimentos estabelecidos nos documentos da Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*):

IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*, ver ([IEC61000, 1990-2006](#)). Estes valores são derivados da medição e processamento das tensões dos barramentos, traduzidas em níveis de sensação de cintilação luminosa, com posterior classificação em faixas de probabilidade de ocorrência;

- De acordo com as orientações das normas, o indicador Pst representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos;
- De modo semelhante, a grandeza Plt expressa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas, através da composição de 12 valores consecutivos de Pst;
- Ao longo de 24 horas de medição deve ser obtido um conjunto de valores de Pst que, devidamente tratado, conduzirá ao PstD95%. Ao final de uma semana de medição considera-se como indicador final o maior valor dentre os sete valores encontrados;
- De modo análogo, obtém-se ao longo de uma semana de registro um conjunto de valores representativos de Plt, o qual, tratado estatisticamente, deve ser conduzido ao valor de PltS95%.

Observa-se que o indicador Flutuação de Tensão não pode ser medido pontualmente, já que se faz necessário um tratamento estatístico ao longo de um determinado tempo. O Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) fornece valores de referência para o percentil diário e semanal. Ou seja, não existem valores de referência ou limites para os níveis de severidade de cintilação, associados à flutuação de tensão, definidos pelos indicadores Pst e Plt.

O Quadro 6 descreve os valores de referência para a Flutuação de Tensão fornecidos pelo [Prodist \(2012\)](#) para valores de tensão menores ou iguais a 300kV, ou seja nos três níveis de consumo, Baixa, Média e Alta Tensão.

Quadro 6 – Valores de referência para PstD95% e PltS95%.

Valor de Referência	PstD95%	PltS95%
Adequado	<1 p.u. / FT	<0,8 p.u. / FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0,8 p.u. – 1,6 p.u. / FT
Crítico	>2 p.u. / FT	>1,6 p.u. / FT

Fonte: Módulo 8 do PRODIST/2012 – ANEEL.

O [Prodist \(2012\)](#) orienta que o Fator de Transferência - FT deve ser calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento do sistema de distribuição e o valor do PltS95% do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição

eletricamente mais próximo. Porém, para os casos em que os FT entre os barramentos envolvidos não sejam conhecidos através de medição, o Quadro 7 abaixo descrito fornece valores típicos a serem aplicados para a avaliação da flutuação de tensão nos barramentos do sistema de distribuição.

Quadro 7 – Fatores de Transferência para obtenção dos PstD95% e PltS95%.

Tensão Nominal do Barramento	FT
Tensão do Barramento $\geq 230\text{kV}$	0,65
$69\text{kV} \geq \text{Tensão do Barramento} \leq 230\text{kV}$	0,80
Tensão do Barramento $\leq 69\text{kV}$	1,00

Fonte: Módulo 8 do PRODIST/2012 – ANEEL.

(OLIVEIRA et al., 2014, rt. 01/08, p. 11), faz a seguinte consideração sobre a análise de perturbações relacionadas à Flutuação de Tensão:

Sobre o fenômeno das flutuações de tensão, cabe destacar que as definições, indicadores e limites, assim como os Fatores de Transferência, utilizados no módulo 8 do Prodist foram fielmente reproduzidos do submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, utilizados para regulamentação do assunto na Rede Básica [...] Entretanto, diferentemente dos sistemas de transmissão, a utilização do Fator de Transferência nos sistemas de distribuição de energia elétrica não se apresenta como um procedimento adequado. [...] Por fim, deve-se considerar também que nos sistemas de distribuição de energia elétrica as fontes de flutuação de tensão encontram-se não somente de forma centralizada (AT e MT), mas também (e principalmente) de forma distribuída na BT, ou mesmo na MT, de forma que a propagação do fenômeno pode ser na direção inversa daquela considerada na Rede Básica, ou seja, da baixa tensão para as tensões mais elevadas.

Desta forma, pode-se concluir que os valores de referência apresentados nos Quadros 6 e 7, não são baseados em estudos específicos para tal sistema de distribuição. Ou seja, os resultados obtidos utilizando o procedimento indicado no Prodist (2012) possuem grande probabilidade de não estimar a realidade do sistema.

4.1.5 Variação de Tensão de Curta Duração

Da mesma forma que nos dois indicadores anteriores, apenas o Prodist (2012) faz algum tipo de descrição sobre a variação de tensão de curta duração. Mesmo assim, essa descrição indica apenas a forma como são classificados alguns desvios de tensão de curta duração.

O Prodist (2012) descreve a Variação de Tensão de Curta Duração como sendo desvios significativos no valor eficaz da tensão (V_{ef}) em relação a tensão de referência (V_R) em curtos intervalos de tempo. Elas são classificadas de acordo o Quadro 8.

Quadro 8 – Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão (Valor Eficaz) em Relação a Tensão de Referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$t \leq 3$ segundos	$V_{ef} < 0,1$ p.u. em Relação a VR
	Afundamento Momentânea de Tensão	$01\ ciclo \leq t \leq 3$ segundos	$0,1$ p.u. $\leq V_{ef} < 0,9$ p.u. em Relação a VR
	Elevação Momentânea de Tensão	$01\ ciclo \leq t \leq 3$ segundos	$V_{ef} > 1,1$ p.u. em Relação a VR
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	3 segundos $< t < 3$ min.	$V_{ef} < 0,1$ p.u. em Relação a VR
	Afundamento Temporária de Tensão	3 segundos $< t < 3$ min.	$0,1$ p.u. $\leq V_{ef} < 0,9$ p.u. em Relação a VR
	Elevação Temporária de Tensão	3 segundos $< t < 3$ min.	$V_{ef} > 1,1$ p.u. em Relação a VR

Fonte: Módulo 8 do PRODIST/2012 – ANEEL.

No [Prodist \(2012\)](#) as seguintes considerações são feitas com relação a metodologia a ser adotada para realização das medições da variação de tensão de curta duração - VTCD, são elas:

- Além dos parâmetros duração e amplitude já definidos, a severidade da VTCD, medida entre fase e neutro, de determinado barramento do sistema de distribuição é também caracterizada pela frequência de ocorrência. Esta corresponde à quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros duração e amplitude ocorrem em determinado período de tempo ao longo do qual o barramento tenha sido monitorado;
- O indicador a ser utilizado para conhecimento do desempenho de um determinado barramento do sistema de distribuição com relação às VTCD corresponde ao número de eventos agrupados por faixas de amplitude e de duração, discretizados conforme critério estabelecido a partir de levantamento de medições;
- Num determinado ponto de monitoração, uma VTCD é caracterizada a partir da agregação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento fase-neutro. Assim sendo, eventos fase-neutro simultâneos são primeiramente agregados compondo um mesmo evento no ponto de monitoração (agregação de fases);

- Os eventos consecutivos, em um período de três minutos, no mesmo ponto, são agregados compondo um único evento (agregação temporal);
- O afundamento ou a elevação de tensão que representa o intervalo de três minutos é o de menor ou de maior amplitude da tensão, respectivamente;
- A agregação de fases deve ser feita pelo critério de união das fases, ou seja, a duração do evento é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro dos eventos fase-neutro transpõe determinado limite e o instante em que o último dos eventos fase-neutro retorna para determinado limite;
- Afundamentos e elevações de tensão devem ser tratados separadamente.

[Oliveira et al. \(2014\)](#), rt. 01/08, p. 09 afirma ainda que tanto nos Procedimentos de Distribuição, quanto nos Procedimentos de Rede, não existem indicações de valores de referência, ou limites, para o fenômeno das variações de tensão de curta duração – VTCD. O [Prodist \(2012\)](#) orienta que as unidades consumidoras devem utilizar as bases de dados anuais de monitoramento das barras de distribuição, por parte das concessionárias, e nenhum tipo de punição é descrita para consumidores que apresentarem esse tipo de perturbação no seu sistema elétrico.

4.1.6 Variação de Frequência

As Resoluções 505 e 414 ver [Aneel \(2001\)](#), e [Aneel \(2010\)](#) não fazem nenhum tipo de especificação sobre a frequência elétrica do sistema. O Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) descreve alguns limites em que o sistema de geração de energia acoplado a rede elétrica de distribuição deve manter para assegurar a estabilidade da frequência elétrica no sistema de distribuição.

Em condições normais de operação e em regime permanente tem-se que:

- O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9Hz e 60,1Hz;
- As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5Hz a 60,5Hz, no prazo de 30 (trinta) segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

Em condições extremas de operação, ou seja, havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência elétrica do sistema não deve:

- Não pode exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz em condições extremas;
- Pode permanecer acima de 62Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- Pode permanecer abaixo de 58,5Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

Da mesma forma que nos tópicos anteriores o [Prodist \(2012\)](#) e as demais regulamentações não prevêem nenhum tipo de punição para consumidores que causarem esse tipo de perturbação no sistema elétrico. Vale ressaltar que os valores limites descritos acima, são valores adotados como critérios mínimos exigidos para a frequência elétrica do barramento de distribuição. Ou seja, não são especificados limites ou valores de referência para o sistema elétrico do agente consumidor em Baixa Tensão.

4.1.7 Tensões em Regime Permanente

A Resolução 505 ver [Aneel \(2001\)](#) e o Módulo 8 do [Prodist \(2012\)](#) delimitam valores limites para permanência das Tensões em Regime Permanente, isso para Alta, Média e Baixa Tensão, no barramento trifásico do sistema elétrico de distribuição.

No Quadro 9 estão descritos as classificações dos limites de tensões para funcionamento em regime permanente. Os dados indicados foram retirados do [Prodist \(2012\)](#) e da Resolução Normativa N° 505 da ANEEL.

As punições são direcionadas para as concessionárias, já que as mesmas devem garantir os níveis de tensão estejam dentro dos limites indicados no Quadro 9, para o ponto de entrega ou de fornecimento da energia elétrica. Porém a ANEEL não prevê punição para consumidores que apresentarem problemas com relação a variação da tensão em regime permanente em suas próprias instalações elétricas.

Observamos também, que os valores de referência para tensão abaixo de 1kV são bastante variados. Isso ocorre porque no Brasil, a tensão de fornecimento na BT varia de acordo a região. Podemos citar como exemplo as cidades de Santo Antônio de Jesus/BA que possui tensão de alimentação na BT (127/220V), diferente de Vitória da Conquista/Ba que é de (220/380V). Porém o nível de tensão fornecido pela concessionária, não impede que uma determinada indústria adeque suas instalações elétricas internas ao nível de tensão desejado.

Quadro 9 – Faixas de classificação das tensões em regime permanente.

Conexão em Tensão Nominal Igual ou Superior a 230kV	
Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,93\text{TR} \leq \text{TL} < 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} < \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,93\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TR}$
Conexão em Tensão Nominal Igual ou Superior a 69kV e inferior a 230kV	
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} < 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} < \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TR}$
Conexão em Tensão Nominal Superior a 1kV e inferior a 69kV	
Adequada	$0,93\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} < 0,93\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,05\text{TR}$
Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1kV (220/127)	
Adequada	$(201 \leq \text{TL} \leq 231) / (116 \leq \text{TL} \leq 133)$
Precária	$(189 \leq \text{TL} < 201$ ou $231 < \text{TL} \leq 233) / (109 \leq \text{TL} < 116$ ou $133 < \text{TL} \leq 140)$
Crítica	$(\text{TL} < 189$ ou $\text{TL} > 233) / (\text{TL} < 109$ ou $\text{TL} > 140)$
Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1kV (380/220)	
Adequada	$(348 \leq \text{TL} \leq 396) / (201 \leq \text{TL} \leq 231)$
Precária	$(327 \leq \text{TL} < 348$ ou $396 < \text{TL} \leq 403) / (189 \leq \text{TL} < 201$ ou $231 < \text{TL} \leq 233)$
Crítica	$(\text{TL} < 327$ ou $\text{TL} > 403) / (\text{TL} < 189$ ou $\text{TL} > 233)$
Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1kV (254/127)	
Adequada	$(232 \leq \text{TL} \leq 264) / (116 \leq \text{TL} \leq 132)$
Precária	$(220 \leq \text{TL} < 232$ ou $264 < \text{TL} \leq 269) / (109 \leq \text{TL} < 116$ ou $132 < \text{TL} \leq 140)$
Crítica	$(\text{TL} < 220$ ou $\text{TL} > 269) / (\text{TL} < 109$ ou $\text{TL} > 140)$
Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1kV (440/220)	
Adequada	$(402 \leq \text{TL} \leq 458) / (201 \leq \text{TL} \leq 229)$
Precária	$(380 \leq \text{TL} < 402$ ou $458 < \text{TL} \leq 466) / (189 \leq \text{TL} < 201$ ou $229 < \text{TL} \leq 233)$
Crítica	$(\text{TL} < 380$ ou $\text{TL} > 466) / (\text{TL} < 189$ ou $\text{TL} > 233)$

Fonte: Adaptado do Módulo 8 do PRODIST/2012 e da Resolução 505/2001 – ANEEL.

4.2 Normas e Regulamentações Internacionais

4.2.1 Normas e Regulamentos Sobre QEE – Padrão: IEC e IEEE

Existem atualmente no mundo diversas regulamentações / normas que objetivam estabelecer padrões para manter a qualidade da energia elétrica com relação ao seu fornecimento por parte das concessionárias. Os institutos IEC (*International Electrotechnical Commission*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) foram os

pioneiros no desenvolvimento de diretrizes para normatizar a QEE. Desta forma, as normativas sobre QEE desenvolvidas pela [IEC61000 \(1990-2006\)](#) e pelo [IEEE1159 \(2009\)](#) são usadas como referência para desenvolvimento de novas diretrizes no mundo.

A maioria dos requisitos para a qualidade da energia elétrica adotados em regulamentações de diferentes países se fundamentam, nas diretrizes traçadas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*). Ainda, é importante destacar que o documento EN 50160 produzido pelo CENELEC tem suas raízes nas orientações estabelecidas pela IEC e atualmente se apresenta como base para a definição de limites para os distúrbios de qualidade da energia em 19 países da Europa. [Oliveira et al. \(2014, rt. 04/08, p. 05\).](#)

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização mundial de normatização, com o objetivo de promover a cooperação internacional em questões relativas a normas/recomendações/orientações no contexto elétrico e eletrônico. Assim, a IEC publica documentos para uso internacional, os quais se encontram no formato de normas, relatórios técnicos e manuais.

A IEC também publica normas técnicas com o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e desenvolve normas em conjunto com o ISO (*International Organization for Standardization*) e o ITU (*International Telecommunication Union*).

No que se refere aos aspectos sobre a qualidade da energia elétrica, esta organização, disponibiliza uma série de documentos sobre: definição dos fenômenos e seus respectivos indicadores, proposição de valores limites e apresentação de procedimentos e protocolos para a medição e avaliação de desempenho. De um modo geral, esses documentos contêm orientações que podem auxiliar nas atividades de acompanhamento dos fenômenos que alteram os padrões de fornecimento e consumo de energia elétrica nas redes de distribuição.

Com base em [Oliveira et al. \(2014, rt. 04/08\)](#) será apresentado a seguir uma descrição resumida sobre algumas diretrizes que compõem a base de documentos identificada pela IEC 61000 – *Electromagnetic compatibility (EMC)*.

- IEC 61000-2-2: Esta norma trata das perturbações que acontecem na faixa de frequência de 0 a 9kHz, com níveis de compatibilidade para corrente alternada de baixa tensão em sistemas de distribuição com uma tensão nominal de monofásica de até 420V, ou 690V para sistemas trifásicos em frequência nominal de 50Hz ou 60Hz;
- IEC 61000-3-2: Este documento trata da limitação das correntes harmônicas injetadas no sistema de distribuição. Assim, ele especifica os limites para as componen-

tes harmônicas relacionadas às correntes de entrada de equipamentos com uma corrente nominal de até 16 A por fase;

- IEC 61000-3-4: Esta recomendação técnica é direcionada aos equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem uma corrente nominal superior a 16A por fase e são alimentados por sistemas de distribuição em corrente alternada com as seguintes características: tensão nominal de até 240V, monofásica, dois ou três fios; tensão nominal de até 600V, trifásico, três ou quatro fios; frequência nominal de 50 ou 60Hz;
- IEC 61000-3-6: Avaliação de limites de emissão para a ligação das instalações no díz respeito a distorções harmônicas para sistema de potência de média, alta e extra alta tensão;
- IEC 61000-3-12: Trata da limitação das correntes harmônicas injetadas no sistema de distribuição, no sentido de definir limites para a emissão harmônica de equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente nominal superior a 16A e inferior a 75A por fase, os quais conectam em redes com as seguintes características: tensão nominal de até 240V, monofásica, dois ou três fios; tensão nominal de até 600V, trifásico, três ou quatro fios; frequência nominal de 50 ou 60Hz;
- IEC 61000-3-14: Este documento provê informações que podem ser usadas como base para determinar os requisitos para a conexão em sistemas de distribuição em baixa tensão de instalações perturbadoras, as quais se caracterizam por: emissão de correntes harmônicas e inter harmônicas, flutuações, variações e desequilíbrios de tensão.

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) é uma organização internacional sem fins lucrativos que busca desenvolver melhorias no que se refere a tecnologias voltadas para área de eletricidade. Em 1961, as lideranças das instituições AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*) e a IRE (*Institute of Radio Engineers*) decidiram consolidar as duas organizações no que hoje é conhecido como IEEE, fundada em 1963. Desta forma o IEEE se tornou um dos maiores divulgadores de jornais científicos e organizadores de conferências com alto nível de reconhecimento perante os setores da sociedade diretamente relacionados com desenvolvimento tecnológico.

Apesar disso, ([OLIVEIRA et al., 2014](#), rt. 04/08), afirma que:

As normas IEEE de qualidade de energia não apresenta uma documentação estruturada e comprehensiva comparada às normas IEC. No entanto, elas fornecem um conhecimento mais prático e teórico do fenômeno, tornando uma referência mais aplicada, mesmo fora dos Estados Unidos.

Desta forma, apresentaremos a seguir uma descrição resumida sobre algumas normas que compõem a base de Padrões do IEEE com relação à área de QEE.

- IEEE 446: *Emergency and standby power;*
- IEEE 519: *Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems;*
- IEEE 1001: *Interface with dispersed generation;*
- IEEE 1000: *Power and grounding electronics;*
- IEEE 1159: *Monitoring power quality;*
- IEEE 1250: *Service to critical loads;*
- IEEE 1346: *System compatibility in industrial environments;*
- IEEE 1366: *Electric utility reliability indices;*
- IEEE 1459: *Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions;*
- IEEE 1453: *Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems.*

Dentre as diversas normativas do Padrão IEEE descritas acima, as que possuem maior relação com a medição e análise da QEE são: IEEE 519; IEEE 1159; IEEE 1459. Estas normas juntamente com os Padrões da IEC são utilizadas vastamente como base para o desenvolvimento de diversos projetos científicos diretamente relacionados a tema qualidade de energia elétrica. De acordo com as normas IEC 61000-2-2 (2000) / IEC 61000-2-2 (2003) e a IEEE 1159 (2009), os distúrbios provenientes da má QEE distribuídos segundo o Quadro 10.

É possível verificar os limites de alguns indicadores com base em algumas normas IEC e IEEE, é importante ressaltar que para a IEEE as distorções harmônicas podem ser analisadas com base na [IEEE1159 \(2009\)](#). Essa normativa aborda os requisitos e práticas recomendadas para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência e estabelece metas para projetos de sistemas elétricos com cargas lineares e não lineares. É importante ressaltar ainda que segundo a norma [IEEE1159 \(2009\)](#) a qualidade de energia elétrica deve ser analisada no ponto de acoplamento comum (point of common coupling – PCC), que fica entre as fontes e as cargas.

Quadro 10 – Classificação de possíveis distúrbios no sistema elétrico de potência.

IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-12	IEEE 1159 / 1995
Harmônicos até a 50 ^a ordem	Transitórios
Flutuação de Tensão e Flicker	Variação de Curta Duração
Inter harmônicos até a 50 ^a harmônica	Variação de Longa Duração
Distorções de tensão em alta frequência	Desequilíbrios de Tensão
Quedas de tensão e interrupções de energia	Distorções na Forma de Onda
Desbalanceamento de tensão	Flutuações de Tensão
Sobretensões transitórias	Variações da Frequência do Sistema
Variação na frequência	—
Componentes D.C.	—
Transmissão de sinal de rede	—

Fonte: Normas IEC 61000-2-2 / IEC 61000-2-12 / IEEE 1159.

4.2.1.1 Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente

Para os indicadores: distorção harmônica total de tensão, adotaremos a sigla DTH_V , e distorção harmônica total de corrente, adotaremos a sigla DTH_I . O Quadro 11, indica os limites para distorção harmônica total de tensão no ponto de acoplamento comum, com base nas normas IEEE e IEC, para valores de tensão abaixo de 161kV.

Quadro 11 – Limites para distorção harmônica total de tensão, comparação entre as normas IEEE e IEC.

Normas Internacionais	THD_V (%)
IEC 61000-2-2 (Baixa Tensão)	8,0
IEC 61000-2-4 (Plantas Industriais Classe I)	5,0
IEC 61000-3-6 (Média Tensão)	6,5
IEC 61000-3-6 (Alta Tensão)	3,0
IEEE 519 ($V_N \leq 69\text{kV}$)	5,0
IEEE 519 ($69\text{kV} < V_N \leq 161\text{kV}$)	2,5

Fonte: Normas IEC 61000-2-2 / 61000-2-4 / 61000-3-6 e IEEE 519.

O Quadro 12 indica os limites para distorção harmônica total de tensão no ponto de acoplamento comum para níveis de tensão abaixo de 1kV, com base na norma IEEE, considerando o tipo de aplicação no sistema elétrico de baixa tensão.

Quadro 12 – Limites para distorção harmônica total de tensão em baixa tensão.

Norma IEEE 519	THD_V (%)
Aplicações especiais	3,0
Sistemas gerais	5,0
Sistemas dedicados	10,0

Fonte: IEEE 519/2009.

Os limites para correntes harmônicas são baseados na relação entre a máxima corrente de curto-círcuito (I_{SC}) e a máxima corrente de carga solicitada (I_L) para a componente da frequência fundamental no ponto de PCC. O Quadro 15 apresenta os limites para distorção harmônica total de corrente no ponto de acoplamento comum com base nas normas IEEE e IEC, considerando os níveis de tensão menor que 69kV.

Quadro 13 – Limites para distorção harmônica total de corrente em um sistema geral de distribuição, comparação entre as normas IEEE 519 ($120V < V_N \leq 69kV$) e IEC 61000-3-6 ($1kV < V_N \leq 35kV$).

Normas Internacionais	$THD_I (\%)$
IEC 61000-3-6 ($50 < I_{SC} / I_L \leq 1000$)	6,0
IEEE 519 ($I_{SC} / I_L < 20$)	5,0
IEEE 519 ($20 < I_{SC} / I_L < 50$)	8,0
IEEE 519 ($50 < I_{SC} / I_L < 100$)	12,0
IEEE 519 ($100 < I_{SC} / I_L < 1000$)	15,0
IEEE 519 ($I_{SC} / I_L > 1000$)	20,0

Fonte: IEEE IEC 61000-3-6 e IEEE 519.

Para o IEEE 519 os valores de distorção harmônica total de corrente descritos no Quadro 13, devem ser considerados como limites para os piores casos. Ou seja, considerando que o sistema elétrico esteja funcionando em condições normais com tempo de duração superior a uma hora. O IEEE também indica que para períodos de curta duração durante a inicialização de equipamentos ou condições incomuns, podem ser admitidos valores de no máximo 50% para DTH_I .

4.2.1.2 Desbalanceamento ou Desequilíbrio de Tensão

A norma IEC 61000-2-2 indica que o nível de compatibilidade para o desequilíbrio de tensão é de 2% considerando a componente de sequência negativa em relação a componente de sequência positiva. Em algumas áreas, especialmente onde ocorre a conexão de grandes cargas monofásicas, admitem-se valores de até 3%.

A norma [IEEE1159 \(2009\)](#) define o desequilíbrio em um sistema de três fases como sendo a razão entre a amplitude da componente de sequência negativa com relação à magnitude do componente de sequência positiva, expresso como uma percentagem. Esta definição pode ser aplicada para a tensão ou corrente. De acordo com a [IEEE1159 \(2009\)](#) a tensão de desequilíbrio de um sistema trifásico deve ser menor que 3%, e o desequilíbrio de corrente pode ser consideravelmente mais elevado. A variação do desequilíbrio de tensão para IEEE deve estar entre 0,5% e 2%, já a variação o desequilíbrio de corrente deve estar entre 1% e 30%. A IEEE ainda descreve que desequilíbrios de tensão maiores que 5% são considerados graves.

4.2.1.3 Variação Temporária de Frequência

A norma IEC 61000-2-2 indica que em sistemas de fornecimento de energia comuns a frequência deve ser mantida tão perto quanto possível a frequência nominal. Porém, o grau em que é possível manter esse limite depende principalmente do tamanho dos sistemas que são interligadas de forma síncrona. Esta norma indica que o nível de compatibilidade para a variação temporária de frequência a partir da frequência nominal deve ser de $\pm 1\text{Hz}$.

A norma [IEEE1159 \(2009\)](#) define que uma característica típica para variação de frequência no sistema de potência elétrica deve ser de $\pm 0,10\text{Hz}$ para um tempo menor que 10 segundos.

4.2.1.4 Variação de Tensão de Curta e Longa Duração

A [IEEE1159 \(2009\)](#) classifica as variações de tensão de curta e longa duração conforme os Quadros [14](#) e [15](#).

4.2.1.5 Flutuação de Tensão ou Flicker

As abordagens sobre a flutuação de tensão podem ser observadas nas normas IEC 61000-3-3 ($\leq 16\text{A/fase}$) e IEC 61000-3-11 ($\leq 75\text{A/fase}$) para baixa tensão e na IEC 61000-3-7 para média ou alta tensão e na IEEE 1453/2009 para valores de baixa, média e alta tensão. No quadro [16](#) observa-se os indicadores de Pst e Plt para as diferentes normas IEC e IEEE.

4.2.1.6 Variação de Tensão em Regime Permanente e Fator de Potência

As normas IEEE e IEC analisadas não preveem limites ou valores de referência para as variações de tensão em regime permanente e para o fator de potência. Desta forma, esses valores são determinados por resoluções internas de acordo com cada país. No caso do Brasil são determinados pelos Procedimentos de Distribuição, e pelas resoluções 414 e 505 da [Aneel \(2010\)](#), e da [Aneel \(2001\)](#) respectivamente.

4.2.2 Normas e Regulamentos Sobre QEE – Diretrizes de Alguns Países/Região

As diretrizes que avaliam a QEE variam de acordo com cada país, porém muitos destes adotam pelo mesmo em parte as normas IEC e IEEE como referência. Serão apresentados agora algumas normas e regulamentações referente a QEE consideradas por alguns países distribuídos em diferentes partes do mundo. Para esta análise serão utilizados como base o documento [Oliveira et al. \(2014, rt. 01/08\)](#), onde as principais normativas sobre QEE utilizadas pelos países/região listadas na Tabela [3](#).

Quadro 14 – Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão (Valor Eficaz) em Relação à Tensão de Referência
Variação Instantânea de Tensão	Afundamento de Tensão	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
	Elevação de Tensão	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção de Tensão	0,5 ciclos – 3 segundos	<0,1 p.u.
	Afundamento de Tensão	30 ciclos – 3 segundos	0,1 – 0,9 p.u.
	Elevação de Tensão	30 ciclos – 3 segundos	1,1 – 1,4 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção de Tensão	3 segundos – 1 min.	<0,1 p.u.
	Afundamento de Tensão	3 segundos – 1 min.	0,1 – 0,9 p.u.
	Elevação de Tensão	3 segundos – 1 min.	1,1 – 1,2 p.u.

Fonte: IEEE 1159/2009.

Quadro 15 – Classificação das variações de tensão de longa duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão (Valor Eficaz) em Relação à Tensão de Referência
Variação de Longa Duração de Tensão	Interrupção sustentada	>1 minuto	0,0 p.u.
	Subtensão	>1 minuto	0,8 – 0,9 p.u.
	Sobretensão	>1 minuto	1,1 – 1,2 p.u.

Fonte: IEEE 1159/2009.

Quadro 16 – Comparação das normas IEC e IEEE para os indicadores Pst e Plt.

Normas Internacionais	Pst	Plt
IEC 61000-3-3 ($\leq 16A/\text{fase}$)	1,0	0,65
IEC 61000-3-11 ($\leq 75A/\text{fase}$)	–	–
IEC 61000-3-7	–	–
IEEE 1453/2004 para BT e MT	1,0	0,8

Fonte: IEC 61000-3-3/61000-3-7/61000-3-11 e IEEE 1453.

Os Estados Unidos utilizam como referência para monitoramento dos índices de QEE as normas IEEE e a ANSI – C84.1 (*American National Standard*), aprovada pelo ANSI (American National Standards Institute), sendo a última revisão em 2011. O Japão adota as recomendações do JIS (*Japanese Industry Standard*) que é uma cópia das

Tabela 3 – Lista de países para possível análise das normas/regulamentações referentes a QEE.

País / Região	Sigla	País / Região	Sigla
Estados Unidos	USA	África do Sul	ZAF
Canadá	CAN	China	CHN
Europa	EU	Austrália	AUS
França	FRA	Peru	PER
Japão	JPN	Argentina	ARG

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

correspondentes normas IEC que avaliam o mesmo índice de QEE.

No Canadá, no que diz respeito à regulamentação de qualidade da energia elétrica cada concessionária de energia elétrica pertencente a uma determinada província que tem autonomia para estabelecer suas próprias regras. Aqui adotaremos as normas utilizadas pela empresa de transmissão e distribuição, *ATCO Electric*.

Na África do Sul utilizasse a norma NRS 048 que foi elaborada para o órgão regulador NER (*National Electricity Regulator*), por representantes da South African Electricity Supply Industry, através de um grupo de trabalhos designado por Electricity Suppliers Liaison Committee.

No Peru a norma NTCSE (*Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos*) foi implantada em 09 de Outubro de 1997. Seu objetivo é estabelecer os aspectos, parâmetros e indicadores de qualidade da energia entregue aos consumidores pelas concessionárias, bem como os valores limites e os procedimentos de medição para cada fenômeno. Na Argentina utiliza-se a norma ENRE N°465/96 (*RESOLUCIÓN ENRE N° 465/96*) implantada em 22 de Agosto de 1996. Seu principal objetivo é estabelecer os aspectos, parâmetros e indicadores de qualidade da energia entregue aos consumidores pelas concessionárias no que se refere aos fenômenos de flutuação e harmônicas de tensão.

A Austrália utiliza a normativa AS/NZS 61000-3-6, o qual se baseia, em grande parte, na IEC 61000-3-6. A Europa utiliza a norma EN50160 aprovada e revisada pelo CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) em 1994. Esta norma define as principais características a serem atendidas pela tensão nos terminais de suprimento dos consumidores nos níveis de distribuição. Este documento está em constante revisão, sendo sua versão mais atual aquela publicada no ano de 2010.

A França divergindo dos demais países da Europa, adota o contrato Emeraude que aplica o princípio da compensação de clientes por danos, para o caso da empresa fornecedora de energia elétrica exceder os limites acordados para um determinado número de distúrbios em sua rede elétrica. Assim, nestes contratos, a EDF garante

níveis mínimos de qualidade da energia elétrica fornecida e, por outro lado, solicita aos consumidores que seus impactos não excedam níveis preestabelecidos.

Por fim, temos a China, que através do antigo ministério da conservação da água e gerenciamento de energia elétrica, emitiu em 1980 um termo referente ao padrão de QEE, contendo as regras para o acompanhamento técnico da qualidade da energia elétrica do sistema. Para cada parâmetro de QEE existe uma norma específica associada, são elas: Tensão em regime permanente: GB/T 12325-2008; Frequência: GB/T 15945-2008; Desequilíbrio de Tensão: GB/T 15543-2008; Harmônicos: GB/T 14549-2008; Flutuação de Tensão: GB/T 12326-2008.

Assim, foi feita uma abordagem comparativa para as normas e regulamentações referentes aos indicadores que tratam sobre QEE, para os diversos países descritos na Tabela 3. Sendo que ao final deste tópico será possível analisar de forma geral, as considerações feitas com relação às referências existentes para cada indicador, verificando se existem limites e punições, isso falando em escala mundial.

4.2.2.1 Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente

Dentre os diversos países ou regiões existentes no mundo, pode-se observar que muitos adotam como referências as normas IEC para referenciar os indicadores de QEE, mesmo que de forma indireta. Na Tabela 4 observa-se uma descrição comparativa do indicador de distorção harmônica total de tensão, para baixas e médias tensões adotadas nos países/regiões listadas no Tabela 3.

