

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE**

**UMA METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO  
DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS DE  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE  
TENDÊNCIAS BASEADA EM LÓGICA FUZZY**

**NEWTON TEIXEIRA DO NASCIMENTO JÚNIOR**

**SÃO LUÍS**  
**2010**

---

NEWTON TEIXEIRA DO NASCIMENTO JÚNIOR

*Uma metodologia para monitoramento das condições operativas de transformadores de potência e análise de tendências baseada em lógica fuzzy*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de MESTRE em Engenharia de Eletricidade.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez — UFMA

Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria del Rosário Girardi — UFMA

SÃO LUÍS

2010

Nascimento Júnior, Newton Teixeira do.

Uma metodologia para monitoramento das condições operativas de transformadores de potência e análise de tendências baseada em lógica fuzzy / Newton Teixeira do Nascimento Júnior. — 2010.158 f.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, 2010.

1. Modelagem Fuzzy — Transformadores de potência
2. Equipamentos elétricos de potência — Monitoramento
3. Transformadores de potência — Condições Operacionais I.

Título.

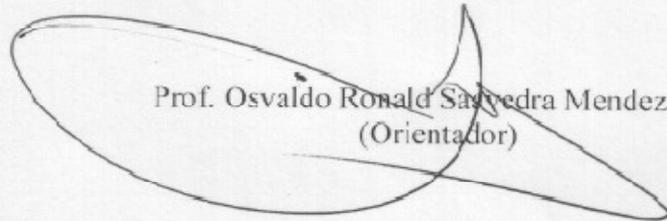
CDU

621.314: 004.312.462

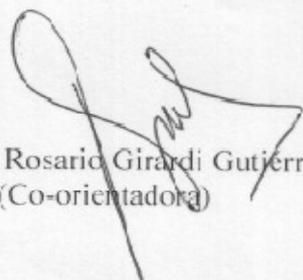
**UMA METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO  
DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS DE TRANSFORMADORES  
DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE TENDÊNCIAS BASEADA  
EM LÓGICA FUZZY**

**Newton Teixeira do Nascimento Junior**

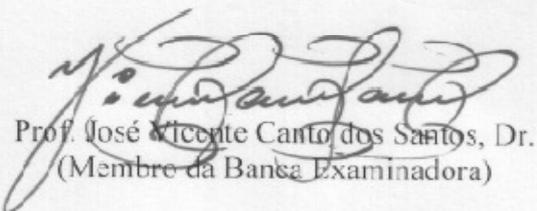
Dissertação aprovada em 05 de outubro de 2010.



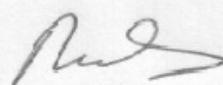
Prof. Osvaldo Ronald Salceda Mendez, Dr.  
(Orientador)



Profa. María del Rosario Girardi Gutiérrez, Ph.D.  
(Co-orientadora)



Prof. José Vicente Canto dos Santos, Dr.  
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. José Eduardo Onoda Pessanha, Dr.  
(Membro da Banca Examinadora)

---

# AGRADECIMENTOS

Ao SENHOR DEUS, Criador dos Céus e da Terra, dedico esta obra. Obra de minhas mãos lhe dedico. A TI SENHOR DEUS meu, são o louvor dos meus lábios, o dobrar dos meus joelhos e o erguer de minhas mãos. Agradeço-te pelo Dom da vida que Tu bondosamente me concedeste, a Misericórdia a mim estendida e a Graça Imerecida sobre minha vida.

A toda minha família, em especial a minha mãe Telma Maria Ferreira Jacob e minha avó Maria do Carmo Ferreira da Silva. Vovó, eu não me esqueci do dinheiro da passagem. Vocês são as grandes mulheres da minha vida. Um grande beijo no coração e Muito obrigado!

À minha namorada Alexandra Mendes dos Santos, por sua compreensão nos momentos de ausência durante a produção deste trabalho. Muito Obrigado!

Aos meus grandes amigos, em especial a Gilson Belfort, Acrísio, William, Marcelo, Valéria, Taíse, Juliana, Ravi, Roosevelt, Joselma