Dentre os diversos países/regiões acima citados, o único que considera o indicador distorção harmônica total e individual de corrente, é os Estados Unidos da América. Desta forma, os limites de DTHI utilizados pelo USA, são os mesmos indicados pela normativa [IEEE1159 \(2009\)](#), no Quadro 11.

4.2.2.2 Desbalanceamento ou Desequilíbrio de Tensão

Na Tabela 5 observa-se uma descrição comparativa do indicador de desequilíbrio ou desbalanceamento de tensão, para baixas e médias tensões adotadas nos países / regiões listadas da Tabela 3.

4.2.2.3 Variação Temporária de Frequência

Na Tabela 6 observa-se uma descrição comparativa do indicador de variação de frequência, para baixas e médias tensões adotadas nos países / regiões listadas da Tabela 3.

Tabela 4 – Limites para distorção harmônica total de tensão dos países/regiões analisadas.

País / Região	THDV %	
Estados Unidos	BT	5,0
	MT	5,0
Canadá	BT	6,5
	MT	6,5
Europa	BT	8,0
	MT	8,0
França	BT	8,0
	MT	8,0
África do Sul	BT	8,0
	MT	8,0
Peru	BT	8,0
	MT	8,0
Argentina	BT	8,0
	MT	8,0
Japão	BT	–
	MT	–
China	0,38 kV	5,0
	6 - 10 kV	4,0
	35 - 66 kV	3,0
Austrália	MT	6,5

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

4.2.2.4 Variação de Tensão de Curta e Longa Duração

As normativas analisadas para os diferentes países / regiões, não indicam valores e tempos de duração para esse indicador. Com exceção da normativa NRS 048 pertencente à África do Sul, onde é indicada na documentação analisada. Porém devido a existência de várias topologias de redes elétricas no país, Oliveira et al. (2014, rt. 01/08) afirma que não é possível estabelecer limites aceitáveis para concessionárias e consumidores.

Oliveira et al. (2014, rt. 01/08), também afirma que na Europa, o fenômeno de afundamentos momentâneos de tensão apesar de considerados em normativa, e não possui descrição de limites para casos de ocorrência destes eventos especificados na norma EN 50160. Desta forma não será abordado aqui tais indicadores.

4.2.2.5 Flutuação de Tensão ou Flicker

Na Tabela 7 observa-se uma descrição comparativa dos indicadores de Pst e Plt, para baixas e médias tensões adotadas nos países / regiões listados na Tabela 3.

A duração mínima para as medições é de uma semana, resultando em 1008

Tabela 5 – Limites para desequilíbrio de tensão dos países/regiões analisadas.

País / Região	Desequilíbrio de Tensão % em BT e MT	
Estados Unidos	FD (%)	0,5 - 2,0
Canadá	VUF _{3S}	4,5
	VUF _{3S} (95%)	3,0
	VUF _{10min} (95%)	2,0
Europa	FD (%)	0,0 - 2,0
	*FD (%)	3,0
França	FD (%) Redes de 1 a 50kV	2,0
África do Sul	FD (%)	2,0
	*FD (%)	3,0
Peru	—	—
Argentina	—	—
Japão	—	—
China	FD (%) / OBS1	2,0
	FD (%) / OBS2	4,0
	FD (%) / OBS3	1,3
Austrália	FD % ($V_N < 10\text{kV}$)	3,0
	FD % ($10\text{kV} \leq V_N \leq 100\text{kV}$)	2,5
	FD % ($V_N \geq 100\text{kV}$)	2,0

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

Tabela 6 – Limites para variação de frequência da rede elétrica dos países/regiões analisadas.

País / Região	Condições	Frequência (Hz) para BT e MT
Estados Unidos	—	—
Canadá	—	—
Europa	Rede Elétrica Sincronizada ao Sistema Interligado	50 Hz ± 1% (49,5 Hz a 50,5 Hz) durante 99,5% do ano
		50 Hz + 4% / -6% (47,0 Hz a 52,0 Hz) durante 100% do tempo
	Rede Elétrica não Sincronizada ao Sistema Interligado	50 Hz ± 2% (49,0 Hz a 51,0 Hz) durante 95,0% do ano
		50 Hz ± 15% (42,5 Hz a 57,5 Hz) durante 100% do tempo
França	Sistema Interligado Redes de 1 a 50kV	50 Hz ± 1%
	Sistema Isolado Redes de 1 a 50kV	50 Hz ± 4%
África do Sul	Sistema Interligado	± 1,25%
	Sistema Isolado	± 2,5%
Peru	Variações sustentadas	± 0,6%
	Variações Súbitas de Frequênci	± 1,0 Hz
Argentina	—	—
Japão	—	—
China	Condições Normais	± 0,2% a ± 0,5%
Austrália	—	—

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

Tabela 7 – Índice de compatibilidade de cintilação luminosa e níveis de planejamento dos países / regiões analisadas.

País / Região	Indicador	Nível de Compatibilidade BT e MT	Nível de Planejamento BT e MT
Estados Unidos	Pst	1,0	—
	Plt	0,8	—
Canadá	Pst	1,0	0,9
	Plt	0,8	0,7
Europa	Pst	—	—
	Plt	≤ 1	—
França	Pst	—	—
	Plt	≤ 1	—
África do Sul	Pst	≤ 1 p.u.	—
	Plt	—	—
Peru	Pst	≤ 1 p.u.	—
	Plt	—	—
Argentina	Pst	≤ 1 p.u.	—
	Plt	—	—
Japão	Pst	—	—
	Plt	—	—
China	Pst	—	—
	Plt	≤ 1 p.u.	—
Austrália	Pst	Segue normas IEC	
	Plt	Segue normas IEC	

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

leituras de minutos do índice de Pst. Através dos valores medidos de Pst, a função de probabilidade acumulativa de Pst e Plt é calculada e os percentis Pst95%, Pst99%, Plt95% e Plt99% são calculados.

4.2.2.6 Fator de Potência

Na Tabela 8 observa-se uma descrição comparativa dos valores para o fator de potência mínimo exigido nos países / regiões listados na Tabela 3.

4.2.2.7 Variação de Tensão em Regime Permanente

Os limites definidos para variação de tensão em regime permanente utilizados em diversos países e/ou regiões do mundo podem ser observado nas Tabelas 9, 10, 11, e 12. Deve-se destacar que, durante um período de medição de uma semana, 95% dos valores integralizados ao longo de períodos de 10 minutos devem estar situados dentro dos limites estabelecidos.

Tabela 8 – Valores para o fator de potência dos países/regiões analisadas.

País / Região	Fator de Potência
Estados Unidos	0,95
Canadá	—
Europa	—
França	0,93
África do Sul	—
Peru	0,93
Argentina	0,92
Japão	—
China	—
Austrália	—

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

Tabela 9 – Tensão em regime permanente na Europa conforme EN 50160.

Tipo de Sistema	Faixa
Baixa Tensão	Tensão Nominal $\pm 10\%$
Média Tensão	Tensão Nominal $\pm 1\%$
Alta Tensão	Tensão Nominal $\pm 10\%$

Fonte: Oliveira, 2014, rt.01/08.

Tabela 10 – Tensão em regime permanente nos USA conforme ANSI C84.1-2011.

País / Região	Tensão Nominal (kV)	Tensão de Serviço (%)				Tensão de Utilização (%)			
		Ideal		Aceitável		Ideal		Aceitável	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Estados Unidos	$0,12 < V_N \leq 0,6$	95,0	105	91,6	106	91,6	105	88,0	106
	$0,6 < V_N \leq 69$	97,5	105	90,0	106	90,0	105	86,0	106

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

4.3 Considerações Finais

Considerando todos os indicadores analisados com base nas regulamentações nacionais e internacionais, será considerado a seguinte conclusão destacada na Tabela 13.

Observa-se que tanto no Brasil como em boa parte dos países analisados, muito ainda precisa ser melhorado no que se refere há determinações mais rígidas para os indicadores que tratam da QEE, juntamente com fiscalizações mais atuantes e aplicação de penalidades em caso de violações.

Tem-se também que os indicadores de distorção harmônica total e individual de corrente, não são tratados de forma relevante. Ou seja, poucas são as pesquisas e normas que apresentam limites e valores de referências para controle desses indicadores. Ou seja,

Tabela 11 – Tensão em regime permanente no Canadá conforme CSA CAN3 C235.

Tipo de Sistema	Tensão Mínima (99,9%)	Tensão Mínima (95%)	Tensão Nominal (VN)	Tensão Máxima (99,9%)	Tensão Máxima (95%)
Monofásico	106	110	120	125	127
	212	220	240	250	254
	424	440	480	500	508
	530	550	600	625	635
Trifásico a 4 Condutores	110/190	112/194	120/208	125/216	127/220
	220/380	224/194	240/416	250/432	254/440
	245/424	254/440	277/480	288/500	293/508
	306/530	318/550	347/600	360/625	367/635
Trifásico a 3 Condutores	212	220	240	250	254
	424	440	480	500	508
	530	550	600	625	635

Fonte: Oliveira, 2014, rt. 01/08.

Tabela 12 – Tensão em regime permanente, comparação entre alguns países.

País / Região	Tipo de Sistema	Faixa
França	Tensão Contratada	Tensão Nominal \pm 5%
	Tensão Fornecida	Tensão Nominal \pm 5%
África do Sul	<500 V	Tensão Nominal \pm 15%
	>500 V	Tensão Nominal \pm 10%
Peru	Todos os Níveis de Tensão	Tensão Nominal \pm 5,0%
	Redes secundárias Urbanas e/ou Rurais	Tensão Nominal \pm 7,5%
Argentina	—	—
Japão	—	—
China	220 V, Monofásico	-10% / + 7%
	20 kV, Trifásico	\pm 7,5 %
Austrália	—	—

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2014, rt. 01/08.

os Estados Unidos - USA, é o único país que determina limites para esses indicadores.

Assim pode-se concluir que o Brasil tem muito a melhorar no que diz respeito a determinação de limites e referências, com relação aos indicadores de QEE para o sistema de distribuição, principalmente para níveis de tensão abaixo de 1kV. Desta forma poderiam ser tomadas medidas corretivas através de multas e indenizações para os consumidores que não atenderem as exigências mínimas estipuladas nas normas e regulamentações.

Tabela 13 – Análise comparativa entre regulamentações nacionais e internacionais.

Indicador	PRODIT Módulo 8	Regulamentações Consultadas									
		USA	CAN	EU	FRA	ZAF	PER	ARG	JPN	CHN	AUS
Tensão em Regime Permanente	X		X	X	X	X	X			X	
Variação de Frequência	X			X	X	X	X			X	
THD Individual de Tensão	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
THD Total de Tensão	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
THD Individual de Corrente		X	X								
THD Total de Corrente		X									
Desequilíbrio de Tensão	X	X	X	X	X	X				X	X
Flutuação de Tensão	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Variação de Tensão de Curta Duração	X		X	X	X	X					
Fator de Potência	X	X			X		X	X			
Penalidades Quando da Violação	Parcial- mente		X			X	X	X			

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2014, rt.01/08.

5 Tópicos em Teoria Fuzzy

A lógica difusa, comumente conhecida como lógica fuzzy surgiu em 1965 com Lotfi Asker Zadeh, onde o mesmo propõe uma nova teoria matemática em substituição à lógica clássica. Enquanto a lógica clássica considera apenas as condições verdadeira ou falsa para uma proposição ou afirmação, a lógica fuzzy nós permite majorar as regiões de incerteza que compreende o intervalo [0,1].

Assim, uma resposta necessariamente não precisa ser 100% verdadeira ou 100% falsa, ela pode ser representada por um grau fuzzy que determine o quanto a sua resposta é verdadeira ou falsa. A partir desse novo conceito Zadeh abriu portas para que novas formas de pensar fossem desenvolvidas permitindo o desenvolvimento de novas pesquisas, em áreas diversas.

Desta forma, podemos dizer que lógica fuzzy associada à teoria do conjunto fuzzy, é uma modeladora de incertezas, imprecisões, e a inexatidão em diversos problemas do cotidiano.

A palavra "fuzzy", de origem inglesa, significa incerto, vago, impreciso, subjetivo, nebuloso, difuso, etc. Porém, como pudemos apurar até agora, nenhuma dessas traduções é tão fiel ao sentido amplo dado pela palavra fuzzy em inglês. Além disso, temos observado que quase todos os países têm usado a palavra fuzzy, sem traduzi-la para sua língua pátria, com algumas exceções como na França, que traduziu-o por nebule ou em alguns países latinos onde o termo empregado é borroso. De nossa parte, achamos por bem conservar o termo fuzzy e não o traduzimos para o português. ([BARROS; BASSANEZI, 2006](#), p. 12).

A incerteza ou imprecisão que a lógica fuzzy traz pode ser observada no exemplo da Figura 8. Nesta, observa-se certa distância em Km a ser percorrida entre dois pontos A e B, no qual um veículo automotivo parte do ponto A em direção ao ponto B. Assim, tem-se que à medida que o tempo passa o veículo se afasta do ponto A e se aproxima do ponto B, e a seguinte indagação pode ser feita: Como podemos mensurar a noção de distância do veículo em relação ao ponto A e B à medida que o tempo passa?

Analizando tal situação pelo conceito da lógica clássica, existem apenas duas opções de resposta para o problema, ou está perto ou está longe. Tal situação dá espaço ao seguinte questionamento: Será que não poderia ser dito que o carro está muito perto, muito longe, ou no meio do caminho? Pelo raciocínio humano sim, pois este consegue mensurar de forma subjetiva uma melhor noção de distância, porém, tal subjetividade é aqui denominada de incerteza ou imprecisão.

Assim, a lógica clássica não permite que incertezas sejam inseridas no problema a ser analisado. Para o exemplo aqui descrito, situações diferentes daquelas que sejam

verdadeira ou falsa, não seriam permitidas pela lógica clássica, nós restando apenas a opções perto ou longe como resposta. Para que se possam incluir no nosso sistema outras formas linguísticas de resposta comumente usadas pelo raciocínio humano, deve-se fazer uso da lógica fuzzy, já que nesta, as incertezas que são comumente encontradas em diversos problemas, podem ser inseridas.



Figura 8 – Trajeto percorrido entre dois pontos por um automóvel.

5.1 Teoria dos Conjuntos Fuzzy

Tem-se que na teoria dos conjuntos, um conjunto é uma coleção de objetos que podem ser tratados como uma entidade, sendo permitido a esses objetos, a aplicação de operações matemáticas e inclusive fazerem parte de um outro conjunto [Barros e Bassanezi \(2006\)](#).

Em um conjunto clássico tem-se que um objeto de um dado universo pertence ou não pertence a este conjunto. Portanto o critério que especifica quando um elemento do universo faz parte ou não do conjunto é rigoroso e sem ambiguidades. Porém, caso a propriedade que caracteriza os elementos do conjunto não estejam rigorosamente definida, ocorrerão situações de subjetividade com relação às avaliações.

Exemplo, um indivíduo tem certeza absoluta que um carro de um determinado modelo e determinada cor é muito bonito, porém podem existir pessoas que discordem, ou concordem parcialmente, ou seja, não achem bonito ou que achem só razoavelmente bonito. Assim, os critérios diferentes de bonito ou feio, geram ambiguidades e são subjetivos.

A teoria dos conjuntos fuzzy supera este problema atribuindo aos elementos do universo um grau de pertinência ao conjunto. Esse grau de pertinência é usualmente uma valor real entre zero e hum, onde zero indica que certamente o objeto não esta no conjunto e hum que certamente está no conjunto. Usando o exemplo descrito anteriormente através da Figura 8, tem-se que o critério de seleção para que um determinado grupo de elementos pertença a um conjunto proximo de B, será que, o carro esteja 60% perto do ponto B.

Desta forma, o ponto A pertence ao grau zero, ou seja, não pertence ao conjunto, já o ponto B pertence ao grau hum, e pertence totalmente ao conjunto. Assim, quanto

mais próximo de B o elemento do conjunto estiver, maior será a certeza que o automóvel está se aproximando do ponto de chegada B.

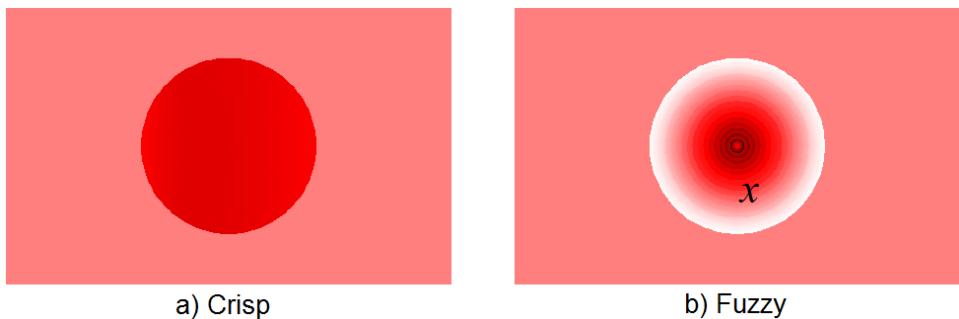


Figura 9 – Diagramas de Venn de um Conjunto Crisp e Fuzzy.

Podemos então afirmar que conjuntos difusos são graduais e mais suaves que os conjuntos clássicos, também denominados de conjuntos crisp. A Figura 9 apresenta um conjunto crisp usando a simbologia dos diagramas de Venn e um conjunto fuzzy usando uma analogia a este tipo de diagramas.

5.1.1 Representação de Conjuntos Fuzzy

Apesar da teoria dos conjuntos clássico, ter sido consolidada como a base geral da matemática, a lógica fuzzy vem ganhando espaço desde a última década. Isso vem ocorrendo devido ao fato da lógica difusa ser uma nova forma de representar e manipular informações inexatas com o propósito de tomar decisões, através do conceito da teoria dos conjuntos fuzzy, de suas funções de pertinência e suas aplicações algébricas, e também devido ao fato desta ser considerada uma extensão à lógica clássica.

Na literatura, o termo "lógica fuzzy" é utilizado de duas formas: a primeira para representar e manipular informações inexatas com o propósito de tomar decisões, lançando mão da teoria dos conjuntos fuzzy, de suas funções de pertinência e suas álgebras em geral. A segunda refere-se à extensão da lógica clássica. ([BARROS; BASSANEZI, 2006, p. 77](#)).

A pertinência de um elemento z de um universo U a um subconjunto A pode ser uma identificação de todos os elementos de U que estão em A . Sem perda de generalidade poderia-se escolher o número 1 para esta identificação e para preencher o restantes elementos usar o 0 como indicação. Assim, de acordo com [Terano et al. \(1994\)](#) todos os elementos de U teriam a identificação "1 para indicar que pertence a A e 0 para indicar que não pertence a A ". A função gerada é denominada de função característica

do conjunto A e normalmente é denotada por χ_A . Assim sendo, a função $\chi_A: U \rightarrow U$ é definida por:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \in A \\ 1, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (19)$$

Considerando o conjunto de pessoas maiores de idade, tendo que pela lei brasileira atual para que uma pessoa seja considerada responsável pelos seus atos, esta deve ter no mínimo 18 anos de idade. Assim pode-se exemplificar o grupo de pessoas maiores de idade como sendo:

$$\chi_{Maioridade}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \geq 18 \text{ anos} \\ 1, & \text{se } x < 18 \text{ anos} \end{cases} \quad (20)$$

A função característica de conjuntos clássicos "crisp", sobre conjuntos universais munidos de uma ordem total podem ser representados por um gráfico, como por exemplo $\chi_{Maioridade}$ representado pelo gráfico da Figura 10.

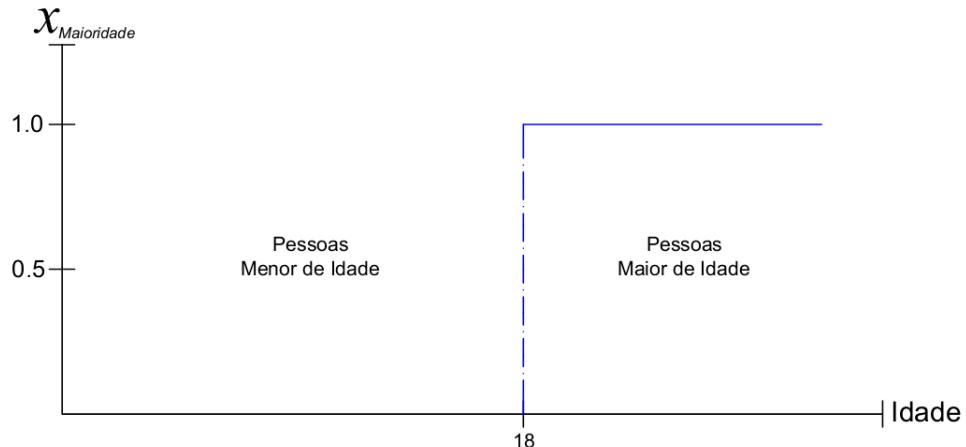


Figura 10 – Função de pertinência clássica para pessoas maiores de idade.

Um conjunto fuzzy em vez de considerar de forma severa se um elemento pertence ou não pertence ao conjunto, lhe atribuí um grau de pertinência, tipicamente um valor que majora entre o intervalo zero e hum. Assim ocorre uma indicação de quanto esse elemento pertence ou não pertence ao conjunto. Pode-se então concluir que um conjunto fuzzy é determinado pelos graus de pertinência associados a cada objeto universo.

Deve-se representar o objeto do universo através de uma função de pertinência que estenda a representação de conjuntos clássicos via funções características, sendo que universo discurso de conjuntos fuzzy são conjuntos clássicos, e comumente são sub-

conjuntos de \mathbb{R} com unidades de medidas determinadas (idade, percentagem, metros, temperatura, etc).

Tem-se que o conjunto clássico de pessoas maiores de idade poderia ser descrito de maneira fuzzy, onde outros critérios poderiam ser considerados para determinar se uma pessoa é responsável ou não por seus atos, como por exemplo: uma avaliação psicológica do indivíduo a partir de seus atos para verificar o entendimento deste com relação as suas responsabilidades, direitos e deveres perante a sociedade nos dias atuais.

Partindo de tal pressuposto, pode-se dizer que uma pessoa que tenha idade majorando entre 15 a 18 anos penal possa ser considerada ou não maior de idade, dependendo de tal avaliação. A partir de tal critério pode-se considerar uma função característica que represente essa situação, aqui descrita por uma função de pertinência fuzzy fictícia, indicada pela Figura 11.

Desta forma as pessoas menores de 15 anos não podem ser consideradas maiores de idade, as pessoas maiores ou com 18 anos não podem ser consideradas menores de idade. Já as pessoas que majoram entre $15 \leq x < 18$ anos podem ser consideradas menores ou maiores de idade a depender do seu comportamento e da sua avaliação psicológica.

$$\chi_{Maioridade}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \geq 18 \text{ anos} \\ \frac{x}{3} - 5, & \text{se } 15 \leq x < 18 \text{ anos} \\ 0, & \text{se } x < 15 \text{ anos} \end{cases} \quad (21)$$

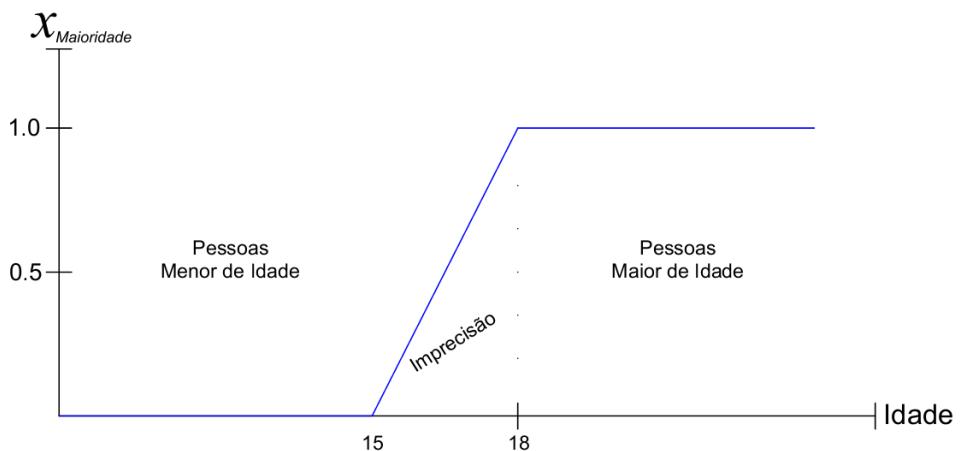


Figura 11 – Função de pertinência fuzzy para pessoas maiores de idade.

5.1.2 Representação de Conjuntos Fuzzy Através de Formas Finitas

Representar computacionalmente uma função de pertinência de um conjunto fuzzy de universo finito é basicamente simples, bastaria usar um vetor onde cada posição represente um elemento do universo. Porém, se o universo for infinito, para

representar-se computacionalmente uma função de pertinência, faz-se necessário que a mesma tenha uma forma finita.

Assim pode-se fazer uso de expressões matemáticas que representem de forma finita um conjunto universo infinito. Assim uma função de pertinência de um conjunto fuzzy pode ser representada por uma ou mais expressões matemáticas com intervalos definidos dentro do conjunto universo, desde que a resposta desta função de pertinência sejam valores entre [0,1].

Partindo da descrição acima, tem-se que dentro de um universo de números reais \mathbb{R} , pode-se usar funções com formas: trapezoidais, triangulares, senoidais, dentre outras. Considerando como exemplo uma função triangular, onde $a, b, e c \in \mathbb{R}$, com $a < b < c$, onde a função de pertinência $\mu_t: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$, tem-se:

$$\mu_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{5}x - 14, & \text{se } 70 \leq x \leq 75 \\ -\frac{1}{10}x + \frac{17}{2}, & \text{se } 75 \leq x \leq 85 \\ 0, & \text{qualquer outro } x \end{cases} \quad (22)$$

Na função de pertinência de forma triangular descrita pela equação (22), tem-se que os intervalos $a, b, e c$ equivalem respectivamente a 70, 75, 85, sendo que esses valores podem ser representado por uma unidade qualquer, como por exemplo: km/h, segundos, metros, etc. Assim pode-se representar graficamente essa função de pertinência da seguinte forma, ver Figura 12.

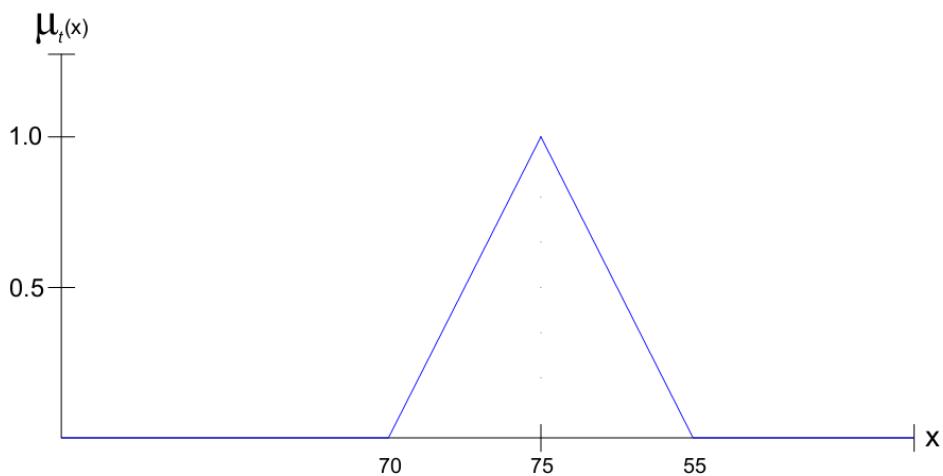


Figura 12 – Função de pertinência de forma triangular.

A Figura 13 apresenta diferentes formas de representações de conjuntos fuzzy, ou seja, formas trapezoidais, semi-trapezoidais, triangulares. Outras formas de representação seriam utilizando funções senoidais.

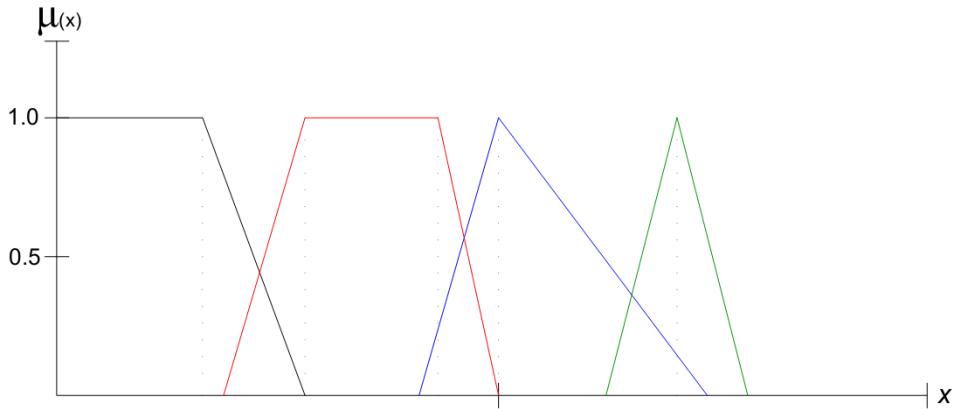


Figura 13 – Função de pertinência com diversas formas.

5.1.3 Operações sob Conjuntos Fuzzy

De acordo com [Terano et al. \(1994\)](#), todo conjunto clássico A num universo U pode ser visto como um conjunto fuzzy A num universo U, no qual a função de pertinência é $\mu_A(x) = 1$ para todo $x \in A$ e $\mu_A(x) = 0$ para todo $x \notin A$.

Na teoria dos conjuntos convencionais, os conceitos básicos são as noções sobre: elemento, conjunto, conjunto universo e função de pertinência, sendo que partir desses conceitos são introduzidas algumas operações, relações, e a própria noção de função e relação.

As operações básicas mais conhecidas são: união, interseção, e complemento. Assim, pode-se definir essas operações através da lógica fuzzy, já que todo conjunto clássico "crisp" é um conjunto fuzzy, e que a teoria dos conjuntos fuzzy tem como objetivo ser uma extensão da teoria dos conjuntos crisp.

Sejam A e B, dois conjuntos fuzzy quaisquer sobre um universo U com funções de pertinência μ_A e μ_B , para todo $x \in U$:

- União: $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
- Interseção: $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
- Complemento: $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

Na Figura 14 tem-se de forma genérica como é o comportamento das operações de união, interseção e complemento entre conjuntos fuzzy.

Analogamente aos conjuntos clássicos, os conjuntos fuzzy devem satisfazer a diversas propriedades algébricas, tais como: comutatividade, associatividade, idempotência, elemento neutro, distributividade, involução, leis de Morgan.

Apesar de satisfazer as diversas propriedades algébricas descritas acima, os conjuntos fuzzy não satisfazem algumas propriedades importantes dos conjuntos clássicos, tais como a lei do terceiro excluído e a lei da não contradição, $A \cup \bar{A} = U$ e $A \cap \bar{A} = \emptyset$. Ou seja, não são válidas para todo conjunto essencialmente fuzzy.

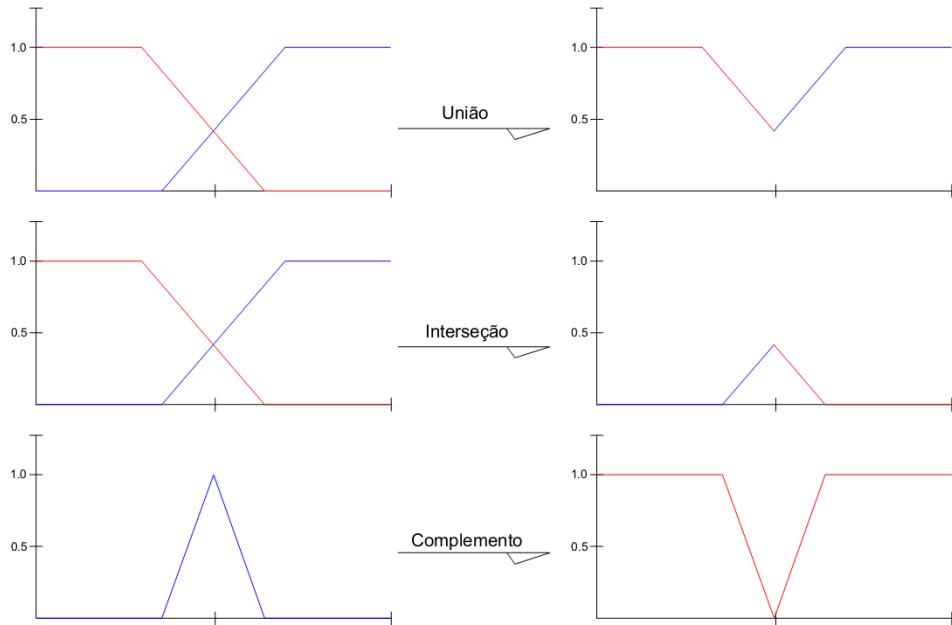


Figura 14 – Operações básicas – união, interseção e complemento de um conjunto fuzzy.

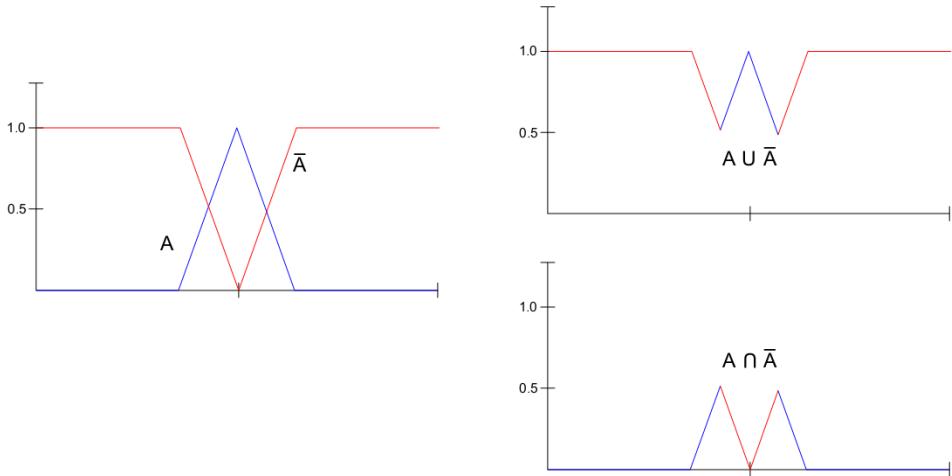


Figura 15 – Conjuntos fuzzy essencialmente não satisfazem a lei do terceiro excluído.

Existem outras operações que podem ser aplicadas sobre os conjuntos fuzzy, tais como: inclusão, alfa-cortes, e outras funções. Para melhor entender as diversas operações e as propriedades que são aplicadas aos conjuntos fuzzy, consultar os autores: Barros e Bassanezi (2006); Chaturvedi (2008); Klement et al. (2000); Palmeira (2013); Terano et al. (1994).

5.2 Noções de Lógica Fuzzy

5.2.1 Lógica Proposicional Clássica – Conectivos Básicos

A lógica proposicional é o mais elementar exemplo de lógica simbólica. Sua semântica tem como base os princípios do terceiro excluído e da não contradição, sendo, assim, a primeira referência de lógica clássica. A linguagem da lógica proposicional é basicamente formada pelas proposições, conectivos, e não possui quantificadores.

Proposições: Também chamadas de fórmulas atômicas, são os elementos indivisíveis da lógica, e as representamos pelas letras minúsculas, geralmente a partir da letra p.

p, q, r, s, ...

Quando precisam-se usar muitas fórmulas atômicas, e as letras tornam-se insuficientes, costuma-se usar a letra p indexada por um número natural.

p_0, p_1, p_3, \dots

Delimitadores: São os parênteses, que evitam ambiguidades na linguagem.

(parêntese esquerdo
)parêntese direito

Conectivos Lógicos: São os símbolos que nos permitem construir novas fórmulas a partir de outras.

¬ negação (não)
∧ conjunção (e)
∨ disjunção (ou)
→ implicação (se ... então)
↔ equivalência (se, e somente se)

Tais conectivos são tipicamente usados em sentenças do tipo: "Se a está em A e b está em B, então c está em C ou d não está em D". Assim o valor lógico de uma determinada sentença, formada a partir de duas ou mais proposições, é obtido por meio de composições das tabelas verdades dos conectivos presentes nesta sentença. [Barros e Bassanezi \(2006, p. 79\)](#). Ou seja, considerando a sentença: "a está em A e b está em B", é verdadeiro somente se a verdadeiramente pertencer a A e b pertencer a B. Assim, o

valor lógico para essa sentença é uma consequência da tabela verdade clássica para o conectivo "e".

Na lógica clássica, as sentenças verdadeiras tem valor lógico 1, já as sentenças lógicas falsas tem valor lógico 0. Assim não existe outra possibilidade distinta destas. Considerando duas proposições p e q , a seguir tem-se as tabelas verdades para os conectivos de conjunção, disjunção, negação e implicação:

(a) Conectivo \wedge			(b) Conectivo \wedge		
p	q	$p \wedge q$	p	q	$p \vee q$
1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0

(c) Conectivo \neg			(d) Conectivo \rightarrow		
p	$\neg p$		p	q	$p \rightarrow q$
1	0		1	1	1
0	1		1	0	0

Tabela 14 – Tabelas verdades crisp - conjunção, disjunção, negação, e implicação

Cada conectivo descrito acima são operadores matemáticos binários, com exceção da negação que é considerada uma operação unária. [Barros e Bassanezi \(2006, p. 80-81\)](#). Analisando-se cuidadosamente a tabela verdade de conjunção (ver Tabela 14a), as operações entre os valores lógicos de p e q , sempre terão como resultado o menor valor entre eles, ou seja, o mínimo de p e q . Já na tabela verdade de disjunção (ver Tabela 14b) as operações entre os valores lógicos de p e q , sempre terão como resultado o maior valor entre eles, ou seja, o máximo de p e q .

- Conectivo **e**: \wedge

$$\begin{aligned} \wedge: \{0, 1\} \times \{0, 1\} &\rightarrow \{0, 1\} \\ (p, q) \longmapsto \wedge(p, q) &= p \wedge q = \min\{p, q\} \end{aligned}$$

- Conectivo **ou**: \vee

$$\begin{aligned} \vee: \{0, 1\} \times \{0, 1\} &\rightarrow \{0, 1\} \\ (p, q) \longmapsto \vee(p, q) &= p \vee q = \max\{p, q\} \end{aligned}$$

- Conectivo **negação**: \neg

$$\neg: \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$$

$$p \longmapsto \neg p,$$

onde, $\neg 1 = 0$ e $\neg 0 = 1$. Notar que $\neg p = 1 - p$.

- Conectivo **implicação**: \rightarrow

$$\rightarrow: \{0, 1\} \times \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$$

$$(p, q) \longmapsto \rightarrow (p, q) = (p \rightarrow q)$$

5.2.2 Lógica Fuzzy - Conectivos Básicos

Analogamente à lógica clássica, a lógica fuzzy também possui proposições, delimitadores e conectivos lógicos. Porém, os conectivos fuzzy são uma extensão dos conectivos crisp, ou seja, são baseados em normas e conormas triangulares, que valoram entre 0 e 1.

[Barros e Bassanezi \(2006\)](#), [Palmeira \(2013\)](#) e [Klement et al. \(2000\)](#), afirmam que as normas triangulares denominadas de t-normas e t-conormas, para serem válidas, devem satisfazer as seguintes propriedades ou axiomas: elemento neutro, comutatividade, associatividade, monotonicidade, e definem as normas triangulares, da seguinte forma:

- Operadores **t-normas**:

Seja L um reticulado limitado, uma operação binária $T: L \times L \rightarrow L$ é uma t-norma se, para todo $x, y, z \in L$, satisfaz as propriedades:

$$(T1) T(x, y) = T(y, x) \text{ (Comutatividade)}$$

$$(T2) T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z) \text{ (Associatividade)}$$

$$(T3) \text{ Se } x \leq x' \text{ e } y \leq y' \text{ então } T(x, y) \leq T(x', y') \text{ (Monotonicidade)}$$

$$(T4) T(x, 1) = x - 1 \text{ (Identidade)}$$

Partindo deste conceito, tem-se que para:

$$T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

$$T(x, y) = x \Delta y$$

Tem-se aqui alguns exemplos de t-normas:

- Gödel : $T_G(x, y) = \min\{x, y\}$

- Produto : $T_P(x, y) = xy$

- Lukasiewicz : $T_L(x, y) = \max\{0, x + y - 1\}$
- Fraca : $T_W(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } \max(x, y) = 1 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- Hamacher : Seja $\gamma \geq 0$, $T_{H,\gamma}(x, y) = \frac{xy}{\gamma + (1-\gamma)(x+y-xy)}$

É importante observar que as t-normas são uma extensão do operador de conjunção \wedge , que modela o conectivo **e**, que equivale a operação crisp de intersecção.

- Operadores **t-conormas**:

Seja L um reticulado limitado, uma operação binária $S: L \times L \rightarrow L$ é uma t-conorma se, para todo $x, y, z \in L$, satisfaz as propriedades:

- (S1) $S(x, y) = S(y, x)$ (Comutatividade)
- (S2) $S(x, S(y, z)) = S(S(x, y), z)$ (Associatividade)
- (S3) Se $x \leq x'$ e $y \leq y'$ então $S(x, y) \leq S(x', y')$ (Monotonicidade)
- (S4) $S(x, 1) = x - 1$ (Identidade)

Partindo deste conceito, tem-se que para:

$$\begin{aligned} S: [0, 1] \times [0, 1] &\rightarrow [0, 1] \\ S(x, y) &= x \vee y \end{aligned}$$

Apresentamos alguns exemplos de t-normas:

- Gödel : $S_G(x, y) = \max\{x, y\}$
- Produto : $S_P(x, y) = x + y - xy$
- Lukasiewicz : $S_L(x, y) = \min\{x + y, 1\}$
- Fraca : $S_W(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } \min(x, y) = 0 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- Hamacher : $S_{H,\gamma}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } \gamma = 0 \text{ e } x = y = 1 \\ \frac{x+y-xy-(1-\gamma)xy}{1-(1-\gamma)xy}, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

É importante observar que as t-conormas são uma extensão do operador de disjunção \vee , que modela o conectivo **ou**, que equivale a operação crisp de união.

- Operadores **negação**:

$$N: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

É uma negação se satisfazer as condições de fronteiras, involução, e monotonicidade. Exemplos de negações que reproduzem a tabela verdade:

- $N_1(x) = 1 - x$
- $N_2(x) = \frac{1-x}{1+x}$

De acordo com [Barros e Bassanezi \(2006\)](#), as operações $\Delta = \wedge$, $\nabla = \vee$, $N(x) = 1 - x$, satisfazem a lei de Morgan, isto é, para todo par (x, y) de $[0, 1] \times [0, 1]$, valem:

$$\begin{aligned} N(x \wedge y) &= N(x) \vee N(y) \\ N(x \vee y) &= N(x) \wedge N(y) \end{aligned}$$

A partir dos conceitos descritos acima, dizem-se que uma t-norma e uma t-conorma são **N-duais** em relação a uma negação se satisfazem a uma das duas leis de Morgan. Assim, as t-normas e t-conormas descritas anteriormente (Gödel, Produto, Lukasiewics, Fraca, Hamacher), são N-duais respectivamente.

- Operadores **implicação**:

$$\rightarrow: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

É uma implicação se satisfazer a seguintes condições: reproduzir a tabela verdade clássica, for decrescente na primeira variável, for crescente na segunda variável.

[Barros e Bassanezi \(2006\)](#), afirma que a implicação fuzzy consiste de todas as aplicações do quadrado $[0, 1] \times [0, 1]$ em $[0, 1]$, no qual as restrições ao vértice coincide com os valores da implicação clássica (crisp), que sejam decrescentes com relação as abcissas e crescentes com relação às ordenadas.

Na lógica clássica a implicação pode ser representada pelas seguintes formulações:

- $(p \rightarrow q) = \neg(p) \vee q$
- $(p \rightarrow q) = \neg(p) \vee (p \wedge q)$
- $(p \rightarrow q) = \max\{x \in \{0, 1\}: p \wedge x \leq q\}$

Para o caso fuzzy, tais formulações não produzem as mesmas implicações clássicas, assim, as implicações na lógica difusa são distintas destas, sendo denominadas de: S-implicação, Q-implicação, e R-implicação, e possuem a seguinte forma:

- Operador **S-implicação**: $(x \rightarrow y) = N(x) \triangleright y$
- Operador **Q-implicação**: $(x \rightarrow y) = N(x) \triangleright (x \Delta y)$
- Operador **R-implicação**: $(x \rightarrow y) = \sup\{z \in [0, 1] : x \Delta z \leq y\}$

Descreve-se abaixo alguns exemplos de implicações fuzzy:

- Gödel : $(x \rightarrow y) = g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq y \\ y, & \text{se } x > y \end{cases}$
- Goguen : $(x \rightarrow y) = g_n(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq y \\ \frac{y}{x}, & \text{se } x > y \end{cases}$
- Lukasiewicz : $(x \rightarrow y) = l(x, y) = \min\{(1 - x + y), 1\}$
- Zadeh : $(x \rightarrow y) = z(x, y) = \max\{(1 - x), \min(x, y)\}$

Observar-se que a implicação de Zadeh é uma Q-implicação, já que:

$$(x \rightarrow y) = (1 - x) \vee (x \wedge y) = \eta(x) \vee (x \wedge y)$$

Existem diversas outras t-normas, t-conormas, negações e implicações fuzzy, tais como de Schweizer & Sklar, Frank, Yager, Dubois & Prade, Dombi, Weber, Yu, dentre outros. Ver [Barros e Bassanezi \(2006\)](#); [Chaturvedi \(2008\)](#); [Klement et al. \(2000\)](#); [Palmeira \(2013\)](#).

5.2.3 Inferência - Modus Ponens Generalizado

Pode-se dizer que a inferência é um processo no qual se obtém um resposta ou novas informações, a partir de um conhecimento prévio.

Podemos dizer que "inferência" é o processo de se deduzir "obter" novas informações usando um conhecimento prévio... representação do conhecimento e raciocínio é uma área da inteligência artificial que tem por foco estudar como o conhecimento pode ser representado simbolicamente, afim de permitir manipula-lo de forma automática. portanto, a representação de conhecimento é uma ferramenta importante no processo de inferência e raciocínio automático. ([BEDREGAL, 2013](#), p. 45)

Assim, regras do tipo: Se...Então..., são as formas mais comuns de se representar o conhecimento, onde os sistemas baseados neste tipo de representação são chamados sistemas baseados em regras. Uma regra deste tipo é interpretada como uma "implicação" e consiste de um antecedente "premissas" e de um consequente "conclusão".

Se uma regra que diz: Se x é A então y é B , tem-se total convicção que x é A , e a partir disso pode-se concluir que y é B . Desta forma, o processo dedutivo deste raciocínio "inferência", é baseado em algumas regras.

De acordo com [Bedregal \(2013, 46\)](#), os métodos de inferência mais conhecidos, o Modus Ponens e o Modus Tollens têm sua contrapartida em lógica com implicações, como a lógica proposicional clássica.

Ao inserir graus de pertinência para modelar um sistema através da lógica fuzzy, usando conectivos lógicos como: t-normas, t-conormas, negações, implicações, e uma composição de relações, chama-se a inferência de inferência fuzzy. De acordo [Barros e Bassanezi \(2006\)](#) esta inferência também é denominada de Modus Ponens Generalizado.

"Se a temperatura é alta e a pressão é alta então o fluxo de combustível deve ser pequeno" e sabemos por exemplo que a temperatura está alta com um grau de pertinência de 0.8 e que a pressão está alta com um grau de pertinência de 0.3, então devemos concluir que um grau de pertinência para refletir um grau de pertinência ao conjunto fuzzy dos fluxos de combustíveis pequenos. Isto em geral vai envolver, conectivos lógicos como t-normas e implicações e uma composição de relações. As vezes também pode acontecer que não tenhamos um grau de pertinência para um premissa, mas para algo próximo de ela, como por exemplo, sabemos que o grau de pertinência é muito alto com grau de pertinência 0.9, e nesse caso poderíamos deduzir o grau de pertinência ao conjunto de fluxo de combustível muito pequeno, por exemplo. Esta forma de inferência chamamos de Modus Ponens Generalizado ([BEDREGAL, 2013, p. 45](#))

5.3 Controladores Fuzzy

Os controladores fuzzy possuem uma vasta gama de aplicabilidade, já que são um mecanismo baseado no raciocínio aproximado para expressar ambiguidades, incertezas, e subjetividades presentes no raciocínio humano.

5.3.1 Modificadores Linguísticos e Variáveis Linguísticas Fuzzy

Modificadores linguísticos fuzzy, são comumente usados para alterar atributos, ou seja, modelar advérbios. De acordo com [Barros e Bassanezi \(2006, p. 100\)](#), quando combinado a teoria dos conjuntos fuzzy com o modus ponens generalizado, tem-se um auxílio na produção de subconjuntos fuzzy que representam atributos de variáveis linguísticas.

Já a variável linguística é formada por um conjunto de conjuntos fuzzy sob o mesmo universo, no qual denomina-se de termos linguísticos, onde o sistema de regras fuzzy é baseado também em termos linguísticos e não numéricos. Assim, os parâmetros de entrada são associados às variáveis linguísticas que são utilizadas na definição de regras para o processamento de variáveis de saída, que também são representadas através de variáveis linguísticas.

Como exemplo de modificadores linguísticos fuzzy, tem-se um conjunto de jovens, onde a partir do termo primário "jovem", podem-se definir novos termos fuzzy, como por exemplo: mais jovem, extremamente jovem, pouco jovem, dentre outros. (ver Figura 16).

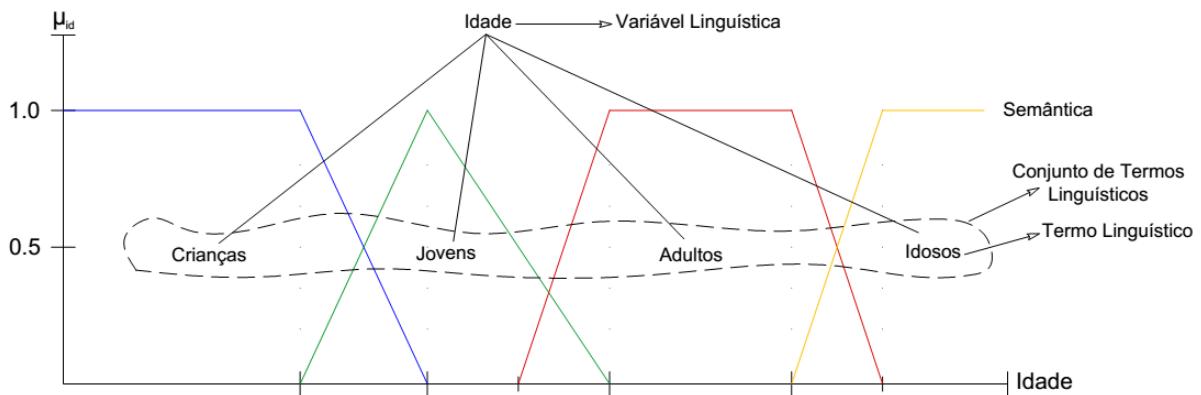


Figura 16 – Variáveis linguísticas para o conceito de idade.

5.3.2 Arquitetura dos Controladores Fuzzy

A arquitetura básica dos controladores fuzzy é composta pelos seguintes módulos: fuzzificação (MF), tomada de decisão, e defuzzificação (MD). Onde o módulo de tomada de decisão (MTD) é dividido em dois subsistemas, são eles: sistema de base de regras (SBR) e sistema de inferência (SI).

Como já foi dito anteriormente, os controladores fuzzy modelam sistemas imprecisos ou que possuam certo grau de incertezas, que trabalham com variáveis linguísticas com graus de pertinência que valoram entre zero e um. Partindo deste preceito, o módulo de fuzzificação tem como função, converter valorações clássicas (crisp) em termos linguísticos com valoração fuzzy, assim converte-se um número crisp em funções de pertinência das variáveis linguísticas de entrada.

Logo após, as pertinências fuzzy são inseridas no módulo de tomada de decisão, que é o controlador lógico do sistema. Após a inserção das pertinências fuzzy no MTD, os termos linguísticos "antecedentes" são inseridos no sistema de base de regras.

O SBR aplica o Modus Ponens Generalizado sobre as regras ativadas, fornecendo desta forma os resultados também linguísticos "consequentes" que são inserido no sistema de inferência. Assim o SI, modela matematicamente os graus de pertinência fuzzy dos consequentes que resultam das regras ativadas no SBR, e por fim, o MTD fornece na saída do módulo um grau de pertinência resultante. Essas pertinências fuzzy precisam ser defuzzificadas, ou seja convertidas em valores clássicos para que possam ter aplicações práticas nos sistemas clássicos existentes. A Figura 17, demonstra a arquitetura básica de um controlador fuzzy.

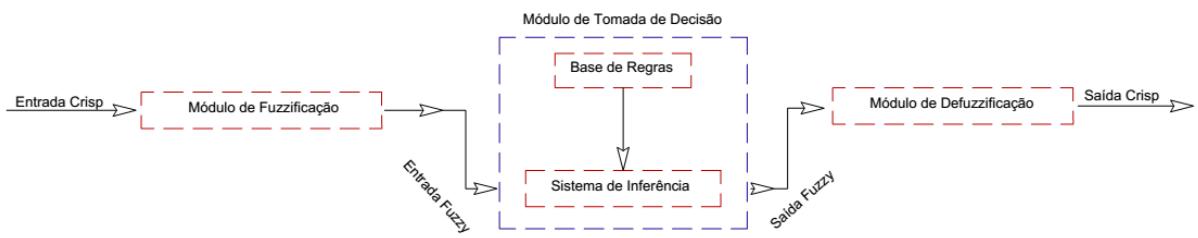


Figura 17 – Arquitetura do controlador Fuzzy.

Adaptado: Barros, 2006

Considerando como exemplo um controlador fuzzy, que tenha como função avaliar se um indivíduo pode ser considerado apto ou não apto a responder criminalmente pelos seus atos perante a sociedade. Verifica-se que esse é um tema bastante discutido atualmente principalmente pelos níveis de incertezas que estes geram na sociedade e até mesmo entre alguns especialistas da área criminal, no que se refere a considerar se um adolescente deve ou não deve responder criminalmente pelos seus atos. Gostaria de salientar que o exemplo aqui apresentado é apenas uma ilustração não real no qual os conceitos de controladores fuzzy podem ser aplicados.

5.3.3 Módulo de Fuzzificação

O módulo de fuzzificação é responsável por converter um valor crisp em funções de pertinências fuzzy do universo real, sendo que, as valorações fuzzy são representadas por estados linguísticos com graus de pertinências no intervalo [0,1]. Assim um mesmo estado linguístico pode ter mais de um grau de pertinência, seja ele distinto ou não.

É importante salientar que o módulo de fuzzificação só é necessário quando os dados de entrada inseridos no sistema são variáveis clássicas, assim sendo, em casos onde os dados de entrada são funções de pertinência fuzzy, pode-se inseri-las diretamente no MTD, minimizando o tempo de processamento do sistema e evitando perdas de informações.

Pode-se citar como exemplo os fuzzificadores da Figura 18, onde o primeiro

fuzzificador converte a variável crisp (idade*) em variáveis linguísticas com graus de pertinências fuzzy que deverão possuir uma das seguintes condições: criança, criança/adolescente, adolescente, adolescente/adulto, e adulto. O segundo fuzzificador converte a variável crisp (avaliação criminal**)em variáveis linguísticas com graus de pertinências fuzzy que deverão possuir uma das seguintes condições: infrações leves, infrações leves/infrações graves, infrações graves, infrações graves/infrações gravíssimas, e infrações gravíssimas.

Observar que a variável clássica idade* aqui descrita, pode ser obtida através de um modelo matemático que considere a idade cronológica com um determinado peso relacionado a idade mental do indivíduo. Já a variável clássica avaliação criminal**, pode ser obtida através de um modelo matemático que considere a relação entre os crimes cometidos com a gravidade destes de acordo o código penal brasileiro atual, onde pode-se ainda acrescentar a essa avaliação um peso para o número de reincidência versus a gravidade de cada infração.

Partindo do exemplo da Figura 18, caso um indivíduo seja avaliado com idade* igual a 16 anos e 7 meses. Observando as funções de pertinências da fuzzificação, têm-se duas valorações fuzzy para essa idade*. A primeira seria adulto com grau aproximadamente igual a 0,3 e a segunda seria adolescente com grau de aproximadamente 0,8.

Considerando que a avaliação criminal** deste mesmo indivíduo foi pontuada como sendo 38. Têm-se também, após o processo de fuzzificação duas valorações fuzzy para este quesito. Sendo a primeira: condição infrações leves com grau aproximado de 0,4 e a segunda infrações graves com grau de aproximadamente 0,7.

A partir do exemplo acima descrito considerando a Figura 18, tem-se os seguintes estados linguísticos fuzzy.

- Para Idade*:
 - Adulto com grau 0,3
 - Adolescente com grau 0,8
- Para Avaliação criminal**:
 - Infrações leves com grau 0,4
 - Infrações graves com grau 0,7

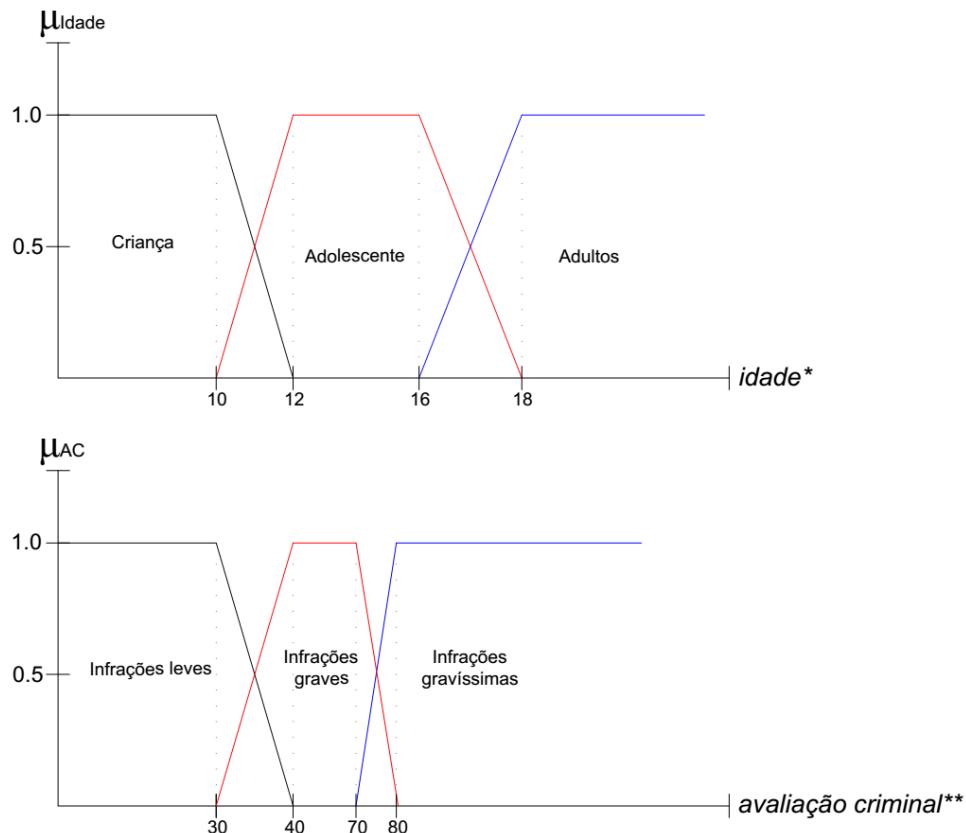


Figura 18 – Fuzzificadores para um possível exemplo de avaliação com relação a maioridade penal.

5.3.4 Módulo de Tomada de Decisão

5.3.4.1 Sistema Baseado em Regras Fuzzy

O sistema baseado em regras fuzzy, é um conjunto de regras linguísticas pré determinado por um especialista, que tem como função fazer a modelagem linguística. Nesse sistema de regras, os parâmetros de entrada "antecedente" são associados as variáveis linguísticas, que são utilizados na definição de regras de processamento de variáveis de saída "consequente", as quais também são representadas por variáveis linguísticas.

Observando o exemplo descrito para Figura 18 e considerando os valores defuzzificados na base de regras exemplificada pela Figura 19, obtêm-se as seguintes respostas.

- Regras Ativadas:
 - R_3 : Adulto e Infrações leves - Maior
 - R_6 : Adulto e Infrações graves - Maior
 - R_2 : Adolescente e Infrações leves - Menor

- R_5 : Adolescente e Infrações graves - Menor*

Para o exemplo aqui descrito 4 regras foram ativadas para o sistema de controle.

Se	Idade*	e	Aval. Criminal**	Então	Idade Penal
R_1	Criança		Inf. leves		Menor
R_2	Adolescente		Inf. leves		Menor
R_3	Adulto		Inf. leves		Maior
R_4	Criança		Inf. graves		Menor*
R_5	Adolescente		Inf. graves		Menor*
R_6	Adulto		Inf. graves		Maior
R_7	Criança		Inf. gravíssimas		Menor*
R_8	Adolescente		Inf. gravíssimas		Maior
R_9	Adulto		Inf. gravíssimas		Maior

Menor* - punições adequadas à idade e acompanhamento psicológico constante. Encarceramento separado de pessoas adultas, sem direito a ter a ficha criminal limpa após cumprimento da pena.

Figura 19 – Base de regras para um possível exemplo de avaliação com relação a maioridade penal.

5.3.4.2 Sistema de Inferência

O sistema de inferência é responsável pela modelagem matemática das regras ativadas pelo SBR. Desta forma o tipo de inferência fuzzy utilizada no controlador pode influenciar de forma direta nos resultados que se pretende obter.

Normalmente o sistema de inferência mais utilizado nos trabalhos que são desenvolvidos é a inferência de Mamdani Clássico, que faz uso da t-norma do mínimo e da t-conorma do máximo. Porém existem muitos outros tipos de inferências que podem ser utilizadas em substituição a Mamdani Clássico, como por exemplo (Larsen, TSK, Tsukamoto).

Para determinar o tipo de inferência a ser usado em um modelo, é muito importante conhecer o sistema modelado de forma que se tenha uma prévia do que se pretende obter como resposta. A partir desse preceito, pode-se verificar os comportamentos de diversas inferências e verificar as que melhores se aplicam à situação. É importante salientar que pode-se desenvolver novos sistemas de inferência ao aplicar o método de Morgan, utilizando a negação forte de Zadeh em uma t-norma qualquer, de forma a obter uma t-conorma N-dual.

Assim, diversas t-normas podem ser utilizadas para se obter uma t-conorma N-dual e assim determinar um novo sistema de inferência em substituição ao sistema de inferência de Mamdani Clássico, são elas: t-norma produto, t-norma drástica, t-norma

de Lukasiewicz, t-norma de nilpotente, t-norma de Hamacher, t-norma de Schweizer & Sklar (1,2,3,4), t-norma de Frank, t-norma de Yager, t-norma de Dubois e Prade, t-norma de Weber, t-norma de Yu, dentre diversas outras. Esses novos sistema de inferência serão denominados aqui de Mamdani Modificado, para diferenciar do método original de Mamdani.

Dando continuidade ao exemplo descrito na Figura 18 e 19, aplicando a inferência de Mamdani Clássico tem-se:

- t-norma do mínimo e t-conorma do máximo:

- $R_3: \min[0, 3; 0, 4] = 0, 3$
- $R_6: \min[0, 3; 0, 7] = 0, 3$
- $R_2: \min[0, 8; 0, 4] = 0, 4$
- $R_5: \min[0, 8; 0, 7] = 0, 7$
- $R_3R_6R_2R_5: \max[0, 3; 0, 3; 0, 4; 0, 7] = 0, 7$

Utilizando a inferência de Mamdani Modificado pela t-norma do produto e sua t-conorma N-dual, também denominada de inferência de Larsen, obtêm-se os seguintes resultados:

- t-norma do produto e t-conorma N-dual do produto:

- $R_3: T_P[0, 3; 0, 4] = 0, 12$
- $R_6: T_P[0, 3; 0, 7] = 0, 21$
- $R_2: T_P[0, 8; 0, 4] = 0, 32$
- $R_5: T_P[0, 8; 0, 7] = 0, 56$
- $R_3R_6R_2R_5: S_P[0, 12; 0, 21; 0, 32; 0, 56] = 0, 79$

Após aplicada a modelagem matemática pelo SI, os dados de saída são inseridos no módulo de defuzzificação.

5.3.5 Módulo de Defuzzificação

Módulo de defuzzificação depende basicamente do gráfico de saída modelado e do método de defuzzificação escolhido para ser aplicado sobre a região do gráfico de saída que foi ativada pelo SI. A partir destes, converte-se as funções de pertinências fuzzy que saí do MTD em valorações crisp de saída.

O gráfico de saída é desenvolvido com base nos consequentes "resultados" da base de regras, e é extremamente importante que o gráfico de saída também seja

determinado por especialistas, já que o mesmo deve ter um conhecimento prévio do que se pretende obter como resposta.

No exemplo aqui descrito, serão utilizados como funções de saída o gráfico descrito na Figura 20. Observar que a função de saída foi desenvolvida com base nos consequentes da base de regras, onde tem-se um valor percentual da idade penal a ser considerada para o indivíduo. Assim, foi determinado neste exemplo uma idade penal variando de 0 a 480 meses, ou 0 a 40 anos.

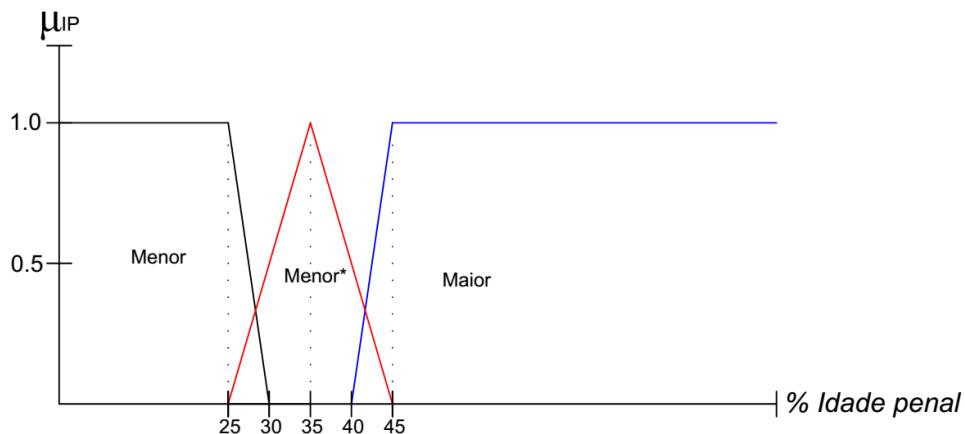


Figura 20 – Gráfico de saída do sistema de defuzzificação

A Figura 21, apresenta a região ativada pelo sistema de inferência de Mamdani Clássico, sem que ainda tenha sido aplicado o método de defuzzificação. Já a Figura 22, apresenta a região ativada pelo sistema de inferência de Larsen, sem que ainda tenha sido aplicado o método de defuzzificação.

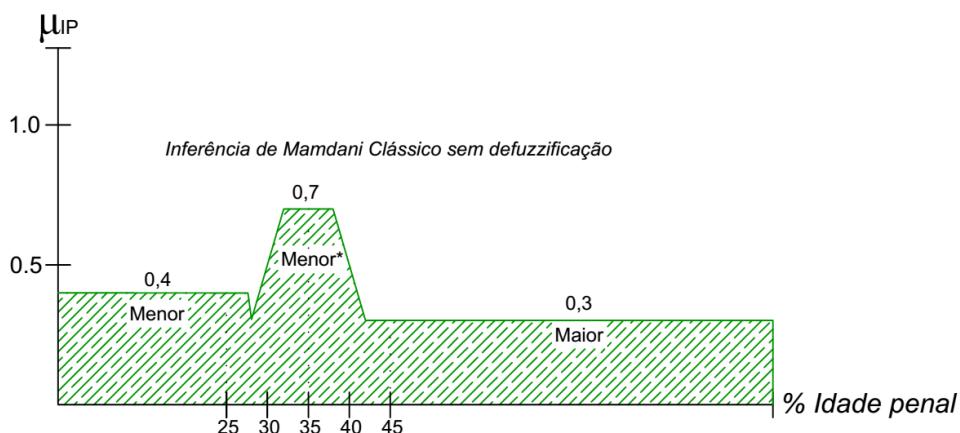


Figura 21 – Gráfico de saída sem defuzzificação para a inferência de Mamdani Clássico.

Diversos são os métodos de defuzzificação que podem ser aplicados sobre o gráfico de saída do controlador fuzzy. Porém o método escolhido influencia drasticamente nos resultados obtidos, já que a depender deste, respostas totalmente diferentes podem

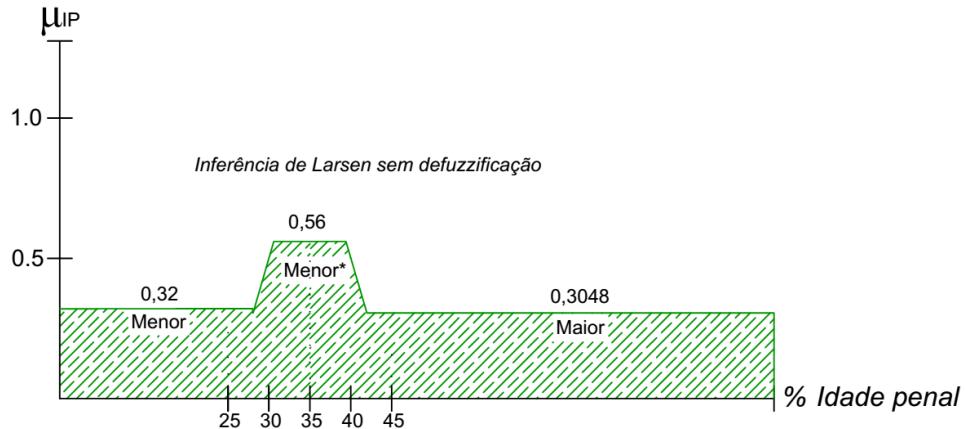


Figura 22 – Gráfico de saída sem defuzzificação para a inferência de Larsen.

ser encontradas, ou seja, com um margem muito grande ou muito pequena de erro, com relação ao que se deseja obter como resposta crisp.

Dentre os métodos mais conhecidos têm-se: o centro dos máximos, o média dos máximo e o centro de gravidade. O método do centro de gravidade também denominado de método do centróide, fornece a média das áreas de todas as figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto fuzzy. Já o centro dos máximos é um método de defuzzificação mais drástico, já que considera apenas as regiões de maior possibilidade entre os possíveis valores de saída das variáveis que modelam o conceito fuzzy. O método da média dos máximos é comumente usado em sistemas discretos onde faz a média dos elementos de maior pertinência do conjunto fuzzy, ver [Barros e Bassanezi \(2006\)](#). Abaixo têm-se os métodos: centro de gravidade e centro dos máximos, aplicados sobre as Figuras 21 e 22.

A equação 23 descreve matematicamente o método de defuzzificação centro de gravidade, considerando o domínio discreto.

$$G(A) = \frac{\sum_{i=0}^n x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_A(x_i)} \quad (23)$$

Já a equação 24 descreve matematicamente o método de defuzzificação centro dos máximos.

$$C(A) = \frac{i + s}{2} \quad (24)$$

onde,

$$i = \inf\{u \in : \mu_A(x) = \max^u \mu_A(x)\} \quad (25)$$

$$s = \sup\{u \in : \mu_A(x) = \max^u \mu_A(x)\} \quad (26)$$

Aplicando os métodos de defuzzificação das equações 23 e 24, sobre sobre as áreas gráficas das Figuras 21 e 22, obtém-se as seguintes respostas.

- Centro de gravidade:

Aplicando a Equação 23 sobre a área da Figura 21, considerando intervalos de 24 meses e considerando a idade máxima de 480 meses (40 anos) para os sistema de saída, o resultado crisp obtido na saída do controlador foi de 48,05%, ver Figura 23. Convertendo a saída percentual para valores de idade penal obtém-se que a idade penal deste indivíduo será de 230 meses ou 19 anos e 2 meses.

Aplicando agora o mesmo método sobre a 22 levando em consideração os mesmos critérios anteriormente descritos, o resultado crisp obtido na saída do controlador foi de 50,35%, ver Figura 24. Convertendo essa saída percentual para valores de idade penal obtém-se que a idade penal deste indivíduo será de 241 meses ou 20 anos e 1 mês.

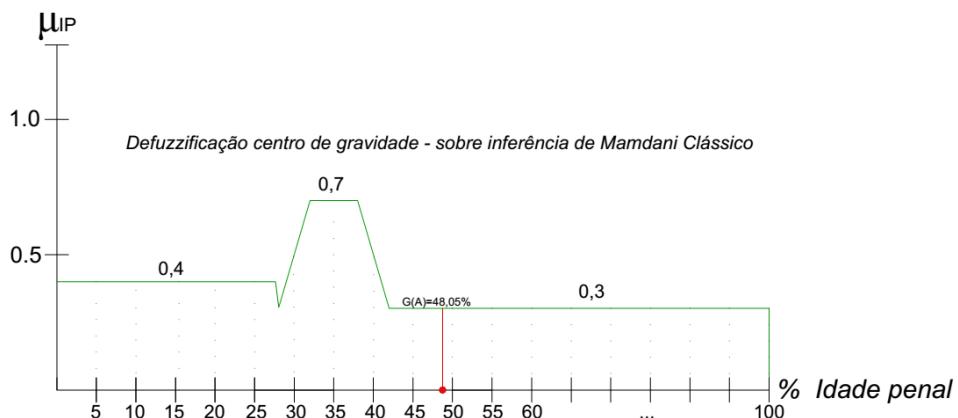


Figura 23 – Saída crisp para método centro de gravidade aplicado sobre inferência de Mamdani Clássico

- Centro dos máximos:

Aplicando a Equação 24 sobre a área da Figura 21, considerando as mesmas condições do exemplo anterior, obtém-se como resultado 35,41%, ver Figura 25. Convertendo a saída percentual para valores de idade penal obtém-se que a idade penal deste

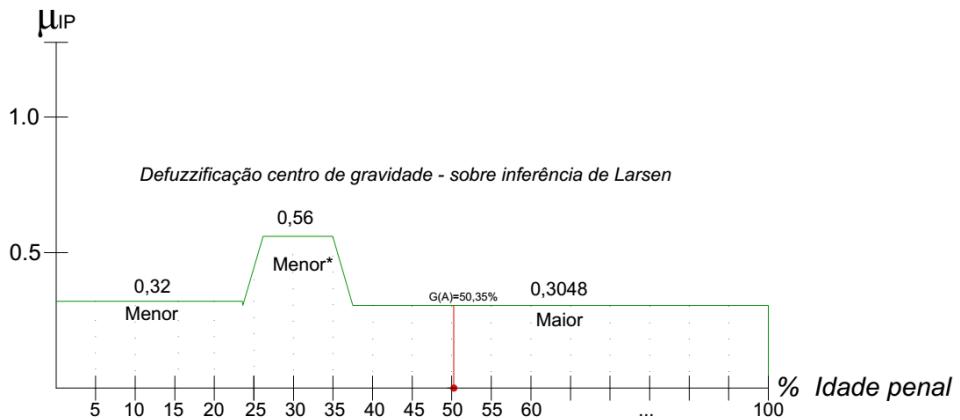


Figura 24 – Saída crisp para método centro de gravidade aplicado sobre inferência de Larsen.

indivíduo será de 170 meses ou 14 anos e 2 meses. Aplicando agora o mesmo método sobre a Figura 22, o resultado crisp obtido na saída do controlador é de 30,52%, ver Figura 26. Convertendo a saída percentual para valores de idade penal obtém-se que a idade penal deste indivíduo será de 146 meses ou 12 anos e 2 meses.

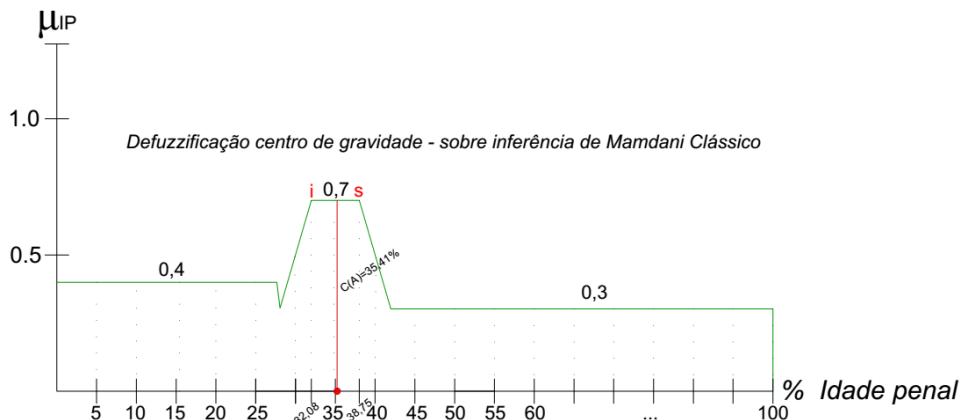


Figura 25 – Saída crisp para método centro dos máximos aplicado sobre inferência de Mamdani Clássico.

Observando os exemplos acima, percebe-se claramente como o método de defuzzificação escolhido influencia diretamente nos resultados finais. No primeiro exemplo o resultado aponta que o indivíduo será considerado adulto, sendo capaz de responder pelos seus atos, isso para ambas inferências. Já no segundo exemplo para ambas inferências têm-se que o indivíduo foi considerado como menor*, ou seja responde pelos seus atos com algumas condições. Ou seja, percebe-se que um método de defuzzificação inadequado irá resultar em grandes margens de erros para saída crisp do sistema.

É importante ressaltar que nem sempre o módulo de fuzzificação é necessário, muitas vezes a saída fuzzy pode ser diretamente utilizada como entrada em outros sis-

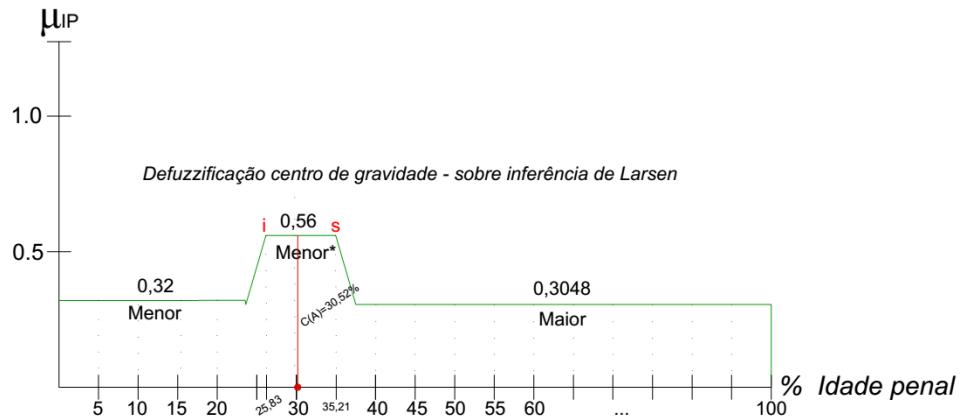


Figura 26 – Saída crisp para método centro dos máximos aplicado sobre inferência de Larsen.

temas também fuzzy. Além disto, existem também métodos de inferência que fornecem na saída do MTD um resultado crisp, como por exemplo a inferência de Takagi Sugeno Kang - TSK. Ressaltamos também, que outros métodos de defuzzificação além dos aqui citados podem ser utilizados, desde que se adeque ao seu sistema.

6 Metodologia Utilizada

6.1 Fluxograma Proposto

Na Figura 27 tem-se o fluxograma proposto para fazer o diagnóstico da QEE com base em quatro módulos de análise e controle. O primeiro módulo é responsável por fazer o diagnóstico com relação aos indicadores de distorção harmônica total de tensão (DTHV) e de corrente (DTHI), e os demais módulos farão o diagnóstico com relação ao fator de potência (FP), variação de tensão em regime permanente (VTRP), e fator de desequilíbrio (FD), respectivamente.

É importante ressaltar que dos cinco parâmetros descritos no Capítulo 3 estamos adotando quatro em nosso modelo, com exceção da variação de frequência. Isso porque o medidor de qualidade de energia elétrica utilizado para coleta dos parâmetros, não fornece os indicadores de variação de frequência no sistema elétrico medido. Assim, não foi possível inserir o módulo deste indicador no algoritmo aqui apresentado, porém, tal fato não impede que em trabalhos futuros sejam acrescentados a modelagem da variação de frequência no sistema proposto.

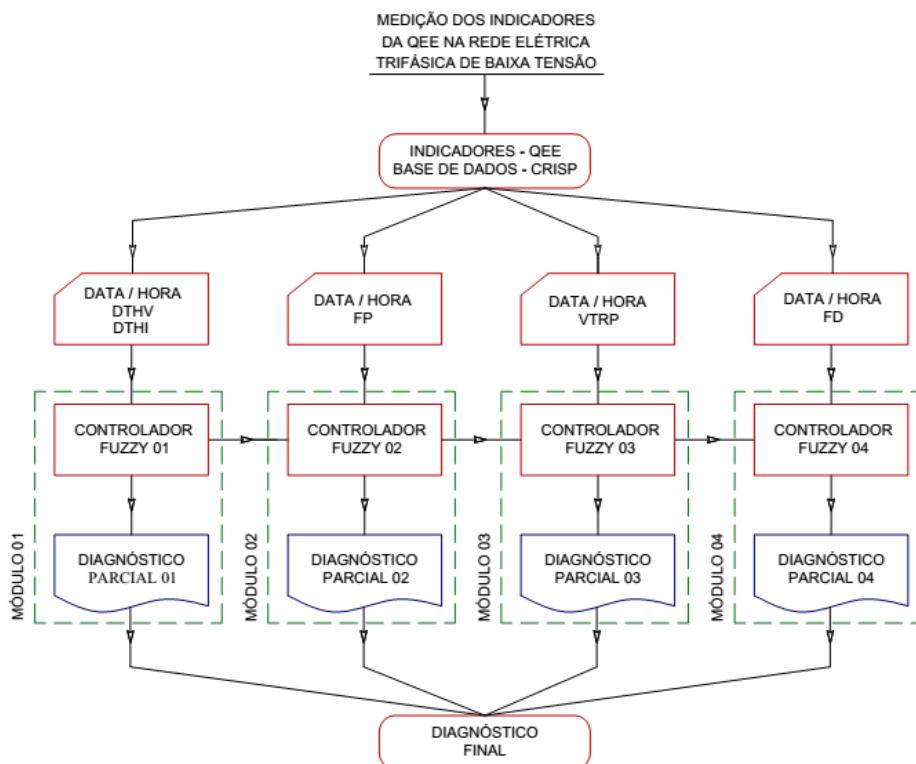


Figura 27 – Fluxograma proposto para o sistema de diagnóstico de QEE.

Pode-se observar que o sistema de diagnóstico de QEE proposto é composto por

um sistema de quatro controladores fuzzy em cascata, ver Figuras 27 e A, que apesar do nome, aqui são utilizados para realização de processos de tomadas de decisões fuzzy e não controle.

Os controladores 02, 03, 04, recebem os valores fuzzy de saída dos seus respectivos controladores antecedentes, juntamente com seus respectivos indicadores específicos. Apenas o controlador 01, se diferencia desse padrão por ser o controlador que inicializa o sistema. O fato dos indicadores de distorção harmônica total de tensão e corrente influenciarem nos demais indicadores (FP, VTRP, FD), fez com que o DTHV e DTHI fossem escolhidos para inicialização do sistema de diagnóstico.

Assim, o modelo apresentado carrega para os controladores fuzzy consequentes os resultados dos seus antecedentes, onde a principal característica, é que a modelagem considera como critério de seleção a pior condição apresentada pelo sistema. Ou seja, se um indicador, como por exemplo: se a VTRP, apresentar uma condição ruim, esta condição não poderá ser melhorada por outro indicador, exemplo: FD. Tal condição só será restabelecida quando o indicador anormal voltar para seus níveis de normalidade dentro dos padrões estabelecidos pelo sistema proposto.

Os termos linguísticos utilizados no modelo proposto tem como base os termos adotados pelo Quadro 9, indicado em Prodist (2012, md. 08/09), que faz uso das variáveis linguísticas (Adequado, Precários e Crítico), para descrever as condições dadas para os valores limites indicados com relação a variação de tensão em regime permanente.

Seguindo esse referencial, adotou-se como linguagem para o modelo o uso dos seguintes termos linguísticos: Extremamente Adequado, Adequado, Precário, Crítico, e Extremamente Crítico. Tem-se que alguns controladores fuzzy podem apresentar exceções, como por exemplo não usar os termos linguísticos extremamente adequado, ou extremamente crítico, porém, sempre mantendo como sua base os termos: Adequado, Precário, Crítico.

6.2 Arquitetura Desenvolvida

O Anexo A, apresenta arquitetura do sistema desenvolvido, com base no fluxograma apresentado pela Figura 27, onde tem-se quatro controladores em cascata também, que tem a função de tomada de decisão fuzzy no intuito de diagnosticar a QEE.

A arquitetura dos controladores fuzzy foram desenvolvidas em cinco etapas básicas, são elas: aquisição de dados, módulos de fuzzificação dos dados, módulos de tomada de decisão, módulos de defuzzificação, arquivamento e interpretação dos

resultados obtidos. Para os controladores 01, 02, e 03, foram acrescentados mais uma etapa que é responsável por tratar os números fuzzy a serem utilizados nos módulos consequentes.

Essa etapa é de grande importância o modelo, primeiramente pelo fato de tais processos não serem comuns em implementações práticas, e Segundo pelo fato de que os controladores 01, 02, e 03, vão apresentar duas saídas distintas. Uma saída defuzzificada para o diagnóstico parcial crisp, e outra saída fuzzy, que carrega as informações para a próxima tomada de decisão.

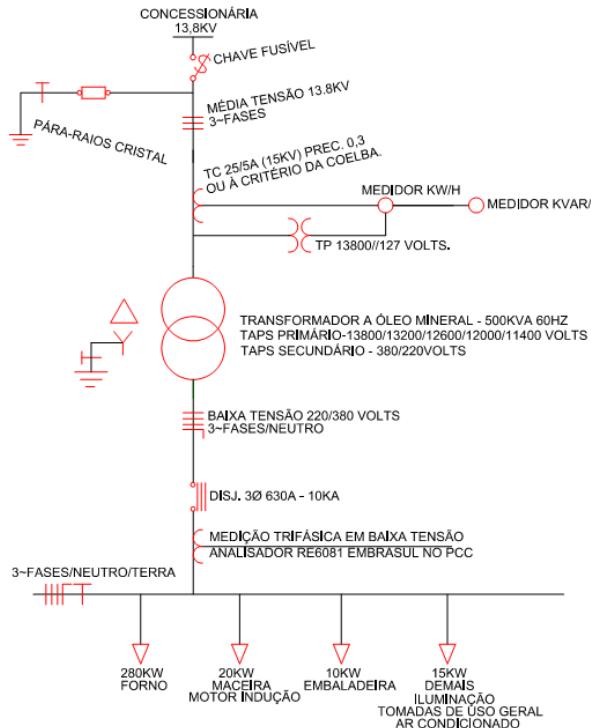
Aquisição de dados: os dados utilizados (DTHI, DTHV, FP, VTRP, FD) foram coletados no ponto de acoplamento comum (point of common coupling - PCC), que fica entre as fontes e as cargas utilizadas na indústria, ver Figura 28. Para coleta dos dados foi utilizado o equipamento: Analisador de Qualidade de Energia Modelo EMBRASUL RE6081/B/H N.S: 98200532 que estava devidamente calibrado conforme as normas IEC 61000-4-7 e 61000-4-30. Podem ser coletados até 86.400 indicadores, um a cada segundo durante um período de 24 horas para cada indicador.

Vale ressaltar que primeiramente o algoritmo foi testado com uma base de dados fictícia que envolvesse os tipos de situações possíveis para o sistema modelado, ou seja, que ativasse todas as funções de pertinências apresentadas nos controladores. Assim, os resultados obtidos foram comparados com os dados crisp de entrada dos seus respectivos indicadores, no intuito de verificar se os diagnósticos eram condizentes com relação aos critérios utilizados.

A Figura 29, apresenta os dados (indicadores) coletados em arquivo.txt. O arquivo de entrada fornece, a data da leitura, a hora da leitura a cada segundo, e os indicadores de TDHI, TDHV, FP, VTRP para cada fase do sistema, ou seja, fases: A, B, e C, já o indicador FD é o desequilíbrio entre a três fases do sistema, por isso o mesmo apresenta valor único. Assim, tem-se 86.400 dados para cada fase de cada indicador e para a data e hora, e considerando todos os dados a serem modelados o arquivo total fornece ao algoritmo 1.296.000 dados para um período de 24 horas de leitura.

Considerando a quantidade de dados a serem modelados, é importante que o algoritmo seja o mais eficiente possível, no intuito de minimizar ao máximo o tempo de resposta. É importante ressaltar ainda que os dados utilizados para o indicador FD, foram coletados com base na norma IEC.

Módulos de fuzzificação dos dados: são responsáveis por fuzzificar os indicadores (DTHV, DTHI, FP, VTRP, FD), ou seja, converte valores de entrada crisp em estados linguísticos com graus de pertinência fuzzy a serem utilizados na modelagem. As funções de pertinência desses módulos foram desenvolvidas com base nas diferenças entre os valores de referência/limites, obtidos através do estudo de diversas normas



(a) Diagrama elétrico do ponto de medição



(b) Medição no PCC através do analisador RE6081

Figura 28 – Coleta de dados no point of common coupling.

	DATA	HORA	DHTua	DHTub	DHTuc	DHTia	DHTib	DHTic	FPa	FPb	FPc	Uab	Ubc	Uca	IEC
1	19032015	103151	1.550	1.330	1.160	2.330	1.710	2.900	0.986	0.987	0.993	391.484	394.777	393.697	0.492
2	19032015	103152	1.540	1.340	1.170	2.290	1.760	2.860	0.986	0.987	0.993	391.476	394.742	393.723	0.490
3	19032015	103153	1.550	1.390	1.170	2.320	1.960	2.920	0.986	0.987	0.993	391.354	394.682	393.628	0.499
4	19032015	103154	1.540	1.390	1.180	2.210	1.900	2.870	0.987	0.987	0.993	391.476	394.742	393.705	0.490
5	19032015	103155	1.540	1.360	1.180	2.190	1.770	2.860	0.986	0.987	0.992	391.562	394.889	393.818	0.498
6	19032015	103156	1.540	1.340	1.170	2.140	1.680	2.800	0.986	0.986	0.992	391.562	394.837	393.818	0.491
7	19032015	103157	1.540	1.340	1.170	2.160	1.630	2.840	0.987	0.987	0.993	391.554	394.837	393.792	0.492
8	19032015	103158	1.530	1.340	1.180	2.140	1.710	2.850	0.985	0.987	0.992	391.649	394.924	393.905	0.491
9	19032015	103159	1.540	1.340	1.190	2.140	1.730	2.900	0.986	0.987	0.993	391.692	395.002	393.957	0.496
10	19032015	103200	1.540	1.340	1.190	2.100	1.680	2.820	0.986	0.987	0.993	391.614	394.907	393.870	0.494
11	19032015	103201	1.530	1.350	1.190	2.020	1.650	2.790	0.987	0.988	0.993	391.597	394.855	393.835	0.489
12	19032015	103202	1.540	1.340	1.190	2.100	1.690	2.840	0.986	0.987	0.993	391.588	394.829	393.818	0.486
13	19032015	103203	1.550	1.350	1.190	2.110	1.680	2.860	0.987	0.988	0.993	391.554	394.837	393.809	0.493
14	19032015	103204	1.550	1.350	1.200	2.210	1.710	2.890	0.986	0.987	0.993	391.545	394.794	393.775	0.487
15	19032015	103205	1.550	1.360	1.190	2.180	1.730	2.870	0.987	0.987	0.993	391.389	394.647	393.610	0.488
16	19032015	103206	1.530	1.400	1.190	2.130	1.890	2.830	0.986	0.987	0.993	391.406	394.664	393.627	0.488
17	19032015	103207	1.530	1.400	1.190	2.090	1.850	2.810	0.987	0.988	0.993	391.398	394.656	393.627	0.489
18	19032015	103208	1.530	1.370	1.190	2.100	1.760	2.830	0.985	0.986	0.991	391.389	394.621	393.619	0.485
19	19032015	103209	1.510	1.350	1.180	2.060	1.740	2.870	0.984	0.985	0.991	391.328	394.552	393.541	0.484
20	19032015	103210	1.520	1.330	1.180	2.100	1.770	2.920	0.985	0.986	0.991	391.363	394.551	393.523	0.478
21	19032015	103211	1.510	1.330	1.170	2.010	1.690	2.790	0.984	0.985	0.990	391.095	394.318	393.316	0.484
22	19032015	103212	1.510	1.340	1.180	2.010	1.690	2.800	0.984	0.985	0.991	391.259	394.465	393.489	0.482
23	19032015	103213	1.530	1.350	1.190	2.090	1.680	2.810	0.985	0.985	0.991	391.328	394.586	393.593	0.490
24	19032015	103214	1.540	1.340	1.180	2.080	1.650	2.810	0.985	0.986	0.991	391.294	394.491	393.532	0.481
25	19032015	103215	1.540	1.340	1.190	2.150	1.690	2.840	0.984	0.985	0.991	391.415	394.630	393.636	0.483

Normal text file length: 6036060 lines: 58401 Ln:30 Col:122 Sel:0|0 DosWindows UTF-8 w/o BOM INS

Figura 29 – Fração da base de dados a ser analisada.

nacionais e internacionais descritas no Capítulo 4. Os Módulos de fuzzificação de cada controlador podem ser visualizados no Anexo A e suas funções de pertinências podem ser vistas nas Figuras 36, 37, 38, 39. A Tabela 15, apresenta os critérios adotados, para

modelagem das funções de pertinência dos módulos de fuzzificação, no qual o critério foi diferença entre os limites adotados para cada indicador pelas diferentes normas estudadas. Observar que o fator de potência é adimensional, ou seja, não possui unidade de resposta.

É importante ressaltar que em alguns casos, um critério foi subdividido em dois sub-níveis, como por exemplo a distorção total de harmônica de corrente, onde valores acima de 5% e abaixo de 50% foram divididos entre precário e crítico, e valores acima de 50% são considerados como extremamente crítico. Isso porque as normas estudadas indicam valores aceitáveis entre 5%, 6%, e descrevem que valores acima de 50% são aceitáveis apenas para períodos de curta duração, ou seja, durante a inicialização de equipamentos elétricos.

Módulos de tomada de decisão: são compostos pelos sistemas de inferências e pelas bases de regras, ver Anexo A. Nestas etapas são feitas as tomadas de decisões, ou seja, modelagem matemática e linguística dos controladores. As bases de regras utilizadas no sistemas são compostas por um total de 16 regras para os controladores 01, 02, e 04, e um total de 20 regras para o controlador 03, ver Figura 30. Nestas os antecedentes são os estados linguísticos fuzzy, e os consequentes são a resposta linguística fuzzy dos diagnósticos parciais da qualidade de energia elétrica de cada controlador, aqui denominados de (QEE_DP01), (QEE_DP02), (QEE_DP03), e (QEE_DP04).

Para os sistemas de inferências, o algoritmo modelado apresenta três opções, a primeira é a de Mamdani Clássico que usa a t-norma do mínimo e a t-conorma do máximo, utilizada comumente na maioria dos trabalhos científicos. A segunda foi denominada de Mamdani Modificado (Larsen) que faz uso da t-norma do produto e da sua t-conorma N-dual, e a terceira denominada de Mamdani Modificado (Hamacher) que faz uso da t-norma de Hamacher e da sua t-conorma N-dual. As inferências foram escolhidas levando em consideração as características de crescimento dos graus de pertinência aos valores de entrada, ou seja, funções que tenham um comportamento suave.

Módulos de defuzzificação: as defuzzificações do sistema são feitas através do método centro de gravidade, onde as respostas obtidas são fornecidas em valores percentuais, ou seja, os diagnósticos parciais serão apresentados através de números clássicos, variando de 0% à 100%. Além da resposta percentual, o sistema fornece estados de condições as respostas, sendo: Extremamente Crítico, Crítico, Precário e Adequado, ver Anexo A. A Tabela 16 apresenta os critérios adotados para modelagem das funções de pertinência para o módulo de defuzzificação.

Na Figura 40, observamos um exemplo de funcionamento para os defuzzificadores usando método do centro de gravidade. Nas Figuras ?? e ??, observam-se os dados de saída crisp para os controladores após defuzzificação.

Tabela 15 – Descrição dos intervalos utilizados para as funções de pertinências dos módulos de fuzzificação com base nas diferenças entre as normas estudadas.

Intervalos - Fuzzificador para DTHV	
Critérios	Diferença - Normas
$0\% \leq$ Extremamente Adequado $\leq 3\%$	PRODIST IEC 61000-2-2, IEC 61000-2-4 IEEE 519 Países - Tabela 4
$2,5\% \leq$ Adequado $\leq 6,5\%$	
$5\% \leq$ Precário $\leq 8\%$	
Crítico $\geq 7,5\%$	
Intervalos - Fuzzificador para DTHI	
Critérios	Diferença - Normas
$0\% \leq$ Adequado $\leq 6\%$	IEC 61000-3-6 IEEE 519
$5\% \leq$ Precário $\leq 25\%$	
$20\% \leq$ Crítico $\leq 50\%$	
Extremamente Crítico $\geq 45\%$	
Intervalos - Fuzzificador Fator de Potência	
Critérios	Diferença - Normas
$0 \leq$ Extremamente Crítico $\leq 0,75$	PRODIST Resolução 414 Aneel Países - Tabela 8
$0,7 \leq$ Crítico $\leq 0,85$	
$0,8 \leq$ Precário $\leq 0,95$	
Adequado $\geq 0,92$	
Intervalos - Fuzzificador para Var. de Tensão em Regime Permanente	
Critérios	Diferença - Normas
$0V \leq$ Crítico Inferior $\leq 327V$	PRODIST, Resol. 505 Aneel ANSI C84.1-2011 (USA) CSA CAN3 C235 (Canadá) EN50160 (Europa) Países - Tabela 12
$323V \leq$ Precário Inferior $\leq 361V$	
$342V \leq$ Adequado $\leq 399V$	
$396V \leq$ Precário Superior $\leq 437V$	
Crítico Superior $\geq 418V$	
Intervalos - Fuzzificador para Fator de Desequilíbrio	
Critérios	Diferença - Normas
$0\% \leq$ Adequadíssimo $\leq 2\%$	PRODIST IEC 61000-2-2 IEEE 519 Países - Tabela 5
$1,3\% \leq$ Adequado $\leq 3\%$	
$2,5\% \leq$ Precário $\leq 4,5\%$	
Crítico $\geq 4\%$	

Tabela 16 – Descrição dos intervalos utilizados para as funções de pertinências dos módulos de defuzzificação.

Intervalos - Defuzzificadores dos Controladores	
Critérios para o Diagnóstico de QEE	$0\% \leq$ Extremamente Crítico $\leq 55\%$ $50\% \leq$ Crítico $\leq 75\%$ $70\% \leq$ Precário $\leq 85\%$ $80\% \leq$ Adequado $\geq 100\%$

Arquivamento dos resultados obtidos: os diagnósticos obtidos na modelagem do sistema fuzzy são gravados em arquivos.txt de saída aqui denominados de diagnósticos parciais, ver Figura 45. Esses arquivos tem as seguintes informações: data da leitura, hora da leitura, diagnóstico em porcentagem para cada fase do sistema trifásico, e as

Se	TDH _v	e	TDH _i	Então	QEE_DP01	Se	QEE_DP01	e	F _P	Então	QEE_DP02
R ₁	Ext. Adequado	Adequado	Adequado	Adequado		R ₁	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	
R ₂	Ext. Adequado	Precário	Precário	Precário		R ₂	Adequado	Precário	Precário	Precário	
R ₃	Ext. Adequado	Crítico	Crítico	Crítico		R ₃	Adequado	Crítico	Crítico	Crítico	
R ₄	Ext. Adequado	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico		R ₄	Adequado	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	
R ₅	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado		R ₅	Precário	Adequado	Adequado	Precário	
R ₆	Adequado	Precário	Precário	Precário		R ₆	Precário	Precário	Precário	Precário	
R ₇	Adequado	Crítico	Crítico	Crítico		R ₇	Precário	Crítico	Crítico	Crítico	
R ₈	Adequado	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico		R ₈	Precário	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	
R ₉	Precário	Adequado	Adequado	Precário		R ₉	Crítico	Adequado	Adequado	Crítico	
R ₁₀	Precário	Precário	Precário	Precário		R ₁₀	Crítico	Precário	Precário	Crítico	
R ₁₁	Precário	Crítico	Crítico	Crítico		R ₁₁	Crítico	Crítico	Crítico	Ext. Crítico	
R ₁₂	Precário	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico		R ₁₂	Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	
R ₁₃	Crítico	Adequado	Adequado	Crítico		R ₁₃	Ext. Crítico	Adequado	Adequado	Ext. Crítico	
R ₁₄	Crítico	Precário	Precário	Crítico		R ₁₄	Ext. Crítico	Precário	Precário	Ext. Crítico	
R ₁₅	Crítico	Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico		R ₁₅	Ext. Crítico	Crítico	Crítico	Ext. Crítico	
R ₁₆	Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico		R ₁₆	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico	

Se	QEE_DP02	e	VTRP	Então	QEE_DP03	Se	QEE_DP03	e	FD	Então	QEE_DP04
R ₁	Adequado		Crítico Inf.		Crítico	R ₁	Adequado		Ext. Adequado		Adequado
R ₂	Adequado		Crítico Sup.		Crítico	R ₂	Adequado		Adequado		Adequado
R ₃	Adequado		Precário Inf.		Precário	R ₃	Adequado		Precário		Precário
R ₄	Adequado		Precário Sup.		Precário	R ₄	Adequado		Crítico		Crítico
R ₅	Adequado		Adequado		Adequado	R ₅	Precário		Ext. Adequado		Precário
R ₆	Precário		Crítico Inf.		Crítico	R ₆	Precário		Adequado		Precário
R ₇	Precário		Crítico Sup.		Crítico	R ₇	Precário		Precário		Precário
R ₈	Precário		Precário Inf.		Precário	R ₈	Precário		Crítico		Crítico
R ₉	Precário		Precário Sup.		Precário	R ₉	Crítico		Ext. Adequado		Crítico
R ₁₀	Precário		Adequado		Precário	R ₁₀	Crítico		Adequado		Crítico
R ₁₁	Crítico		Crítico Inf.		Ext. Crítico	R ₁₁	Crítico		Precário		Crítico
R ₁₂	Crítico		Crítico Sup.		Ext. Crítico	R ₁₂	Crítico		Crítico		Ext. Crítico
R ₁₃	Crítico		Precário Inf.		Crítico	R ₁₃	Ext. Crítico		Ext. Adequado		Ext. Crítico
R ₁₄	Crítico		Precário Sup.		Crítico	R ₁₄	Ext. Crítico		Adequado		Ext. Crítico
R ₁₅	Crítico		Adequado		Crítico	R ₁₅	Ext. Crítico		Precário		Ext. Crítico
R ₁₆	Ext. Crítico		Crítico Inf.		Ext. Crítico	R ₁₆	Ext. Crítico		Crítico		Ext. Crítico
R ₁₇	Ext. Crítico		Crítico Sup.		Ext. Crítico	--	--		--		--
R ₁₈	Ext. Crítico		Precário Inf.		Ext. Crítico	--	--		--		--
R ₁₉	Ext. Crítico		Precário Sup.		Ext. Crítico	--	--		--		--
R ₂₀	Ext. Crítico		Adequado		Ext. Crítico	--	--		--		--

(a) Regras Controlador 01

(b) Regras Controlador 02

(c) Regras Controlador 03

(d) Regras Controlador 04

Figura 30 – Base de regras utilizadas para os quatro controladores.

condições lógicas dos diagnósticos para cada controlador. Os resultados em formatos gráficos também são gravados em forma de imagens, conforme podem ser vistos nas Figuras 41, 42, 43, e 44.

6.3 Estrutura do Programa

O programa desenvolvido no Matlab, oferece algumas opções de configurações gerais, ou seja, para todo o sistema. E também opções de configurações específicas, para os controladores, ver Figuras 31, 33, e 32.

No menu de configurações gerais (Ver Figura 34), pode-se escolher qual tipo de inferência será utilizada na modelagem do sistema, ou seja, Mandani Clássico que já é a opção de inicialização, Larsen, ou Hamacher. Assim, caso seja de interesse do usuário outras opções de inferências podem ser inseridas no software. Observar também que o menu de configurações gerais, oferece como opção escolher o tipo de defuzzificação a ser utilizado. Porém, só foi desenvolvido para esse sistema o método de centro de gravidade, o que não impede que outros métodos sejam acrescentados.

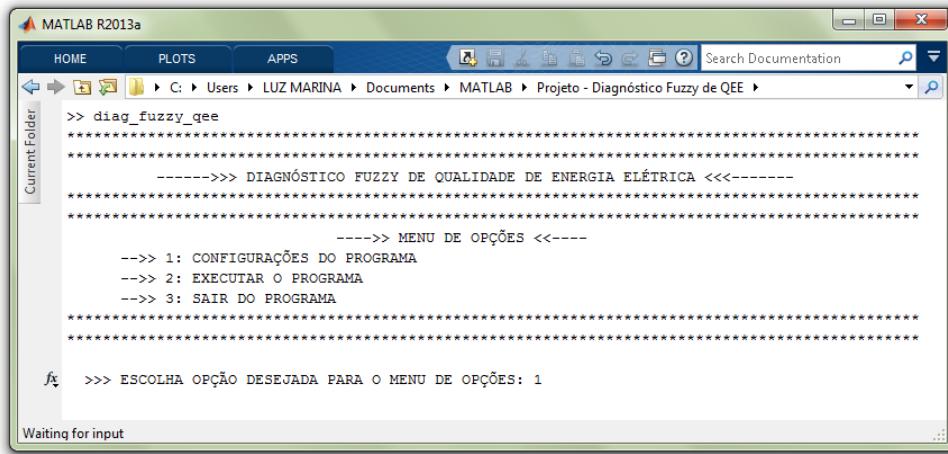


Figura 31 – Visualização do menu de opções inicial do programa de diagnóstico da QEE.

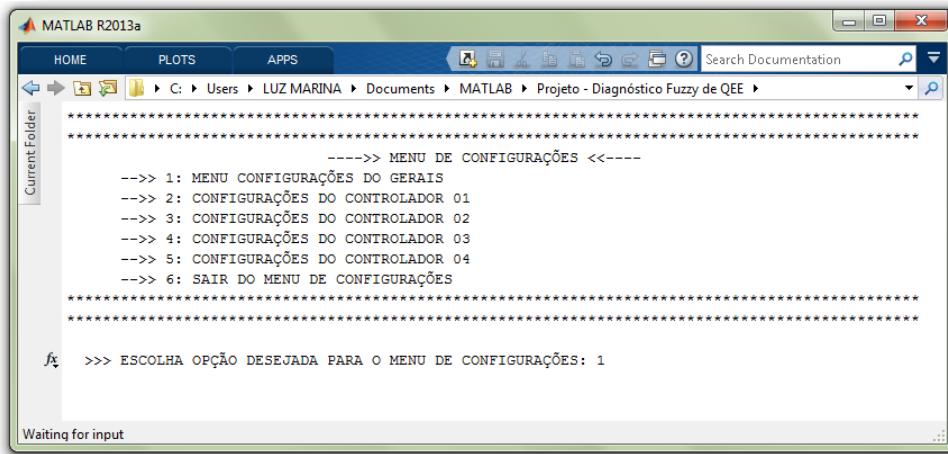


Figura 32 – Visualização do menu de configurações do programa de diagnóstico da QEE.

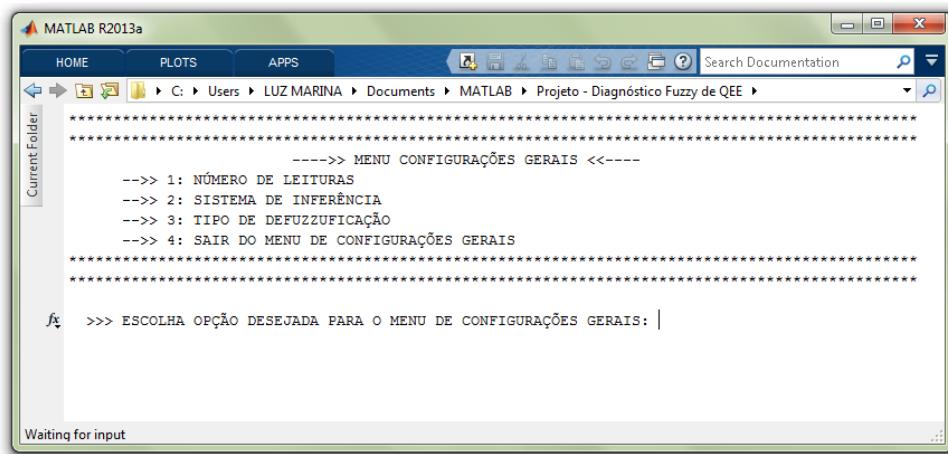


Figura 33 – Visualização do menu de configurações gerais do programa de diagnóstico da QEE.

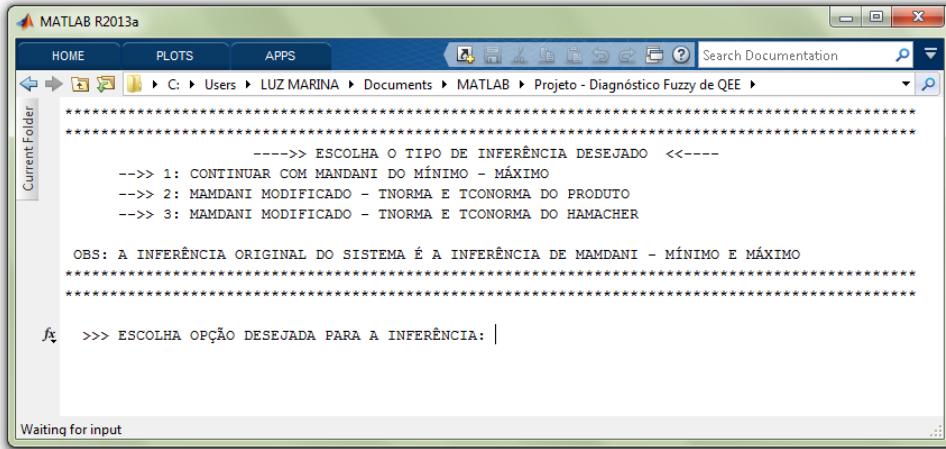


Figura 34 – Visualização do menu de configuração das inferências do programa de diagnóstico da QEE.

Na Figura 35, têm-se as opções de configurações para o controlador 01. Como por exemplo escolher visualizar as pertinências de fuzzificação e defuzzificação, ver Figuras 36, e 40. Essas opções são ideais em casos onde se deseja analisar de forma mais específica um determinado resultado. Porém, essas opções quando ativadas, reduzem a eficiência de processamento do sistema, já que aumentam o custo computacional devido as atualizações das funções gráficas a cada leitura. É importante ressaltar que os demais controladores possuem os menus de configurações idênticos ao indicado na Figura 35, que permitem visualizar suas respectivas pertinências de fuzzificação e defuzzificação. Neste último é possível visualizar os resultados obtidos através do método centro de gravidade, isso para cada interação.

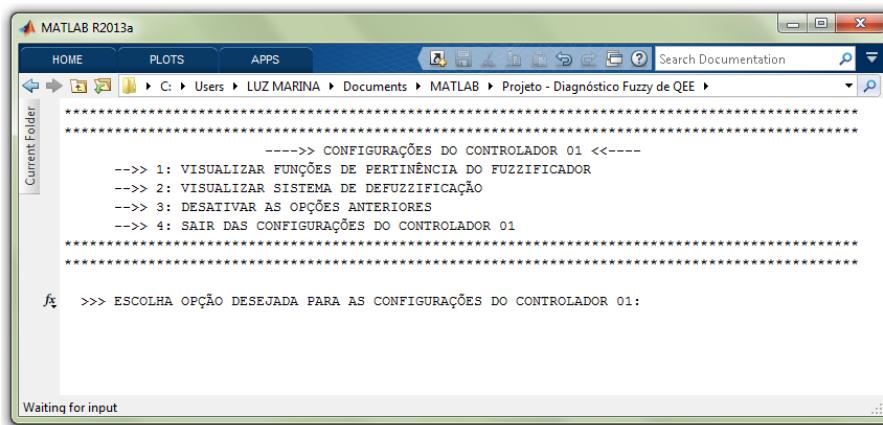


Figura 35 – Visualização do menu de configuração do controlador 01.

As Figuras 41, 42, 43, e 44, apresentam as telas gráficas de saída para os diagnósticos parciais em cada controlador, esses dados são atualizados a cada leitura fornecendo o diagnóstico crisp percentual e linguístico na tela do computador. Os diagnósticos são

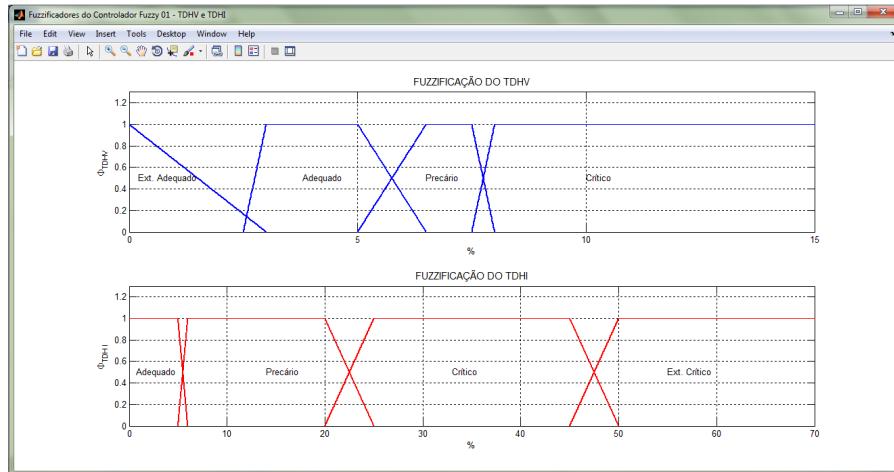


Figura 36 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 01.

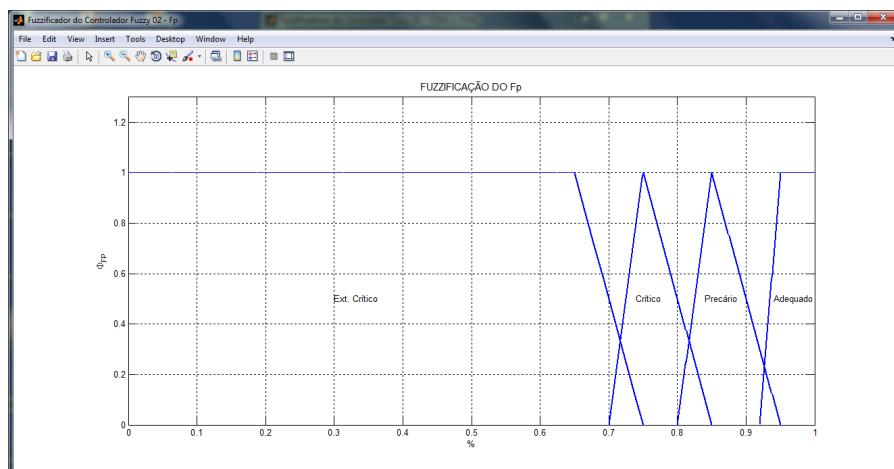


Figura 37 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 02.

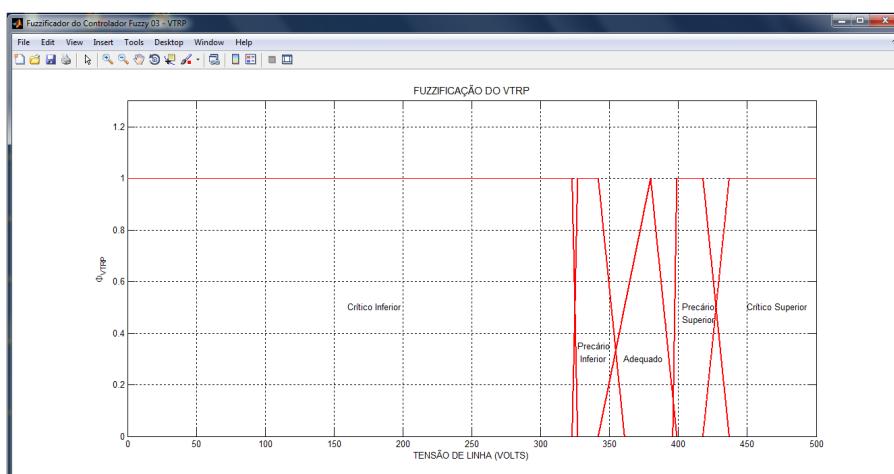


Figura 38 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 03.

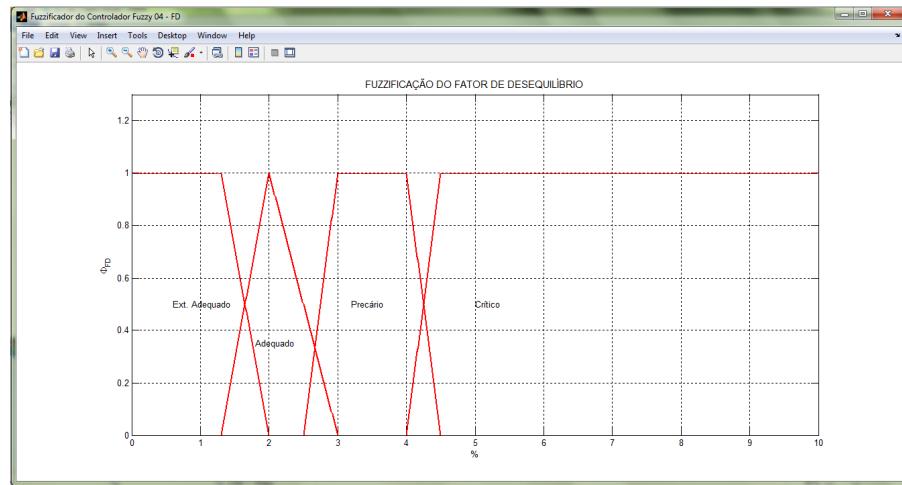


Figura 39 – Funções de pertinência de fuzzificação do controlador 04.

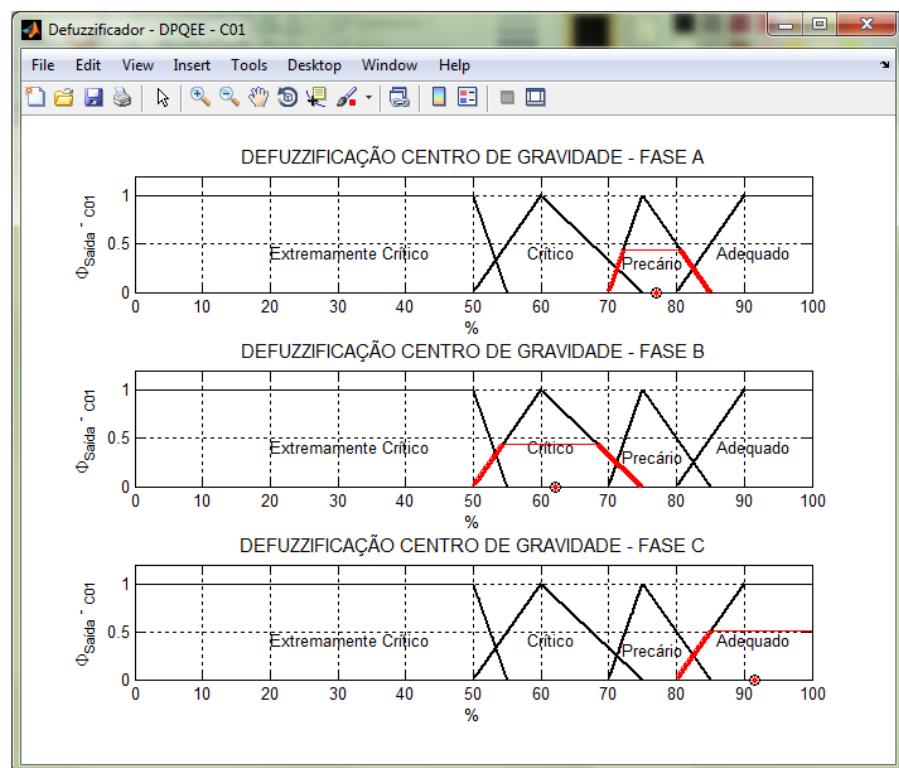


Figura 40 – Visualização do processo de defuzzificação pelo método centro de gravidade aplicado no controlador 01.

arquivados em .txt e em imagem .jpg, para futuras avaliações em caso de necessidade, ver Figura 45.

No Capítulo 7, têm-se os diagnósticos obtidos para algoritmo implementado.

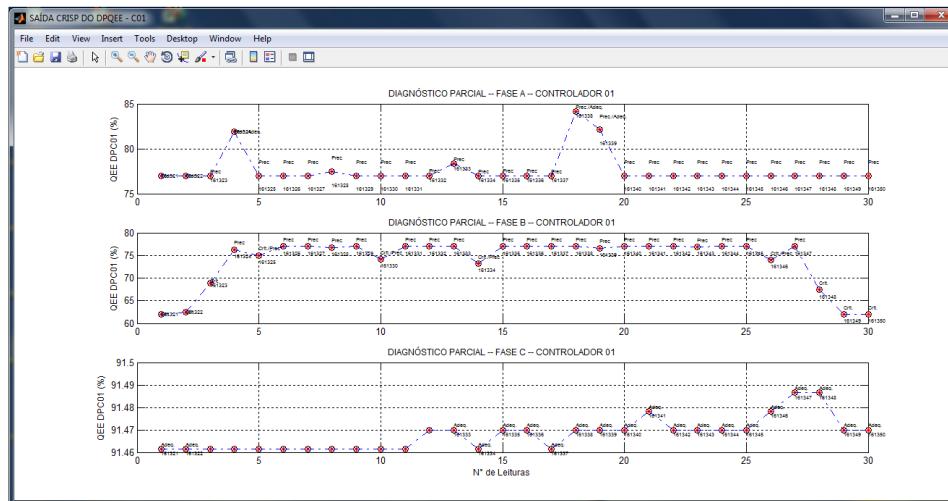


Figura 41 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP01.

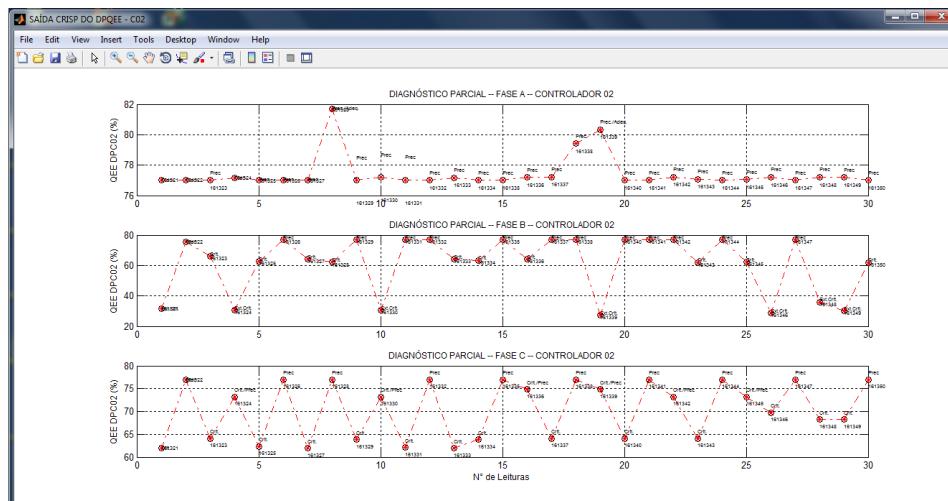


Figura 42 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP02.

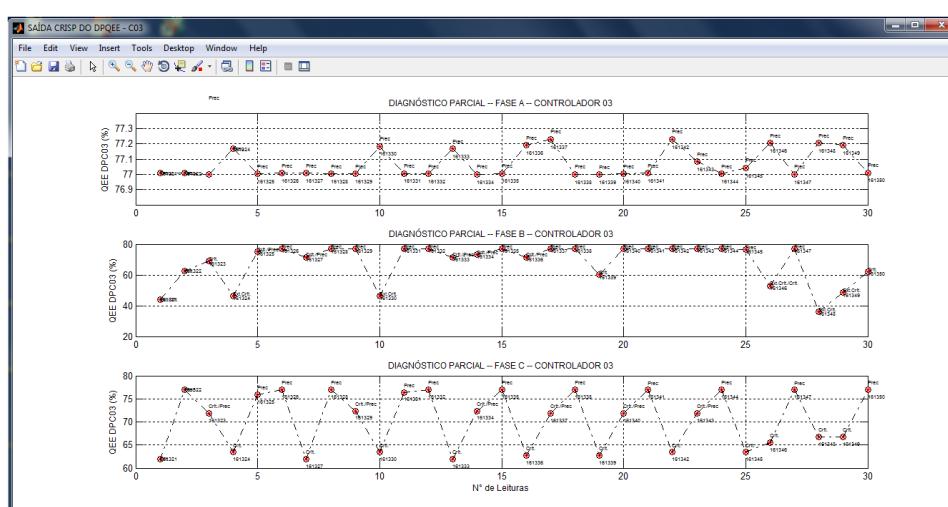


Figura 43 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP03.

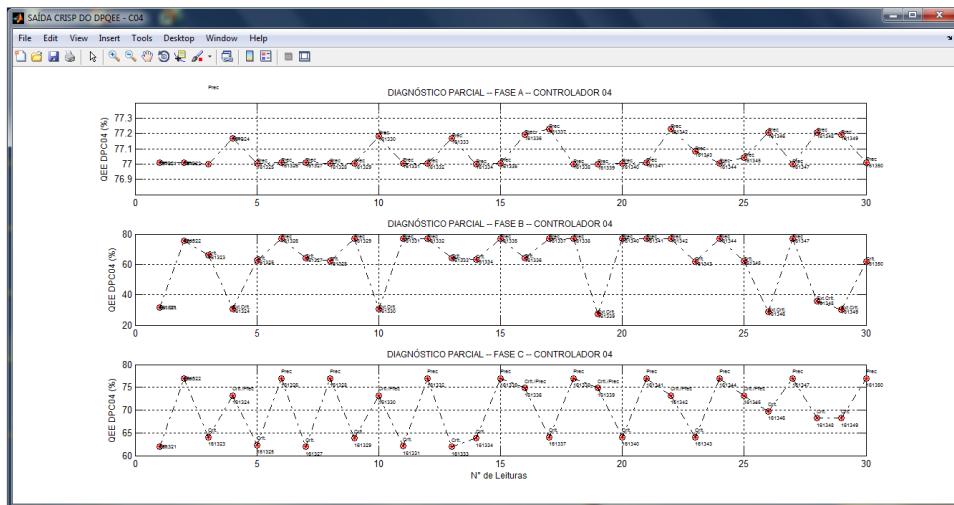


Figura 44 – Tela gráfica para diagnóstico crisp da QEE_DP04.

	DATA	HORA	DIAG_FA %	ADQ_FA	FREC_FA	CRÍT_FA	EXT.CRÍT_FA	DIAG_FB %	ADQ_FB	FREC_FB	CRÍT_FB	EXT.CRÍT_FB	DIAG_FC %	ADQ_FC	FREC_FC	CRÍT_FC	EXT.CRÍT_FC
1	19032015	161321	77.01	0	1	0	0	43.75	0	0	1	0	61.94	0	0	1	0
2	19032015	161322	77.01	0	1	0	0	62.52	0	0	1	0	76.96	0	1	0	0
3	19032015	161323	77.00	0	1	0	0	68.88	0	0	1	0	71.84	0	1	1	0
4	19032015	161324	77.17	0	1	0	0	46.40	0	0	0	1	63.46	0	0	1	0
5	19032015	161325	77.00	0	1	0	0	74.99	0	1	1	0	75.87	0	1	0	0
6	19032015	161326	77.01	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	76.96	0	1	0	0
7	19032015	161327	77.01	0	1	0	0	71.58	0	1	1	0	61.94	0	0	1	0
8	19032015	161328	77.00	0	1	0	0	76.75	0	1	0	0	76.96	0	1	0	0
10	19032015	161329	77.00	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	72.37	0	1	1	0
11	19032015	161330	77.18	0	1	0	0	46.40	0	0	0	1	63.46	0	0	1	0
12	19032015	161331	77.01	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	76.39	0	1	0	0
13	19032015	161332	77.00	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	76.95	0	1	0	0
14	19032015	161333	77.17	0	1	0	0	71.58	0	1	1	0	61.93	0	0	1	0
15	19032015	161334	77.00	0	1	0	0	73.19	0	1	1	0	72.37	0	1	1	0
16	19032015	161335	77.01	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	76.95	0	1	0	0
17	19032015	161336	77.19	0	1	0	0	71.58	0	1	1	0	62.70	0	0	1	0
18	19032015	161337	77.23	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	71.84	0	1	1	0
19	19032015	161338	77.00	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	76.95	0	1	0	0
20	19032015	161339	77.00	0	1	0	0	60.03	0	0	1	0	62.70	0	0	1	0
21	19032015	161340	77.00	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	71.86	0	1	1	0
22	19032015	161341	77.01	0	1	0	0	76.99	0	1	0	0	76.95	0	1	0	0
23	19032015	161342	77.23	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	63.46	0	0	1	0
24	19032015	161343	77.08	0	1	0	0	76.87	0	1	0	0	71.86	0	1	1	0
25	19032015	161344	77.00	0	1	0	0	77.00	0	1	0	0	76.95	0	1	0	0
26	19032015	161345	77.04	0	1	0	0	76.39	0	1	0	0	63.46	0	0	1	0
27	19032015	161346	77.20	0	1	0	0	52.94	0	0	1	1	65.51	0	0	1	0
28	19032015	161347	77.00	0	1	0	0	76.99	0	1	0	0	76.94	0	1	0	0
29	19032015	161348	77.20	0	1	0	0	36.01	0	0	0	1	66.74	0	0	1	0
30	19032015	161349	77.19	0	1	0	0	48.41	0	0	0	1	66.74	0	0	1	0
31	19032015	161350	77.01	0	1	0	0	62.01	0	0	1	0	76.95	0	1	0	0
32	19032015	161351	77.00	0	1	0	0	62.01	0	0	1	0	70.20	0	1	1	0
33	19032015	161352	77.18	0	1	0	0	43.75	0	0	1	0	61.93	0	0	1	0
34	19032015	161353	77.00	0	1	0	0	62.02	0	0	1	0	76.96	0	1	0	0
35	19032015	161354	77.01	0	1	0	0	62.02	0	0	1	0	65.31	0	0	1	0

Figura 45 – Gravação do diagnóstico de saída parcial do controlador 03 em arquivo .txt.

7 Discussão dos Resultados

7.1 Algoritmo Desenvolvido

O algoritmo desenvolvido apresenta em vários aspectos diversas vantagens com relação a esse tipo de aplicação, primeiramente o uso dos controladores fuzzy nos permite fornecer um diagnóstico final em forma de valor percentual e em forma de termos linguísticos, o que facilita bastante a interpretação por parte de usuários que não possuem conhecimento técnico na área de engenharia elétrica. O modelo é composto por um conjunto de quatro controladores fuzzy distintos em cascata, cada módulo fornece uma resposta crisp (clássica) denominados de diagnósticos parciais. Porém as saídas que são fornecidas para os próximos controladores são termos linguísticos com uma valoração fuzzy, esse tipo de modelagem normalmente não é encontrado, quando se fala de controladores fuzzy, ou seja, a modelagem desenvolvida pode servir de modelo para outros tipos de trabalhos a serem desenvolvidos em diferentes áreas.

O algoritmo proposto foi desenvolvido em linguagem de programação, código script do Matlab, esse fato, apresenta um grande diferencial quando comparado com muitos trabalhos que fazem uso do software Matlab e que são apresentados em diversos eventos científicos nas diferentes áreas de engenharia. Isso porque grande parte dos usuários que fazem uso do Matlab desenvolvem seus modelos computacionais através de blocos existentes fornecidos pela ferramenta Toolbox. Assim, o usuário não tem acesso ao código do programa, o que inviabiliza a alteração de rotinas, a inserção de novos métodos, e consequentemente a falta do código em linguagem de alto nível impede que muitos trabalhos sejam implementados em microcontroladores.

O modelo é aplicado em uma base de dados grande, ou seja, a cada 24 horas de leitura têm-se 86.400 dados para cada tipo de indicador analisado. Como estão sendo analisados cinco tipos distintos de indicadores (DTHV, DTHI, FP, VTRP, FD) para um sistema trifásico (fases: A, B, C), tem-se uma base de dados com 432.000 dados para cada fase do sistema, totalizando uma análise sob 1.296.000 dados. Assim, o uso da ferramenta toolbox já se torna um trabalho difícil, já que têm-se um grande número de dados a serem analisados, o que requer bastante esforço computacional. Pode-se destacar também que o algoritmo apresentado fornece três opções de modelagens matemática distintas, sendo elas: a Inferência Clássica de Mamdani, a Inferência de Mamdani Modificado (Larsen) e Inferência de Mamdani Modificado (Hamacher), o que não é possível através do uso da ferramenta Toolbox do Matlab.

Grande parte dos projetos de pesquisa que fazem uso de controladores fuzzy

e que são apresentados em eventos científicos, usam a implementação do sistema de inferência com uma única opção de modelagem, ou seja, Inferência de Mamdani Clássico. Isso acontece muitas vezes, porque grande parte dos modelos exemplificados nas diversas literaturas das engenharias faz uso apenas da Inferência de Mamdani Clássico através do uso da t-norma do mínimo e da t-conorma do máximo. Tal fato faz com que os controladores fuzzy desenvolvidos fiquem limitados com relação à possibilidade de se desenvolver novas modelagens matemáticas. O método de defuzzificação utilizado foi o centro de gravidade, porém outros métodos podem ser inseridos no sistema. Tem-se também que o modelo fornece os resultados em dois formatos, o primeiro é um formato visual onde são armazenadas imagens dos resultados da modelagem e cada controlador, vale ressaltar que essas imagens são gravadas em formato (.jpg) a cada 60 segundos de leituras modeladas. O outro formato no qual os dados são armazenados é o (.txt) onde são gravados a data e o horário das leituras, os valores percentuais e os termos linguísticos para cada fase e para cada controlador.

Os resultados aqui descritos, são apresentados para modelagem realizada a cada segundo de tempo. Posteriormente esses resultados poderão ser inseridos em um novo algoritmo para aplicação de métodos estatísticos, no intuito de se obter o tratamento dos dados em intervalos de 10 ou 15 minutos.

7.2 Modelagem Através do Método de Inferência de Mamdani Clássico

Apresenta-se aqui os resultados referentes à modelagem do algoritmo proposto usando o método de inferência de Mamdani Clássico e o método de defuzzificação centro de gravidade. Os dados utilizados (indicadores: DTHV, DTHI, FP, VTRP, FD) foram coletados no ponto de acoplamento comum (point of common coupling - PCC), que fica entre as fontes e as cargas no sistema trifásico de baixa tensão (220/380 volts) em uma indústria do ramo alimentício localizada no município de Santo Antônio de Jesus - BA que possui uma subestação elétrica de 500KVA, ver Figura 29a. A coleta dos dados foi feita a partir das 10:31:51 do dia 19-03-2015 até as 17:12:19 do dia 20-03-2015, sendo coletados, 110.422 dados para cada indicador analisado, ver Figura 29b.

Desta forma, submeteu-se a base de dados convertida em formato .txt para análise através do algoritmo desenvolvido. Inicializando o diagnóstico, têm-se que os dados analisados a partir das 10:31:51 até as 11:58:52 horas do dia 19-03-2015, para os quatro controladores, apresentam como resposta de QEE indicação adequado na faixa de 90% a 91,8% isso para as três fases do sistema elétrico trifásico de baixa tensão. Tal resultado pode ser observado através das Figuras 46, 47, 48 e 49.

A partir das 11:59:50 horas foi observado uma leve variação no valor percentual

do diagnóstico na fase B dos sistema elétrico, isso pode ser observado analisando os controladores 02, 03 e 04 indicados através das Figuras 50, 51 e 52 respectivamente. Tem-se que o diagnóstico fornecido pelo controlador 02 está adequado com valores

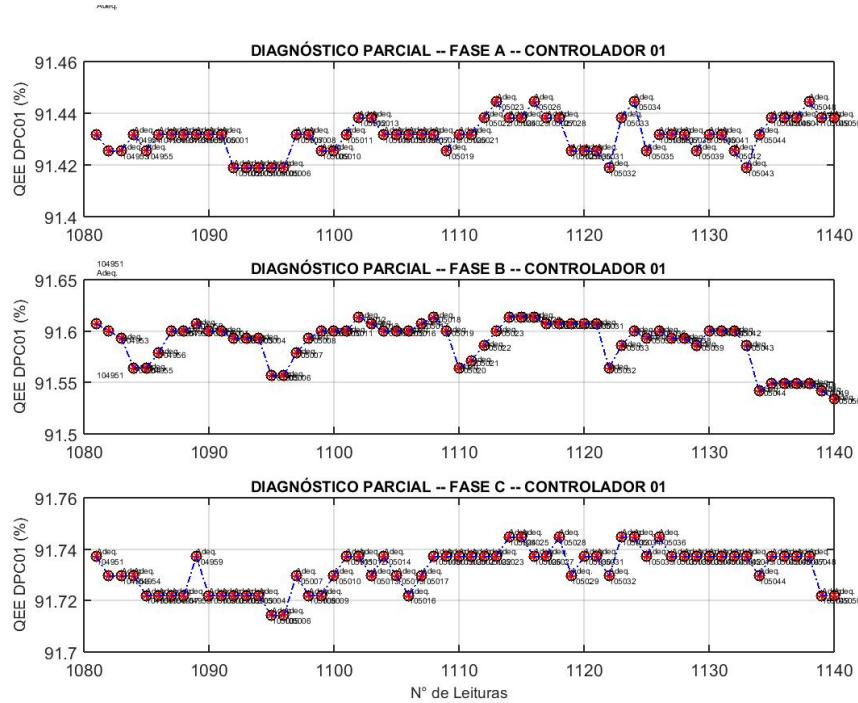


Figura 46 – Resultado - controlador 01 no período entre 10:49:49 até 10:50:49.

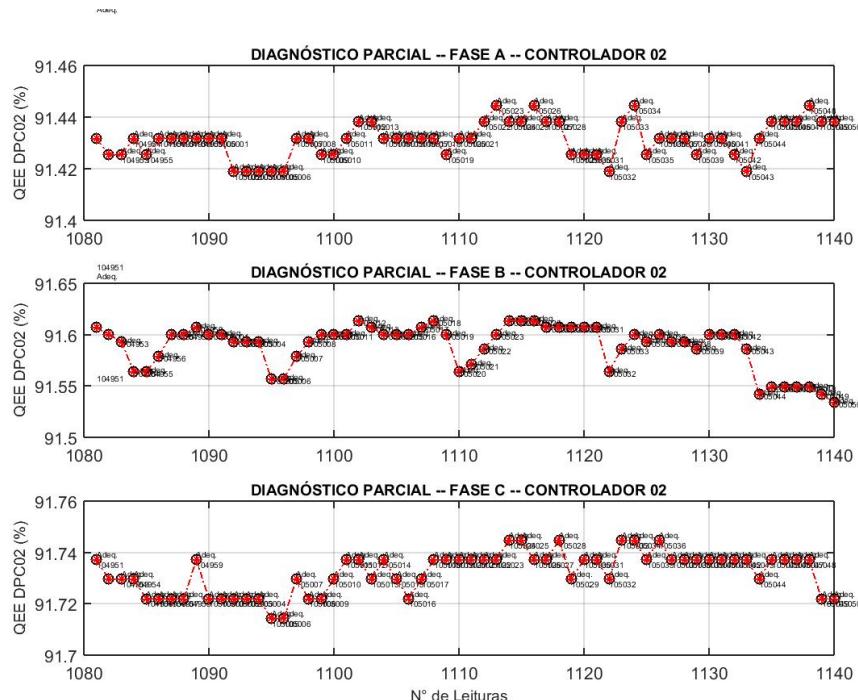


Figura 47 – Resultado - controlador 02 no período entre 10:49:49 até 10:50:49.

acima de 90% (ver Figura 50). Porém os controladores 03 e 04 apresentam diagnóstico também adequado, sendo que houve uma redução na qualidade percentual indicada um valor aproximado de 85%. Assim, pode-se afirmar que tal redução na qualidade

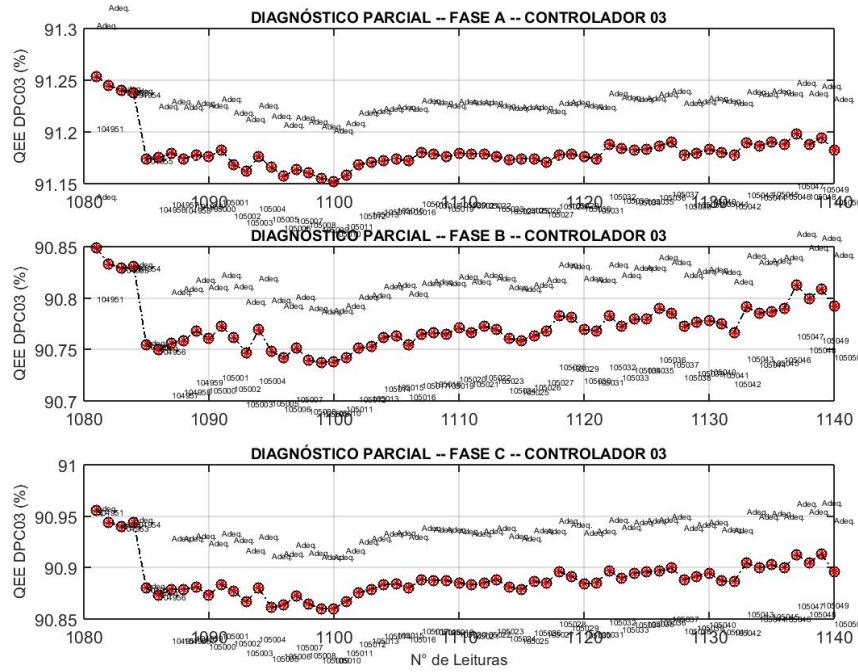


Figura 48 – Resultado - controlador 03 no período entre 10:49:49 até 10:50:49.

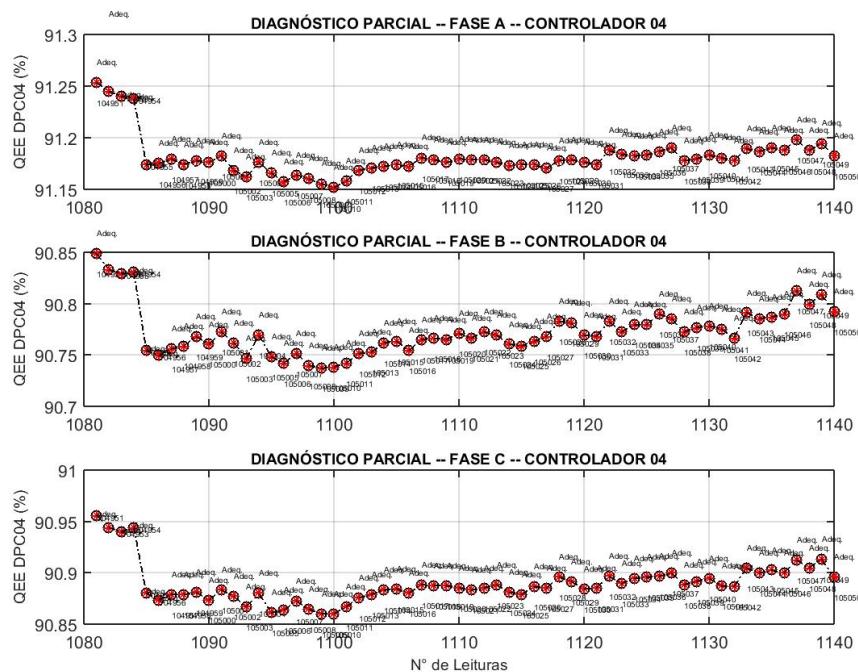


Figura 49 – Resultado - controlador 04 no período entre 10:49:49 até 10:50:49.

da energia elétrica indicada está diretamente relacionada ao controlador 03 e não ao controlador 04, já que o valor percentual de adequado com 85% que sai controlador 03 e vai para o controlador 04 não sofre decréscimo significativo.

Assim pode-se afirmar que tal redução está diretamente associada a variação nos níveis de tensão elétrica em regime permanente. Verificando-se a base de dados têm-se uma leve alteração no nível de tensão da fase B de 395 volts para 396 volts, o que justifica tal fato.

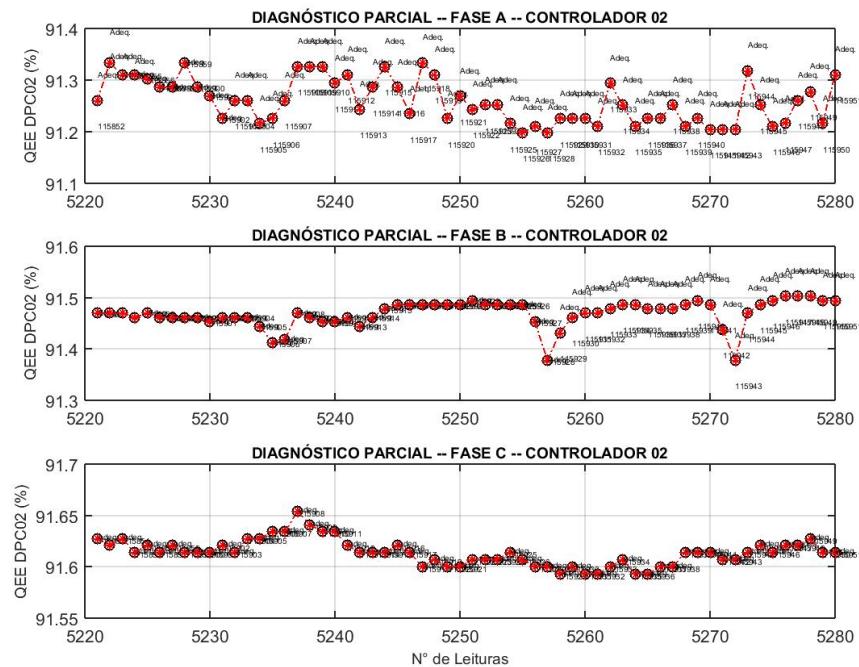


Figura 50 – Resultado - controlador 02 no período entre 11:58:52 até 11:59:50.

A partir das 12:01:38 horas a fase C também apresentou uma redução no valor percentual do diagnóstico para o controlador 03 e 04 que passou a ser adequado com indicação de 85% e algumas variações de rápida duração. Tal alteração também está relacionado a um leve aumento no nível de tensão na fase C. A partir das 12:30:50 horas a fase B começa apresentar diagnóstico precário com valor percentual variando na faixa dos 77%, isso ocorre para os controladores 03 e 04, porém como não há alteração no valor percentual do controlador 04 com relação ao controlador 03, tem-se que tal redução ocorreu devido a uma elevação no nível de tensão para valores de aproximadamente 400 volts para esta fase do sistema, ver Figura 53. Pode-se observar também na Figura 53 que a fase A do sistema tem uma leve redução no valor percentual para indicação da qualidade de energia elétrica como sendo adequado para faixa dos 85%, tal fato é pelos mesmos motivos indicados anteriormente na fase B. Observando as Figuras 54, 55, e 56, têm-se que a partir das 12:40:50 horas a fase C começa apresentar uma instabilidade variando entre diagnóstico adequado com 85% para diagnóstico precário

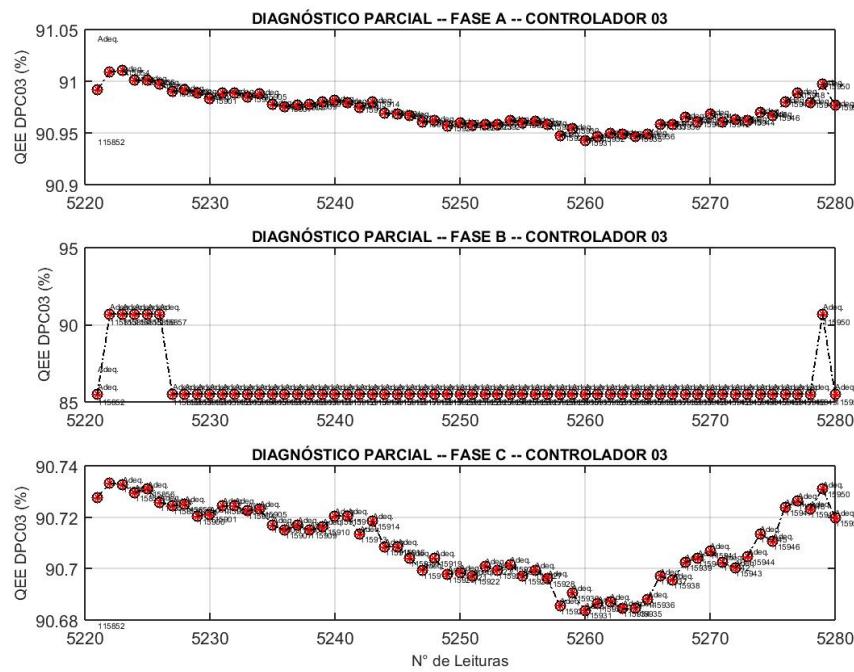


Figura 51 – Resultado - controlador 03 no período entre 11:58:52 até 11:59:50.

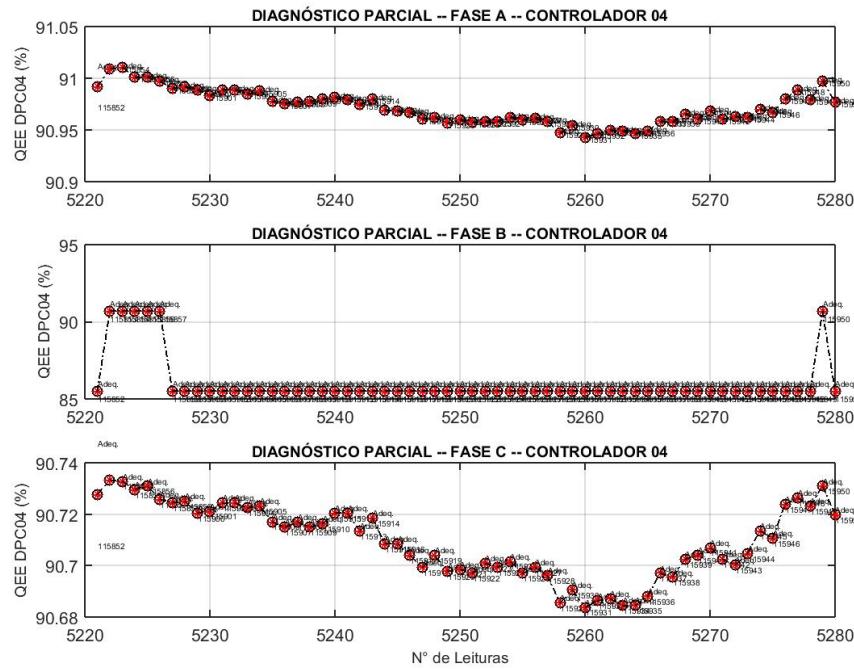


Figura 52 – Resultado - controlador 04 no período entre 11:58:52 até 11:59:50.

com aproximadamente 75%, isso para os controladores 03 e 04, o que indica uma oscilação no nível de tensão da fase C que dura um pouco mais de dois minutos. Após esse período de oscilação o diagnóstico para fase C se acomodou em precário igual a

76%, ver Figura 57.

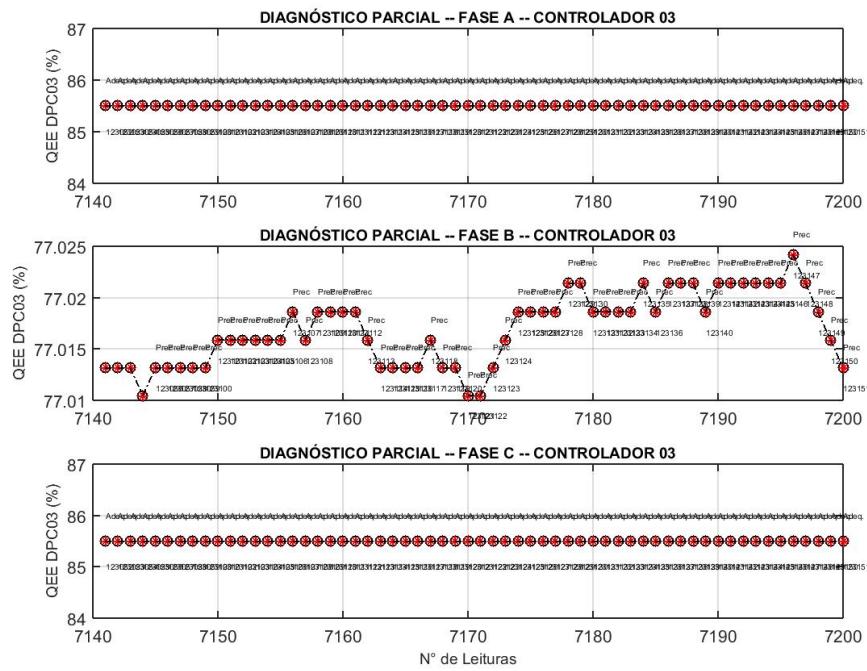


Figura 53 – Resultado - controlador 03 no período entre 12:30:50 até 12:31:50.

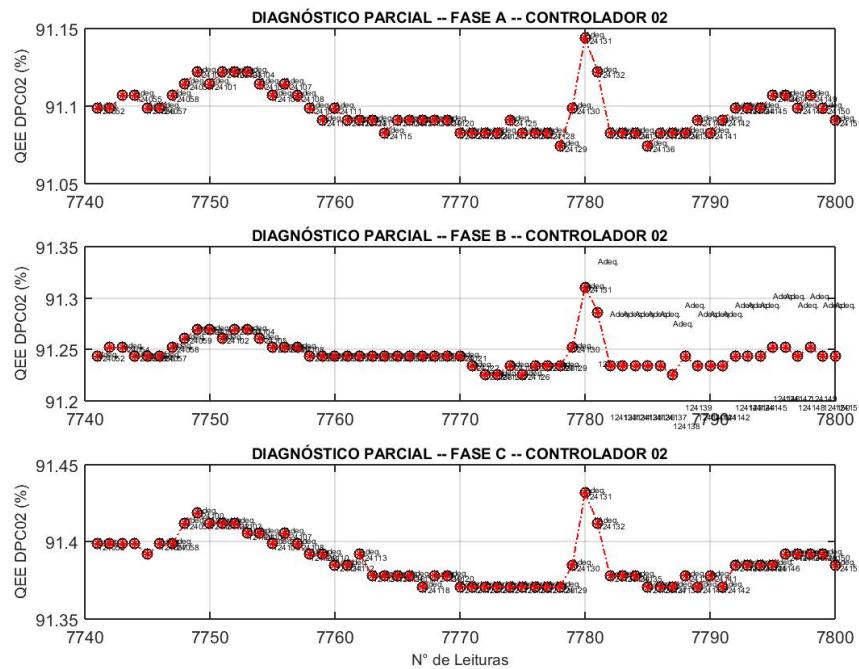


Figura 54 – Resultado - controlador 02 no período entre 12:40:50 até 12:41:50.

A partir das 12:44:50 horas o padrão do diagnóstico para os quatro controladores se mantém até as 13:37:50 horas. Neste período são observados apenas algumas

variações com relação ao controlador 03, sendo que a fase A na maior parte do tempo mantém o diagnóstico adequado com aproximadamente 91%, as demais fases apresentam algumas variações entre adequado e precário, que vão de 90% a 75%.

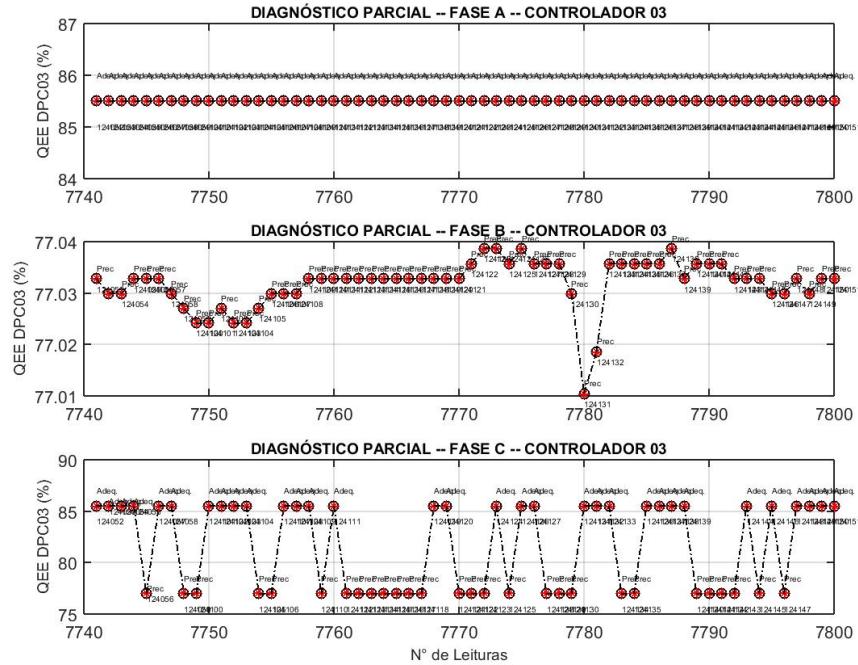


Figura 55 – Resultado - controlador 03 no período entre 12:40:50 até 12:41:50.

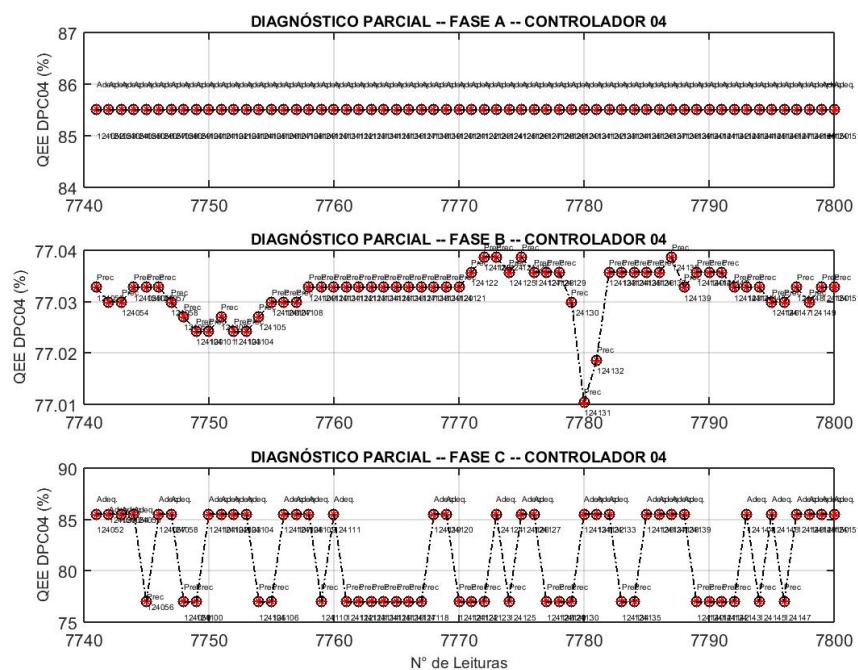


Figura 56 – Resultado - controlador 04 no período entre 12:40:50 até 12:41:50.

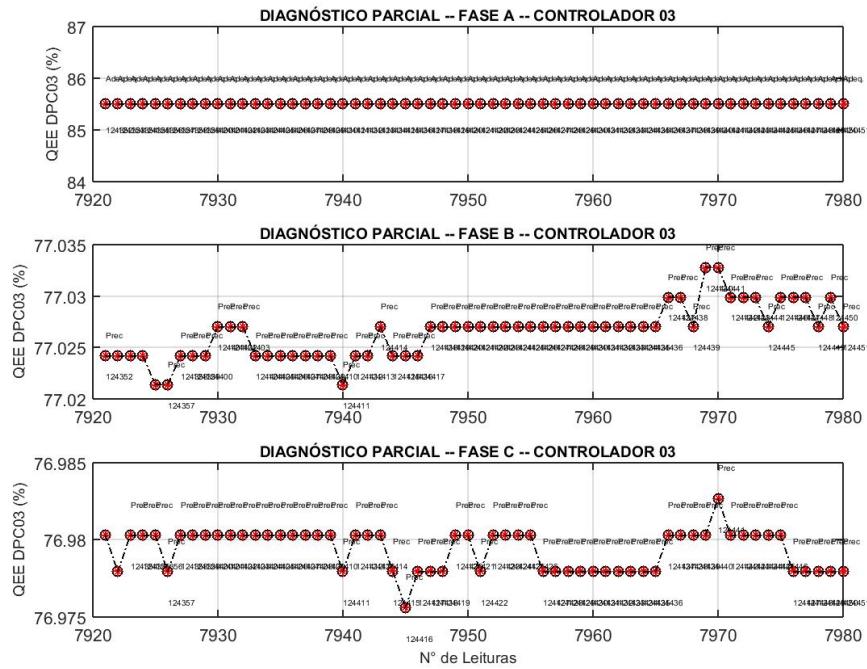


Figura 57 – Resultado - controlador 03 no período entre 12:43:50 até 12:44:50.

A partir das 13:37:50 horas a qualidade do diagnóstico sofre uma alteração para níveis de precário a crítico na faixa dos 60% de QEE e variando em diversos momentos para condições de extremamente crítico com 20% de QEE, como pode ser observados nas Figuras 58, 59, 60, 61.

Observando a Figura 58, tem-se que no controlador 01 as fases A e B apresentam diagnóstico adequado acima de 90%, porém a fase C apresenta um diagnóstico variando entre adequado e precário na faixa entre 85% a 75%. Ao analisarmos a banco de dados neste período de tempo, percebe-se que as três fases apresentam valor percentual para distorção harmônica total de tensão menor que 2% o que é um resultado excelente. Já o indicador de distorção harmônica total de corrente apresenta no instante 13:38:54 os seguintes indicadores: fase A - 4.930% , fase B - 3.680% , fase C - 6.040%. Os valores apresentados não são valores ruim, já que apresentam DTHI menor que 10%, porém pode ser observado que a fase C é a que apresenta maior distorção harmônica total de corrente, o que justifica a perda de qualidade com relação ao controlador 01 para esta fase do sistema.

O controlador 02, ver Figura 59, apresenta variação bastante significativa se comparado com o resultado do controlador 01, isso para as três fases do sistema. Tal fato é justificado devido a uma redução brusca no fator de potência para ambas as fases da faixa dos 0,92 para valores de aproximadamente 0,74. Foi observado que o fator de potência está decaindo desde as 13:37:44 horas. Observando os controladores 03 e 04,

ver Figura 60 e 61, apresentam poucas variações se comparados com o controlador 02, tal fato indica que o fator de potência foi o responsável pelo resultado de QEE ruim apresentado para esse período, principalmente para fase C do sistema que apresenta valores extremamente crítico variando entre 20% e 40%.

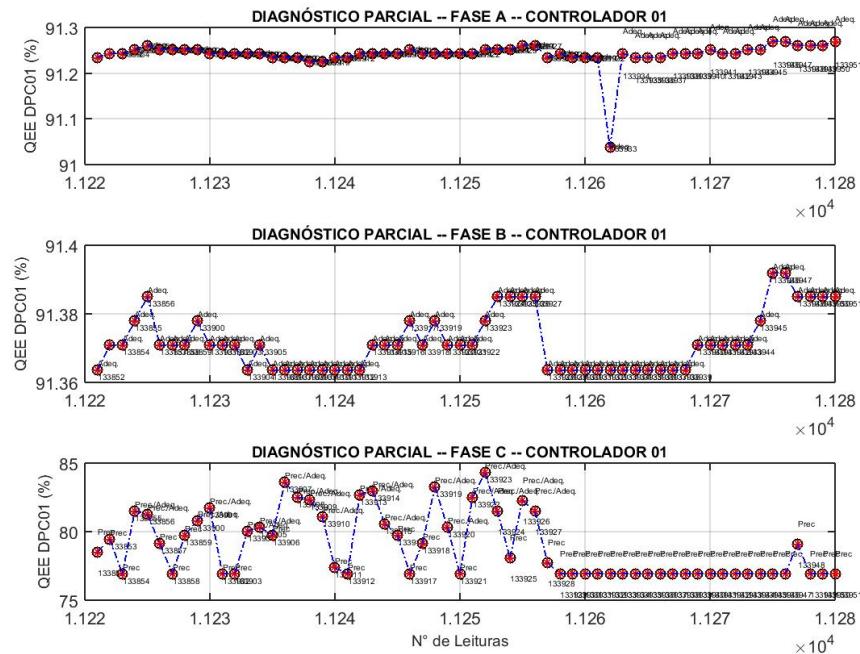


Figura 58 – Resultado - controlador 01 no período entre 13:38:50 até 13:39:50.

O controlador apresentou desempenho entre crítico e extremamente crítico até as 13:45:58 horas, onde o diagnóstico para as três fases retorna para condição adequada com percentuais acima de 90%. Isso é explicado porque o fator de potência a partir desse horário retorna para valores acima de 0,92 para ambas as fases. Esse comportamento dura até as 15:42:57 horas, a partir desse horário os diagnósticos começam apresentar oscilações que variam entre adequado com 80% até extremamente crítico com 20%. Analisando os resultados percebemos que o controlador 01 começou apresentar diagnóstico precário na faixa de 70%, isso é explicado devido as distorções harmônicas totais de corrente alcançarem valores superiores a 10%, chegando a valores acima de 20% em alguns instantes.

Aliado a isso, percebeu-se também uma redução no fator de potência chegando a valores na casa de 0,7 e também um acréscimo nos valores de variação de tensão de regime permanente chegando a valores acima de 400 volts. Na Figura 62 podemos observar o comportamento do diagnóstico apresentado para o controlador 04, como resultado final do cascamenteo de todos os controladores.

Observou-se que durante os horários que compreende as 15:45:00 até as 16:48:00

aproximadamente, os diagnósticos apresentaram valores de diagnósticos extremamente negativos, no que se refere a valores linguísticos que vão de crítico a extremamente crítico com percentuais entre 70% a 20%. Esse comportamento foi mais acentuado para

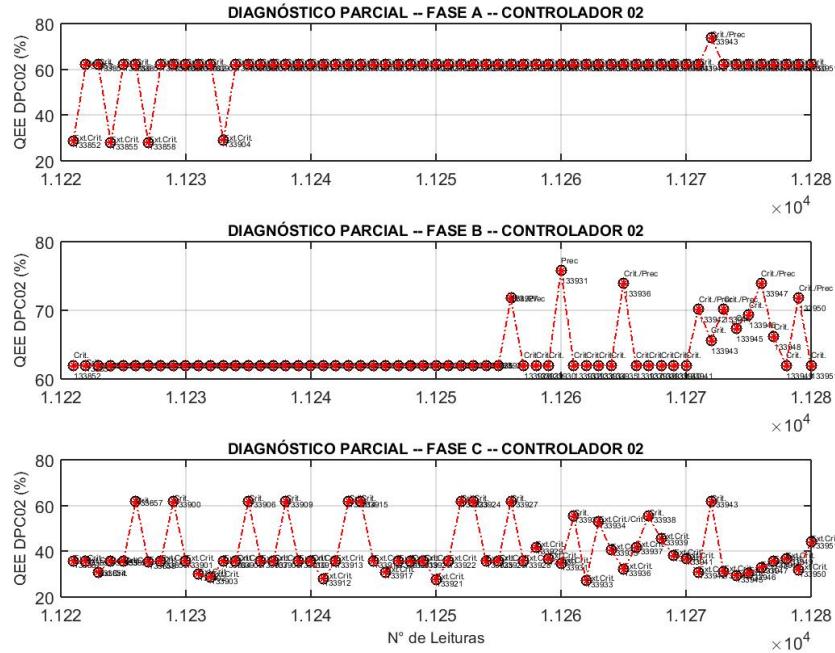


Figura 59 – Resultado - controlador 02 no período entre 13:38:50 até 13:39:50.

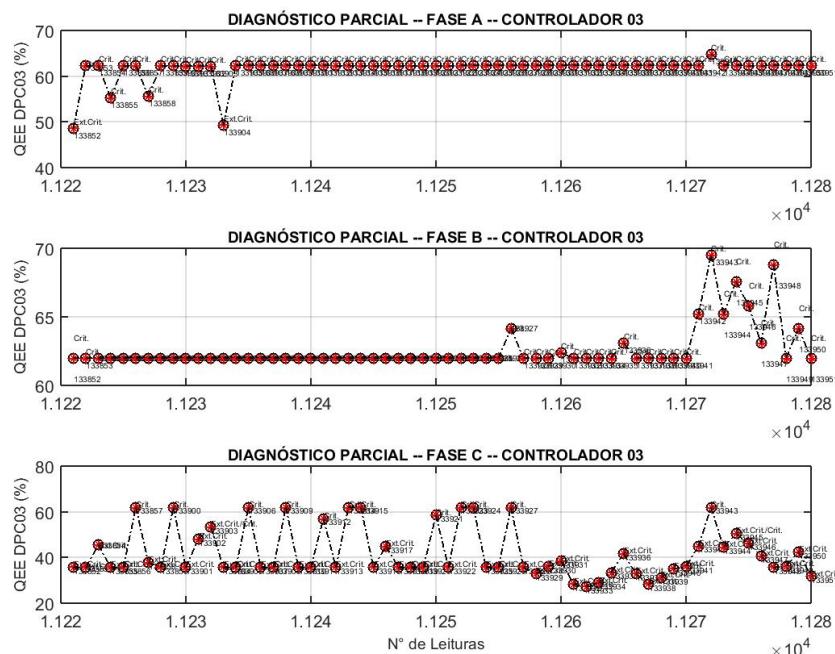


Figura 60 – Resultado - controlador 03 no período entre 13:38:50 até 13:39:50.

as fases B e C. Percebeu-se que tal comportamento ocorreu devido a um conjunto de fatores de distorção harmônica total de corrente na faixa de 11% para fase A e de 20% para fases B e C, fator de potência na faixa de 0,72 para ambas as fases oscilando em

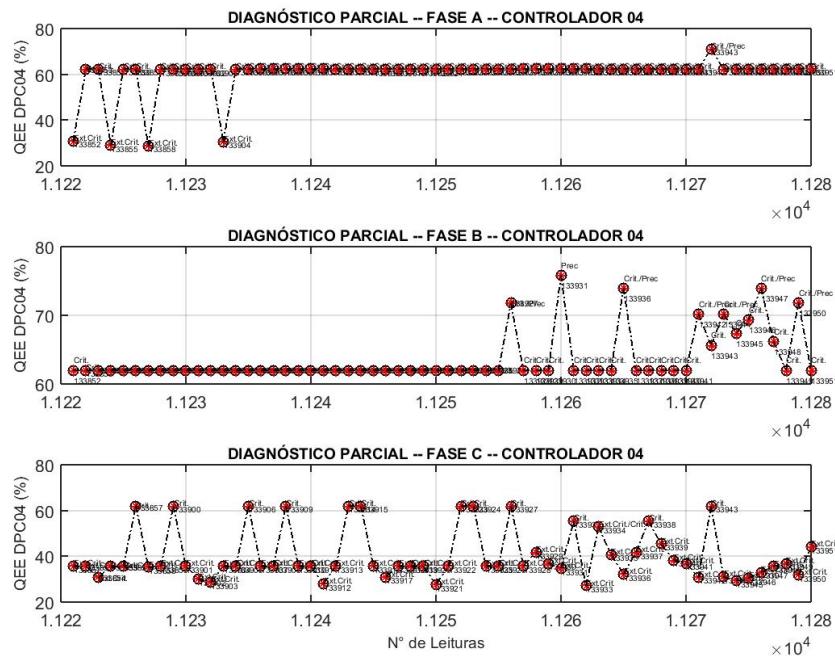


Figura 61 – Resultado - controlador 04 no período entre 13:38:50 até 13:39:50.

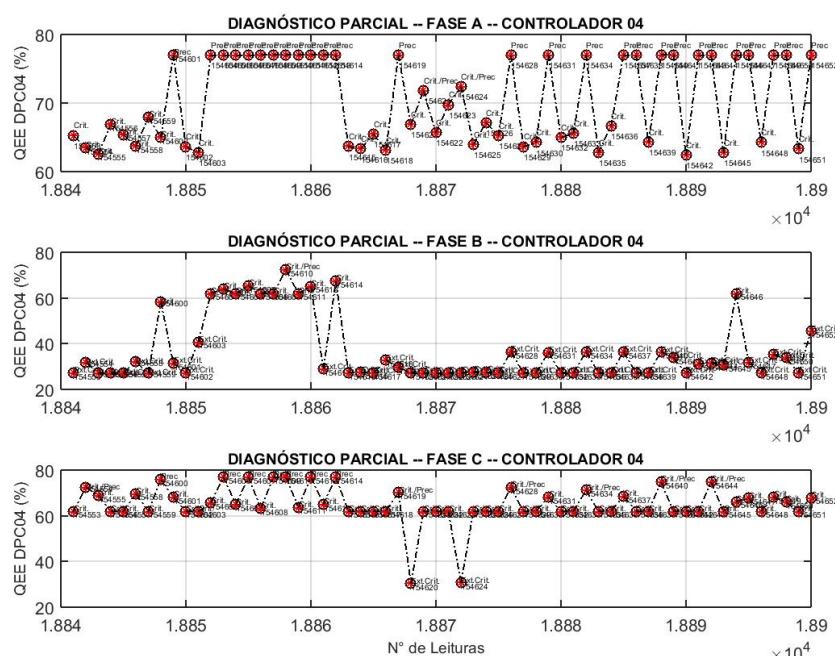


Figura 62 – Resultado - controlador 04 no período entre 15:45:51 até 15:56:51.

alguns momentos para valores entre 0,8 a 0,9 e valores de tensão de linha acima de 399 volts.

A partir das 16:53:12 aproximadamente, o diagnóstico começou a se apresentar precário na faixa dos 77% com variações para casa dos 80%, isso ocorreu devido uma melhora nos valores do fator de potência que começaram a se acomodar entre 0,8 a 0,92. Porém os valores de distorção harmônica total de corrente continuam apresentando valores acima de 10% para ambas as fases, e os valores de tensão de linha estão na faixa dos 402 volts. A fase B apresenta em diversos momentos oscilações bastantes bruscas entre precário e extremamente crítico, com tempos de durações acima de 2 minutos de perturbação.

Observando as Figuras 63, 64, 65, e 66, percebe-se que para o controlador 01 o diagnóstico para fase B apresenta diagnóstico precário na faixa dos 65% com algumas oscilações para crítico. A fase A está precário na faixa dos 77% , porém de maneira estável e já a fase C está com diagnóstico adequado com valores acima de 90%.

Ao analisar o controlador 02, ver Figura 64, tem-se que houve uma redução na qualidade do diagnóstico com relação as fases B e C, o que indica que o fator de potência para essas fases estão com valores baixo de 0,9, porém a fase A continua estável com diagnóstico precário igual a aproximadamente 77%.

Analizando o controlador 03, ver Figura 65, percebe-se que há uma redução no valor percentual da QEE para fase C, porém a fase A e B se mantem estável com relação aos resultados apresentados no controlador 02. O controlador 04, ver Figura 66, não apresenta variações relevantes com relação aos resultados apresentados no controlador 03. Assim, pode-se afirmar que os indicadores que estão afetando diretamente a qualidade de energia elétrica durante esse período de análise são a distorção harmônica total de corrente apresentada no controlador 01 para fase B, o fator de potência para fase B e C, e os valores de tensão de linha para fase C.

Para os indicadores no instante 17:19:08 horas, têm-se que a distorção harmônica total de tensão está com valores abaixo de 2% o que extremamente bom, porém a distorção harmônica total de corrente apresentou valores iguais a: fase A - 8.280% , fase B - 46.08% , fase C - 0.00%. O fator de potência apresentado por fase é o seguinte: fase A - 0,963; fase B - 0,864; fase C - 0,923. Os valores de tensão de linha apresentado é: fase AB - 405.132 volts, fase BC - 407,351 volts, fase CA - 407,377 volts. O fator de desequilíbrio apresentado neste instante foi de 0,366% o que também é excelente.

Pode-se observar que a fase B realmente está sendo mais afetada, já que a mesma apresenta valores altos de DTHI, fator de potência abaixo de 0,87 e tensão de linha entre as fases A e C com valores acima de 405 volts.

A partir das 18:04:35 horas o controlador 02 começa apresentar qualidade de

energia extremamente crítico igual a aproximadamente 27% para fase B e C. A partir das 18:29:31 horas a fase B também começou apresentar QEE extremamente crítico com 27%. Observando as Figuras 67 e 68, que compreende uma análise entre as 18:51:51 e 18:52:51

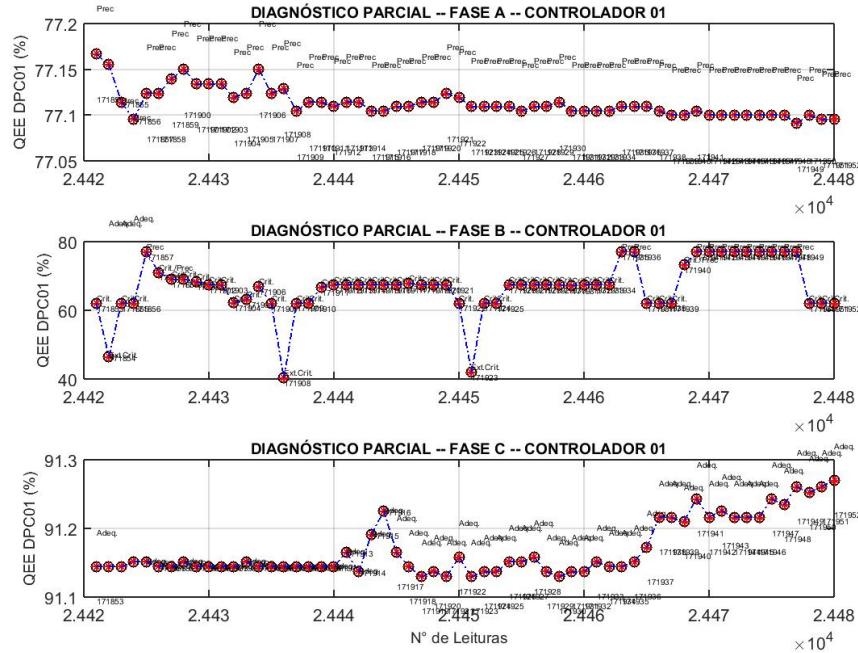


Figura 63 – Resultado - controlador 01 no período entre 17:18:51 até 17:18:51.

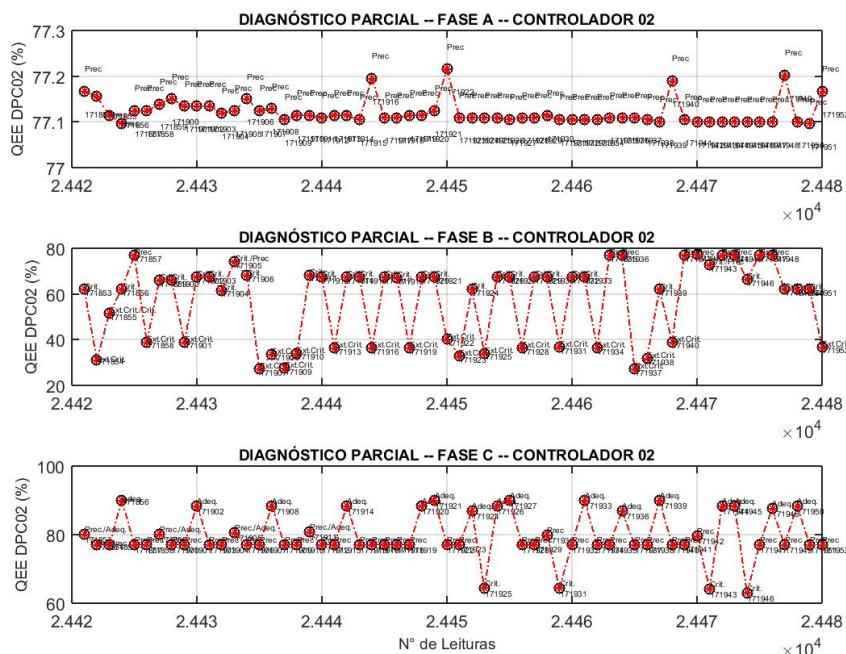


Figura 64 – Resultado - controlador 02 no período entre 17:18:51 até 17:18:51.

horas, percebe-se que para o controlador 01 apenas a fase A apresenta diagnóstico precário com percentual aproximado de 77%, as demais fases apresentam QEE adequado acima de 90% para os indicadores de distorção harmônica total de tensão e corrente.

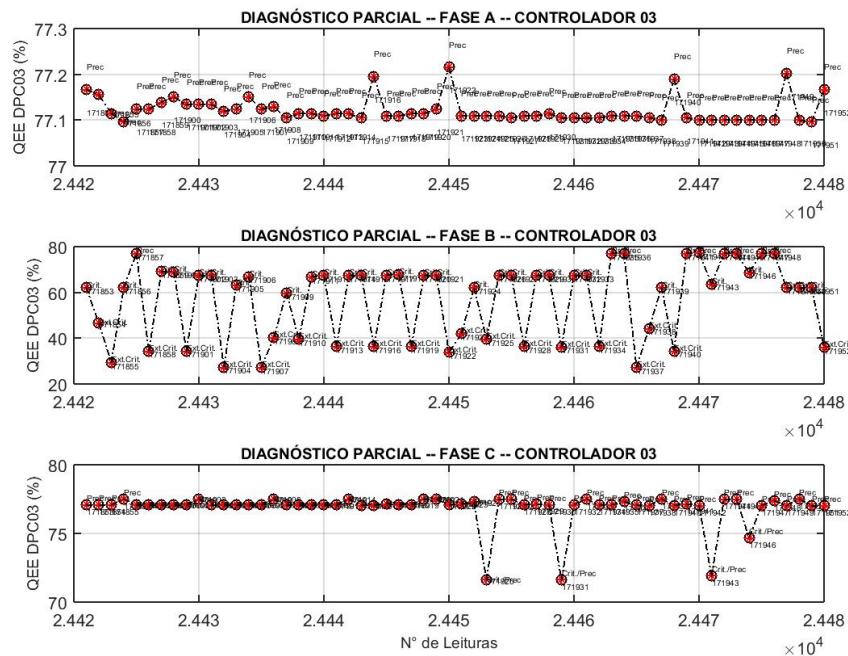


Figura 65 – Resultado - controlador 03 no período entre 17:18:51 até 17:18:51.

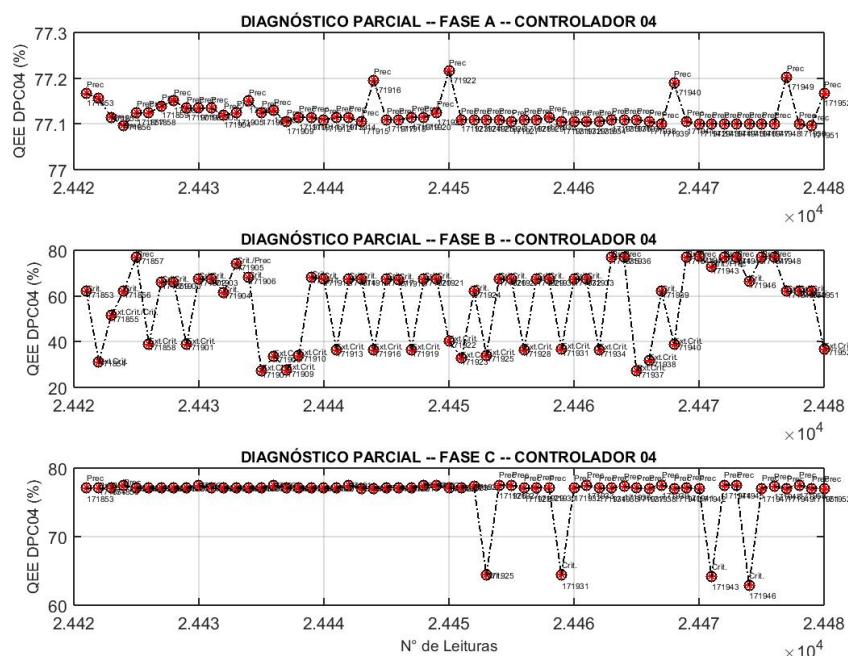


Figura 66 – Resultado - controlador 04 no período entre 17:18:51 até 17:18:51.

Já o controlador 02 apresenta diagnóstico extremamente crítico na faixa dos 27% para ambas as fases.

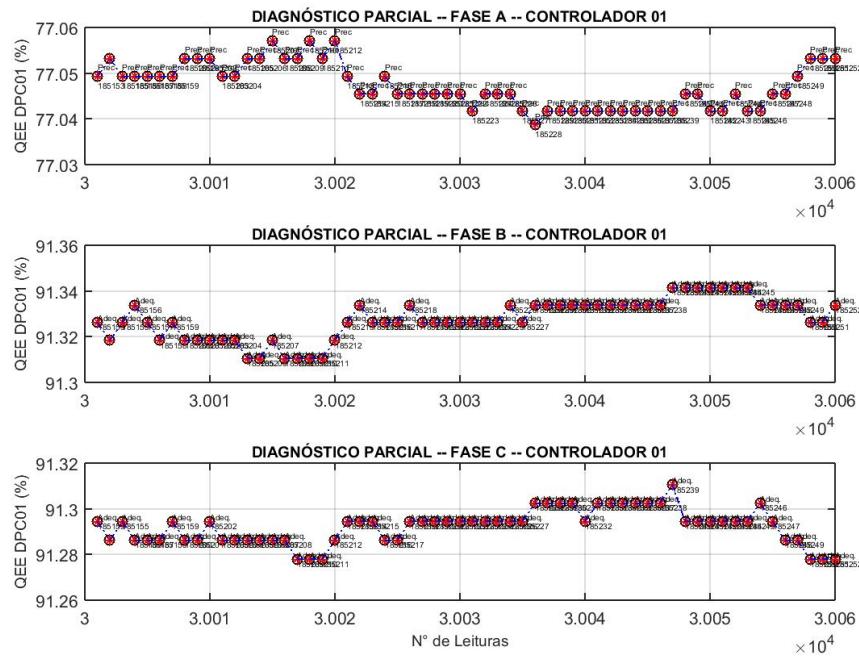


Figura 67 – Resultado - controlador 01 no período entre 18:51:51até 18:52:51.

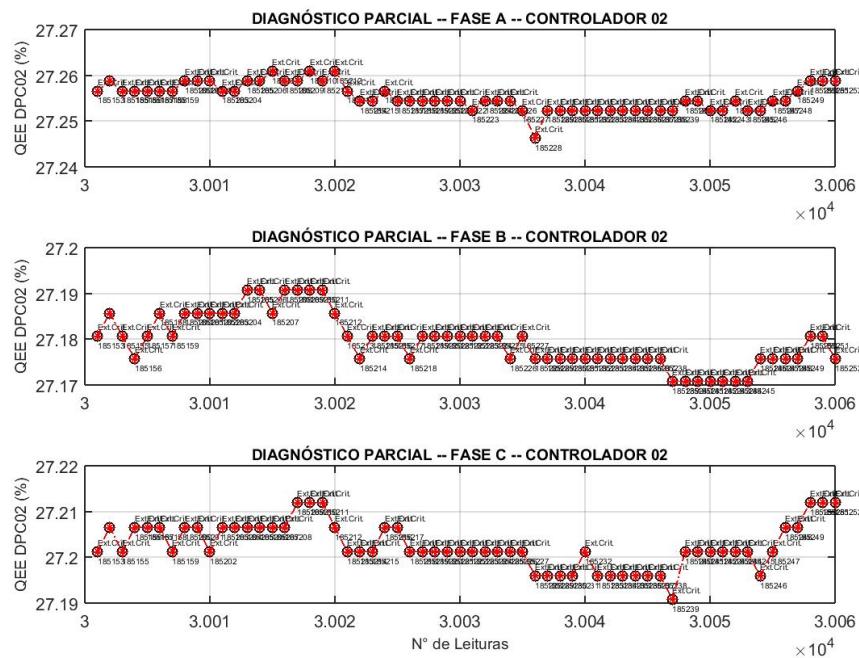


Figura 68 – Resultado - controlador 02 no período entre 18:51:51até 18:52:51.

O comportamento descrito anteriormente pode ser explicado devido o fato da

empresa não funcionar após as 18:00:00 horas. Ou seja, as máquinas indutivas foram desligadas, fazendo com que a indústria comece apresentar fator de potência capacitivo com valores abaixo de - 0,5. Observando a Figura 67, tem-se que apenas a fase A apresenta distorção harmônica total de corrente, e isso é explicado porque a iluminação das lâmpadas de potência que fazem uso de reatores eletrônicos estarem conectados na fase A dos sistema elétrico.

Esse comportamento dura todo o período que compreende das 18:00:00 horas da tarde as 06:00:00 horas da manhã, quando a indústria começa a funcionar normalmente. Apesar da indústria apresentar baixo fator de potência capacitivo durante o período noturno das (18:00:00 ás 06:00:00) horas, a mesma não está sendo punida através de multa indenizatórias. Isso é justificado, pois a fábrica não opera durante esse período, ou seja, não possui consumo de potência significativo, o que faz com que a multa não se aplique para tal indicador.

A partir das 06:00:16 horas da manhã as cargas indutivas são ligadas e a empresa começa apresentar fator de potência indutivo novamente, porém com valores abaixo de 0,90 o que justifica o diagnóstico precário com valores entre 75% e 80% durante uns 2 minutos. Logo após começa o fator de potência se acomoda para valores acima de 0,92 o que justifica a melhora da QEE para o controlador 02 que começa apresentar diagnóstico adequado com valores superior a 90%, conforme indicado na Figura 69.

Já o controlador 03, ver Figura 70, apresenta uma redução no diagnóstico para condição precária com valores percentuais na faixa dos 77%, isso ocorre devido a uma elevação nos níveis de tensão de linha para o sistema trifásico, que apresentado valores acima de 411 volts.

A partir das 07:16:38 horas os níveis de tensão de linha se acomodam com valores na faixa dos 399 volts. Até as 10:11:41 horas os diagnósticos apresentados são adequados com valores acima da 90% para fase A e de aproximadamente 86% para fases B e C.

Assim concluiríesse aqui a análise de aproximadamente 24 horas que compreende entre as 10:00:00 horas da manhã do dia 19-03-2015 as 10:00:00 horas da manhã do dia 20-03-2015.

7.3 Comparação entre as Inferências de: Mamdani Clássico, Larsen, e Hamacher

A discussão dos resultados descrita neste tópico, foi elaborada tendo como base uma amostra de 3 leituras que foram retiradas da modelagem completa do sistema, apresentada no Tópico 7.2.

Para que se possa fazer um melhor análise dos resultados com relação a com-

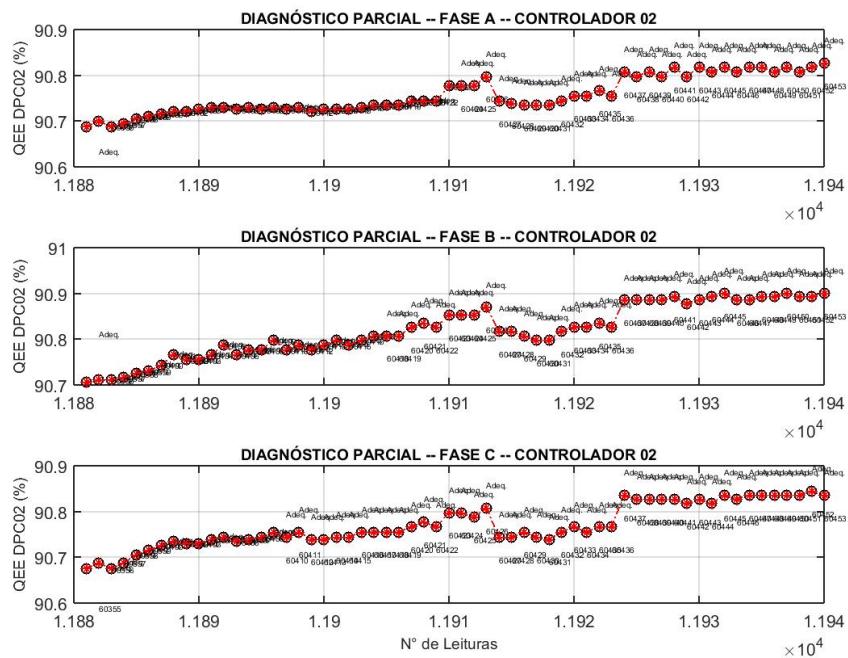


Figura 69 – Resultado - controlador 02 no período entre 06:02:32 até 06:03:32.

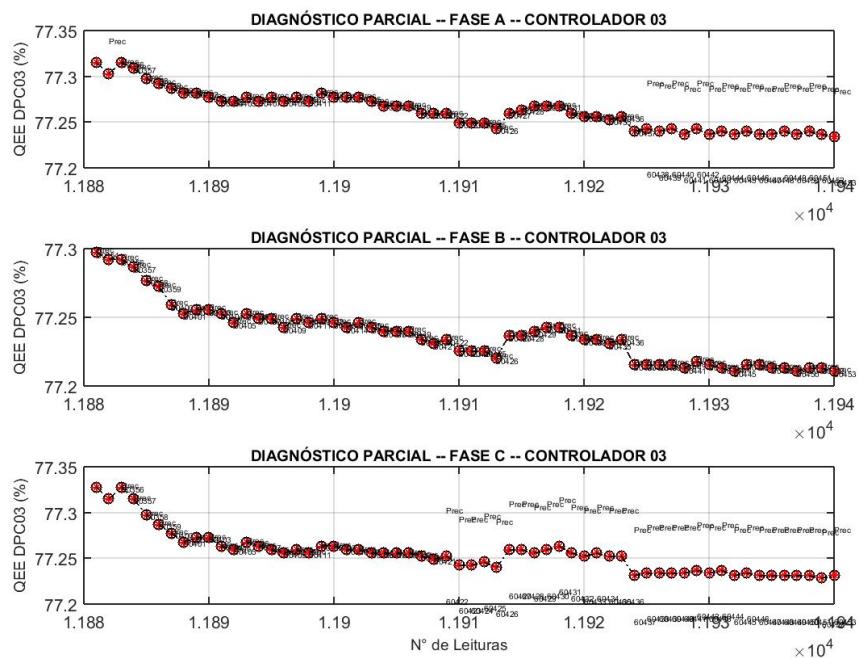


Figura 70 – Resultado - controlador 03 no período entre 06:02:32 até 06:03:32.

paração das inferências de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher, é importante que sejam identificadas os comportamentos das suas respectivas t-normas e t-conormas. Desta forma, a discussão dos resultados descritas neste tópico, tem como condições

descritas pelas Equações (27) e (28).

- **Comparação entre t-normas:**

Seja $x, y \in [0, 1]$, logo $(1 - y) \in [0, 1]$, e consequentemente: $0 \leq x(1 - y) + y \leq 1 \Rightarrow 0 \leq x + y - xy \leq 1$. Assim:

$$1 \leq \frac{1}{x+y-xy} \Rightarrow xy \leq \frac{xy}{x+y-xy}, \text{ pois } x \geq 0, y \geq 0$$

Portanto, tem-se que $T_G(x, y) \geq T_H(x, y)$, para todo $x, y \in [0, 1]$.

Como a t-norma de Gödel é a maior das t-normas, e a t-norma drástica é a menor das t-normas, pode-se afirmar que:

$$T_G(x, y) \geq T_{H,\gamma=0}(x, y) \geq T_P(x, y) \quad (27)$$

Considerando as t-conormas N-duais das t-normas acima descritas, podem-se afirmar que:

- **Comparação entre t-conormas:**

$$S_G(x, y) \leq S_{H,\gamma=0}(x, y) \leq S_P(x, y) \quad (28)$$

Pode-se afirmar assim que a t-conorma drástica é a maior e a t-conorma de Gödel é a menor de todas as t-conormas. Já a t-conorma de Hamacher é menor que a t-conorma do produto.

Se for comparadas as saídas crisp apresentados nas Tabela 17 e 18, observa-se que ao se comparar as inferências utilizadas no modelo proposto, existem em alguns casos, pequenas variações com relação aos valores percentuais para as casas decimais, porém, não existe variação com relação aos resultados linguísticos apresentados. Outro fator que pode ser observado é que não existe um padrão nos resultados numéricos que confirme as condições apresentadas nas Equações (27) e (28).

Desta forma, as seguintes indagações precisam ser respondidas:

- As equações (27) e (28), são válidas para o sistema modelado?
- De que forma as inferências estão influenciando nos resultados finais?
- Como o método de defuzzificação está influenciando nos resultados obtidos?
- Dentre as inferências utilizadas, qual se aplica melhor ao sistema?

Tabela 17 – Defuzzificação para o controlador 04 pela inferência pelos métodos de inferência de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher.

Resultados Crisp para o Controlador 01				
Data	Hora	Inf. Mamdani Clássico / Defuzzificação - Centro de Gravidade		
		Diagnóstico. FA	Diagnóstico. FB	Diagnóstico. FC
19032015	161321	77,01% - Prec.	62,01% - Crít.	91,46% - Adeq.
19032015	161326	77,01% - Prec.	77,00% - Prec.	91,46% - Adeq.
20032015	171008	77,09% - Prec.	67,46% - Crít.	91,25% - Adeq.
Data	Hora	Inf. Larsen / Defuzzificação - Centro de Gravidade		
		Diagnóstico. FA	Diagnóstico. FB	Diagnóstico. FC
19032015	161321	77,01% - Prec.	62,01% - Crít.	91,46% - Adeq.
19032015	161326	77,01% - Prec.	77,00% - Prec.	91,46% - Adeq.
20032015	171008	77,09% - Prec.	68,94% - Crít.	91,25% - Adeq.
Data	Hora	Inf. Hamacher / Defuzzificação - Centro de Gravidade		
		Diagnóstico. FA	Diagnóstico. FB	Diagnóstico. FC
19032015	161321	77,01% - Prec.	62,01% - Crít.	91,46% - Adeq.
19032015	161326	77,01% - Prec.	77,00% - Prec.	91,46% - Adeq.
20032015	171008	77,09% - Prec.	68,19% - Crít.	91,25% - Adeq.

Tabela 18 – Defuzzificação para o controlador 04 pela inferência pelos métodos de inferência de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher.

Resultados Crisp para o Controlador 04				
Data	Hora	Inf. Mamdani Clássico / Defuzzificação - Centro de Gravidade		
		Diagnóstico. FA	Diagnóstico. FB	Diagnóstico. FC
19032015	161321	77,01% - Prec.	31,75% - Ext. Crít.	61,94% - Crít.
19032015	161326	77,01% - Prec.	77,00% - Prec.	76,96% - Prec.
20032015	171008	77,09% - Prec.	67,46% - Crít.	65,02% - Crít.
Data	Hora	Inf. Larsen / Defuzzificação - Centro de Gravidade		
		Diagnóstico. FA	Diagnóstico. FB	Diagnóstico. FC
19032015	161321	77,21% - Prec.	30,59% - Ext. Crít.	62,12% - Crít.
19032015	161326	77,01% - Prec.	77,14% - Prec.	76,98% - Prec.
20032015	171008	77,25% - Prec.	66,29% - Crít.	64,04% - Crít.
Data	Hora	Inf. Hamacher / Defuzzificação - Centro de Gravidade		
		Diagnóstico. FA	Diagnóstico. FB	Diagnóstico. FC
19032015	161321	77,09% - Prec.	31,89% - Ext. Crít.	62,04% - Crít.
19032015	161326	77,01% - Prec.	77,06% - Prec.	76,97% - Prec.
20032015	171008	77,14% - Prec.	66,90% - Crít.	64,94% - Crít.

Para responder as indagações acima descritas, é preciso fazer um comparação entre os resultados das operações lógicas realizadas durante os processos de inferências fuzzy. Para isso será levando em consideração a arquitetura do algoritmo apresentado no Anexo A, a partir da analise das Tabelas 17 e 18, que apresentam os resultados crisp para o controladores 01 e 04 realizadas durante os processos de inferências de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher, comparando os resultados das operações das normas triangulares que saem do MTD, apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Conclui-se assim, que as equações (27) e (28) são válidas, porém tal comparação só será verdadeira em casos onde os números fuzzy de entrada sejam iguais, isso tanto para t-normas como para t-conormas. Isso acontece pelo fato das normas triangulares realizarem operações associativas sobre os valores de entrada. Desta forma, em casos onde existam mais de duas operações algébricas a serem realizadas, sobre t-normas e t-conormas N-duais que realizem em algum momento (adição, subtração, divisão, e produto), as t-normas irão obedecer a Equação (27), pois estão sendo aplicadas sobre valores de entrada iguais. Porém, as t-conormas não irão obedecer a Equação (28), pois estas não estão sendo aplicadas sobre os mesmos valores de entrada, já que os dados de entrada para as t-conormas são modificados pela t-norma utilizada. Tal fato, explica como as inferências utilizadas estão influenciando nos resultados finais, pois na inferência de Mamdani Clássico, em distinção a Larsen e Hamacher, as t-normas e t-conormas não fazem uso de propriedades algébricas.

Analisando-se a leitura 171008 - Fase B, apresentada na Tabela 19, percebe-se a existência de um padrão para os resultados das t-normas obtidos se comparadas as inferências utilizadas. Ou seja, a maior das t-normas é a de Gödel, e a menor das t-normas é a do produto, isso considerando situações onde várias regras foram ativadas. Veja que todos os valores onde apenas uma regra foi ativada, os resultados para ambas inferência são iguais, demonstrando que estas não sofrem interferência de outras variáveis, já que são modelados em comparação com seus respectivos elementos neutros.

Analisando agora os resultados obtidos para as t-conormas, perceberemos que não existe um padrão para os resultados obtidos que comprove a Equação (28). Isso acontece porque as t-conormas N-duais do Produto e de Hamacher são aplicadas sobre valores de entrada distintos, ou seja, modificados pelas suas respectivas t-normas.

Outro fator importante a ser observado, é que os controladores 02, 03, e 04 utilizam como dados de entrada as respectivas saídas fuzzy dos seus controladores antecedentes. Assim, os resultados algébricos realizados pelos métodos de inferência dos controladores antecedentes são carregados para os controladores subsequentes sem que haja perda de informações. Isso justifica os resultados apresentados pela Tabela 20, já que não existe um padrão entre as operações lógicas de forma a obedecer as Equações (27) e (28). Em contrapartida, essa forma de implementação, traz vantagens, pois quando defuzzificamos uma saída para depois fuzzifica-la novamente na entrada de outro controlador, ocorrerá perda de informações, podendo prejudicar os resultados que se desejam obter. Tem-se também uma redução no custo computacional, já que elimina-se do sistema três processos de fuzzificação, que seriam necessários para os controladores 02, 03, e 04.

Partindo do que foi descrito acima, pode-se responder a terceira indagação. Como já foi dito anteriormente, tem-se um padrão nos diagnósticos linguísticos crisp

Tabela 19 – Resultado das operações lógicas no sistema de inferências de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher para o controlador 01.

Resultados fuzzy para o Controlador 01			
Data	Hora	Operações no Sistema de Inferência de Mamdani Clássico	
		t-normas para Fase A	t-conorma para Fase A
19032015	161321	0,4400	0,4400
19032015	161326	0,4400	0,4400
20032015	171008	0,3633	0,3633
Data	Hora	t-normas para Fase B	t-conorma para Fase B
19032015	161321	0,4333	0,4333
19032015	161326	0,4500	0,4500
20032015	171008	0,3633; 0,3633	0,3633
Data	Hora	t-normas para Fase C	t-conorma para Fase C
19032015	161321	0,5067	0,5067
19032015	161326	0,5067	0,5067
20032015	171008	0,4133	0,4133
Data	Hora	Operações no Sistema de Inferência de Larsen	
		t-normas para Fase A	t-conorma para Fase A
19032015	161321	0,4400	0,4400
19032015	161326	0,4400	0,4400
20032015	171008	0,3633	0,3633
Data	Hora	t-normas para Fase B	t-conorma para Fase B
19032015	161321	0,4333	0,4333
19032015	161326	0,4500	0,4500
20032015	171008	0,2165; 0,1468	0,3315
Data	Hora	t-normas para Fase C	t-conorma para Fase C
19032015	161321	0,5067	0,5067
19032015	161326	0,5067	0,5067
20032015	171008	0,4133	0,4133
Data	Hora	Operações no Sistema de Inferência de Hamacher	
		t-normas para Fase A	t-conorma para Fase A
19032015	161321	0,4400	0,4400
19032015	161326	0,4400	0,4400
20032015	171008	0,3633	0,3633
Data	Hora	t-normas para Fase B	t-conorma para Fase B
19032015	161321	0,4333	0,4333
19032015	161326	0,4500	0,4500
20032015	171008	0,2915; 0,2365	0,4191
Data	Hora	t-normas para Fase C	t-conorma para Fase C
19032015	161321	0,5067	0,5067
19032015	161326	0,5067	0,5067
20032015	171008	0,4133	0,4133

e com pouca variação nos resultados percentuais se for comparado as inferências utilizadas. Assim os diagnósticos apresentados nas Tabelas 17 e 18, são os resultados

Tabela 20 – Resultado das operações lógicas no sistema de inferências de Mamdani Clássico, Larsen e Hamacher para o controlador 04.

Resultados fuzzy para o Controlador 04			
Data	Hora	Operações no Sistema de Inferência de Mamdani Clássico	
		t-normas para Fase A	t-conorma para Fase A
19032015	161321	0,4400	0,4400
19032015	161326	0,4400	0,4400
20032015	171008	0,3633	0,3633
Data	Hora	t-normas para Fase B	
		t-conorma para Fase B	
19032015	161321	0,1700; 0,4333	0,4333
19032015	161326	0,4500	0,4500
20032015	171008	0,3633; 0,3633	0,3633
Data	Hora	t-normas para Fase C	
		t-conorma para Fase C	
19032015	161321	0,5067	0,5067
19032015	161326	0,5067	0,5067
20032015	171008	01700; 0,4133	0,4133
Data	Hora	Operações no Sistema de Inferência de Larsen	
		t-normas para Fase A	t-conorma para Fase A
19032015	161321	0,2613	0,2613
19032015	161326	0,4400	0,4400
20032015	171008	0,2095	0,2095
Data	Hora	t-normas para Fase B	
		t-conorma para Fase B	
19032015	161321	0,0737; 0,2860	0,3386
19032015	161326	0,3240	0,3240
20032015	171008	0,1072; 0,1581	0,2483
Data	Hora	t-normas para Fase C	
		t-conorma para Fase C	
19032015	161321	0,3344	0,3344
19032015	161326	0,4712	0,4712
20032015	171008	0,0703; 0,2728	0,3239
Data	Hora	Operações no Sistema de Inferência de Hamacher	
		t-normas para Fase A	t-conorma para Fase A
19032015	161321	0,3620	0,3620
19032015	161326	0,4400	0,4400
20032015	171008	0,3232	0,3232
Data	Hora	t-normas para Fase B	
		t-conorma para Fase B	
19032015	161321	0,1391; 0,3543	0,4153
19032015	161326	0,3830	0,3830
20032015	171008	0,2175; 0,2632	0,3884
Data	Hora	t-normas para Fase C	
		t-conorma para Fase C	
19032015	161321	0,4018	0,4018
19032015	161326	0,4881	0,4881
20032015	171008	0,1370; 0,3408	0,4032

parciais crisp retirados de cada controlador, também denominados de diagnóstico parcial 01, 02, 03 e 04.

Esses diagnósticos sofrem influência direta do método de defuzzificação utilizado, sendo que foi adotado para este projeto o método de centro de gravidade. Esse tipo de defuzzificação foi escolhido pelo fato do mesmo se adequar melhor ao nosso problema, isso em comparação com os métodos centro dos máximos e média dos máximos. Como o centro de gravidade, é um método que considera o peso que o grau das pertinências exercem sobre a região ativada, têm-se que as variações que ocorrem para os diferentes tipos de inferências, estão diretamente relacionados aos graus de pertinências destas, na saída do MTD. Isso pode ser facilmente observado ao se comparar as Figuras 71, 72, e 73.

Respondendo a quarta e última indagação, pode-se afirmar que apesar dos resultados obtidos para o modelo terem sido bem próximos, o método de inferência de Mamdani Clássico se aplica melhor ao sistema modelado. Isso ocorre porque este tipo de inferência não faz uso de operações algébricas, o que diminui bastante o número de operações matemáticas no sistema, diminuindo o custo computacional e automaticamente aumentando a eficiência do sistema no que diz respeito a tempo de processamento.

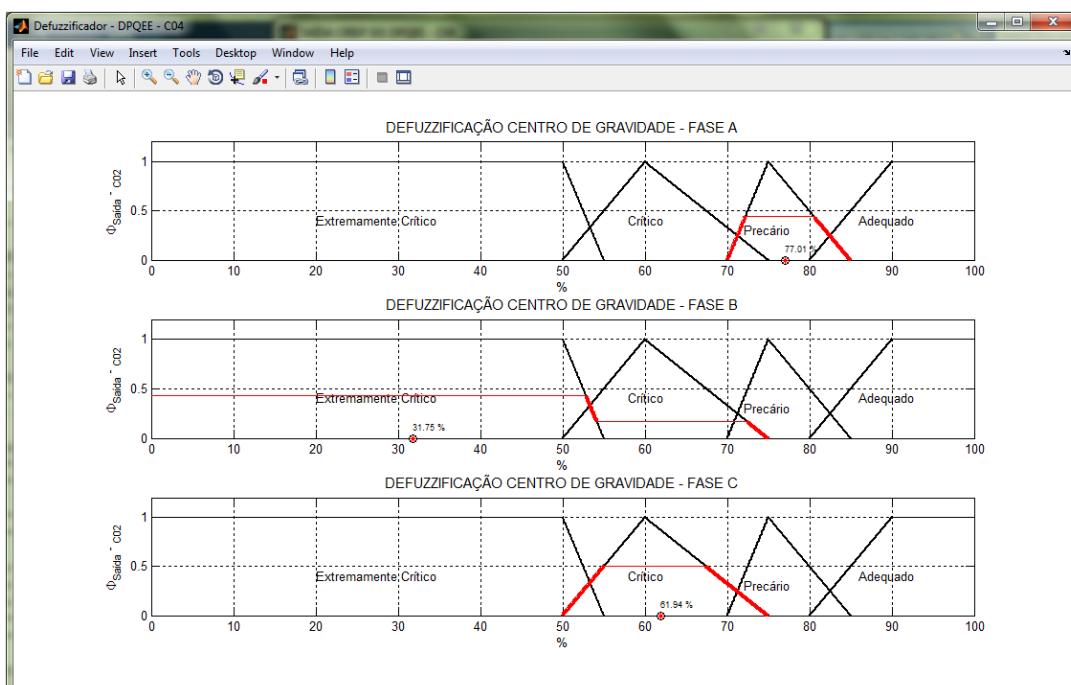


Figura 71 – Defuzzificação pelo método de centro de gravidade aplicado sobre a inferência de Mamdani Clássico para leitura das 16:13:21 horas.

No Capítulo 8, têm-se as conclusões sobre o projeto de pesquisa aqui apresentado. E no Capítulo 9 são feitas sugestões de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir dos resultados apresentados, de forma a resolver problemas encontrados no intuito de melhorar a o desempenho do algoritmo proposto.

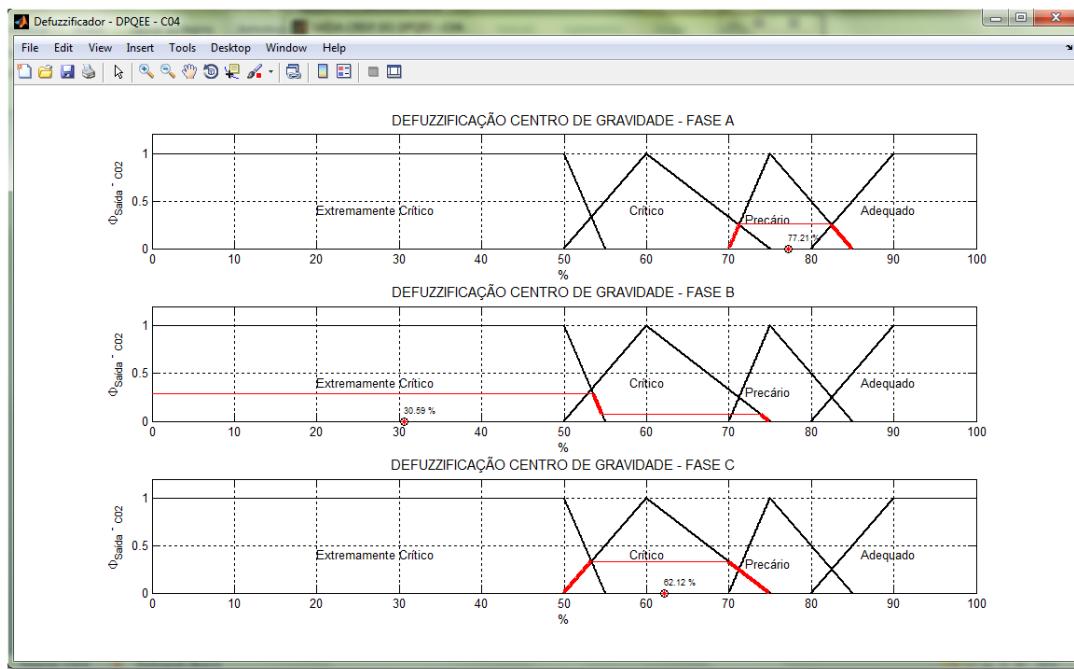


Figura 72 – Defuzzificação pelo método de centro de gravidade aplicado sobre a inferência de Larsen para leitura das 16:13:21 horas.

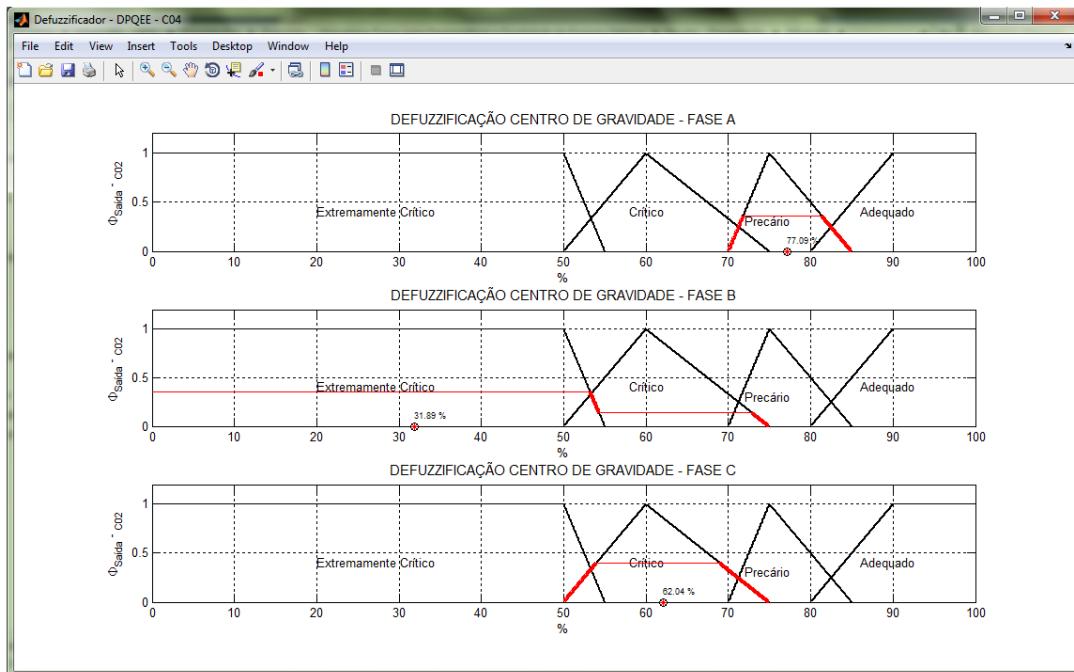


Figura 73 – Defuzzificação pelo método de centro de gravidade aplicado sobre a inferência de Hamacher para leitura das 16:13:21 horas.

8 Conclusão

A partir do que foi apresentado nos Capítulos 6, 7, diversas conclusões podem ser descritas. Com relação a metodologia adotada, verifica-se que o algoritmo proposto pela Figura 27 e pelo Anexo A, atendeu aos objetivos propostos no projeto de pesquisa, dentre os quais pode-se destacar:

A possibilidade de se obter um diagnóstico linguístico e percentual para cada indicador analisado, o que facilitaria o acompanhamento em tempo real desses indicadores. A possibilidade de inserção de novos módulos, o que permitiria que o diagnóstico atingisse novos indicadores. Visualização do diagnóstico em tempo real o que permitiria um ação corretiva mais rápida em casos de problemas. Acesso aos dados modelados através de arquivos visuais (figuras .jpg dos gráficos) e arquivos de texto .txt, gravados em disco rígido. Tem-se também que a utilização dos controladores fuzzy em modelo cascata fez com que as informações obtidas para os controladores antecessores fossem passadas para os controladores posteriores, de forma a garantir a continuidade das informações. O algoritmo desenvolvido ainda permite a inserção de novos métodos de inferências e de novos métodos de defuzzificação, isso pode auxiliar no desenvolvimento de novas pesquisas em áreas distintas, pois todo o processo da modelagem é conhecido, o que facilita a realização de alterações caso sejam necessárias.

Com relação aos resultados obtidos para a modelagem aplicada usando o sistema de inferência de Mamdani Clássico, conclui-se que:

O algoritmo desenvolvido atendeu as expectativas de forma bastante satisfatória. Foi possível fazer um diagnóstico tanto linguístico como percentual para cada indicador analisado, logicamente alguns detalhes precisam ser melhorados para que consigamos uma aplicação comercial. Tais como, melhorar a velocidade de processamento dos dados, através de otimização do algoritmo e da paralelização do código para o sistema trifásico, por exemplo. Implementar um sistema de reconhecimento para controle de horário de funcionamento, ou seja, quando a fábrica não estiver em funcionamento, o fator de potência capacitivo não pode ser considerado como uma qualidade ruim, já que este está auxiliando e não prejudicando o sistema. A implementação do código em outras linguagens de programação que permitam uma aplicação comercial para o algoritmo, tais como: Java, C++, entre outros.

Desenvolver um sistema que faça o tratamento dos resultados obtidos a cada segundo, por exemplo: a interpolação destes em períodos de 10 ou 15 minutos, de forma a fornecer resultados para períodos longos de tempo, o que permitirá analisar também o tempo de duração dos distúrbios.

Com relação a comparação entre métodos de inferências utilizados, tem-se que:

Todos os métodos nos deram respostas bastante satisfatórias. Percebe-se que em termos de diagnóstico os três tipos de inferências modelados foram bastante acurados e precisos. Porém, o método de Mamdani Clássico foi mais adequado ao sistema por apresentar um número menor de operações algébricas que os métodos de inferência de Larsen e Hamacher. Isso logicamente acarreta em um custo computacional menor o que melhora a eficiência do algoritmo, e por esse motivo o método de inferência de Mamdani Clássico é o mais adequado para o modelo proposto, se comparado com os métodos de Larsen e Hamacher.

Tem-se também que o método de defuzzificação utilizado (centro de gravidade) faz com que a valoração fuzzy das pertinências de saída tenham um forte peso sobre os resultados defuzzificados. O fato de terem sido utilizadas entradas fuzzy nos controladores 02, 03, e 04, fez com que a quantidade de processos fossem reduzidos, e também permitiu que as informações das saídas (tomadas de decisão em cada controlador) fossem passadas adiante sem que houvessem perdas que normalmente ocorrem durante os processos de defuzzificação.

O uso de entradas fuzzy nos controladores consequentes influenciou fortemente nas valorações das pertinências fuzzy de saída, e automaticamente, os resultados crisp durante o processo de defuzzificação, já que as valorações de saída fuzzy, são dependentes do número de operações realizadas durante a inferência. Tal fato justifica as variações percentuais das respostas crisp (diagnósticos numéricos), isso levando em consideração os tipos de inferência utilizados. Mesmo assim, os resultados obtidos para ambas inferências utilizadas, foram satisfatórios e dentro dos limites previstos, o que torna o método utilizado viável se for comparado as vantagens com as possíveis desvantagens.

Com relação as dificuldades encontradas durante o processo de pesquisa:

Pode-se destacar primeiramente, o desenvolvimento do modelo em código script, já que é extremamente difícil encontrar referencias bibliográficas com relação ao desenvolvimento de métodos de implementação computacional para algoritmos fuzzy. Como exemplo tem-se o fato que muitas referências afirmam que pode-se usar a saída fuzzy como entrada para outros controladores fuzzy, porém nenhuma destas demonstram como isso é possível, quais critérios devem ser adotados, dentre outras características necessárias.

O fato de trabalhar com uma base de dados relativamente grande, foi outro desafio. Ou seja, conseguir implementar o algoritmo proposto de forma que fosse possível modelar a base de dados buscando chegar o mais próximo possível do tempo

real. Logicamente, não é possível modelar o sistema em tempo real, devido o *delay* que ocorre durante o processamento. Aliado a isso tem-se também o fato de que a versão do matlab utilizado apresenta perda de eficiência (processamento) durante a atualização dos handles. Assim, funções de visualizações gráficas, como por exemplo: métodos de defuzzificação, só são viáveis quando se desejar analisar um dado específico, não sendo aconselhado a utilização deste durante o processamento normal do algoritmo, pois o tempo de processamento aumenta drasticamente.

É importante salientar, que as novas versões do matlab (2015) apresentam uma forte melhora com relação a velocidade de processamento durante o uso de *handles* dinâmicos. Para isso, os desenvolvedores do matlab propuseram que a atualização dos *handles* fossem feitas através do software OpenGL, no intuito de aumentar a velocidade de processamento das imagens para sistemas dinâmicos.

Outra dificuldade encontrada, foi o armazenamento dos dados. Como tém-se uma quantidade relativamente grande de dados, o armazenamento diário dessas informações requer um significativo espaço em disco rígido. Assim seria importante que essas informações fossem descartadas após um determinado período de tempo no intuito de que haja espaço para o armazenamento de novas informações.

Com base nos resultados apresentados e nas conclusões descritas acima, pode-se afirmar que novas pesquisas podem ser desenvolvidas. No Capítulo 9, são apresentadas sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir do que foi apresentado nesta dissertação.

9 Trabalhos Futuros

São destacadas aqui algumas propostas de trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir da pesquisa aqui apresentada:

- Tratamento estatístico dos resultados, no intuito de: obter respostas para intervalos de tempo permitindo a análise do tempo de duração dos distúrbios modelados, e melhora na interpretação dos resultados em períodos longos de tempo, como por exemplo 24 horas.
- Implementação do código em outras linguagens de programação;
- Desenvolvimento de um sistema embarcado para realização do diagnóstico em tempo real;
- Inserção de novos módulos para diagnósticos de outros indicadores;
- Paralelização e otimização do código;
- Inserção de novos método de inferência e novos métodos de defuzzificação;
- Implementação do algoritmo de diagnóstico considerando novos tipos de configuração, no intuito de comparar com o que foi desenvolvido.

Referências

- ABREU, J. **Visão geral sobre Qualidade de Energia Elétrica**. Brasília-DF, 2005.
- ALVES, M. **Qualidade da Energia Elétrica**. Minas Gerais: [s.n.], 2010. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica.
- ANEEL. **Resolução Normativa 505**. [S.l.], 2001. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Segunda edição. [S.l.], 2003. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Terceira edição. [S.l.], 2008. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANEEL. **Resolução Normativa 414**. [S.l.], 2010. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. **Power System Harmonics**. 2003.
- ARRUDA, E. **Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade de Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet**. Dissertação (Mestrado), 2003. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - USP/SP.
- BARROS, L.; BASSANEZI, R. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. Campinas, SP: UNICAMP/IMECC, 2006.
- BEDREGAL, B. Introdução a teoria dos conjuntos fuzzy e suas aplicações. **XVI Encontro de Modelagem Computacional da UESC**, Ilhéus, 2013.
- BONATTO, B.; MERTEUS, E.; FERNANDES, F. Diagnóstico da qualidade de energia elétrica em clientes industriais. **III Seminário Brasileiro sobre a Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE**, Brasília, 1999.
- CHATURVEDI, D. **Soft Computing - Techniques and its Applications in Electrical Engineering**. Angra, India: DEEMED UNIVERSITY, 2008.
- DECKMANN, M.; POMILIO, J. **Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica**. 2010. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação.
- EPE. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. [S.l.], 2014. Ministério de Minas e Energia.
- FERREIRA, D. **Análises de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência**. Tese (Doutorado), 2010. Programa de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia.
- FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. 2014.
- GOH, H.; TING, H.; CHUA, Q.; LEE, S.; GOH, K.; TEO, K. Power quality diagnosis in distribution network using wavelet transform. **XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Fortaleza, 2013.

- GONÇALVES, B. **Metodologia para Diagnosticar a Qualidade de Energia Elétrica Referente a Distorção Harmônica em Sistema Trifásico de Baixa Tensão Utilizando Lógica Fuzzy.** Dissertação (Mestrado), 2010. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- IEC61000. **Electromagnetic Compatibility IEC61000 Series.** [S.l.], 1990–2006. International Electrotechnical Commission.
- IEEE1159. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** [S.l.], 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- JUNIOR, A. **Gerenciamento de Energia Elétrica: Metodologias para Análise da Qualidade e Consumo Eficiente Aplicado ao IFBA, Campus de Vitória da Conquista.** Bahia: [s.n.], 2011.
- KLEMENT, E.; MESIAR, R.; PAD, E. **Triangular Norms.** Poland, Volume VIII, 2000.
- KUMAR, V.; GAWER, S.; KUMAR, T. Power quality analysis using wavelet transform - a review. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, India, 2014.
- KUSKO, A.; THOMPSON, M. **Power Quality in Electrical Systems.** U.S.A, 2007.
- LIMA, F.; MINUSSI, C. Uma abordagem imuno wavelet aplicada na detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. **XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Fortaleza, 2013.
- MALANGE, F. **Rede Neuro Fuzzy Wavelet para Detecção e Classificação de Anomalias de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência.** Tese (Doutorado), 2010. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- MELO, M. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: Proposta de metodologia. **Revista Produto & Produção**, Volume IX, p. p.21–25, Outubro 2008.
- NEEE. **Resenha Energética Brasileira - Exercício 2014.** [S.l.], 2015. Ministério de Minas e Energia.
- OLIVEIRA, J.; JUNIOR, A.; DELAIBA, A. **Relatório Técnico – Definições de Padrões de Referência: Distorções Harmônicas, Desequilíbrios de Tensão, Flutuações de Tensão e Variação de Tensão de Curta Duração.** [S.l.], 2014.
- PALMEIRA, E. **On Extension of Fuzzy Connectives.** Tese (Doutorado), 2013. Programa de Pós Graduação em Informática e Matemática Aplicada.
- PRODIST. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.** [S.l.], 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- REY, G.; MUNETA, L. **Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data.** Croatia, 2011.
- ROSA, F. **Harmonics and Power Systems.** Missouri - U.S.A, 2006.

- SILVA, L. Efeito das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa. Dissertação (Mestrado), 2008. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - UNESP/SP.
- SOUZA, W. Desenvolvimento de Sistema de Aquisição e Processamento para Aplicações em Qualidade de Energia. Dissertação (Mestrado), 2011. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - UNESP/SP.
- TERANO, T.; ASAI, K.; SUGENO, M. *Applied Fuzzy Systems*. Tokyo, Japan, 1994.
- TRANCREDI, M.; ABBUD, O. Porque o Brasil está Trocando as Hidrelétricas e seus Reservatórios por Energia Mais Cara e Poluente. [S.l.], 2013.

Anexos

ANEXO A – Arquitetura do algoritmo modelado.

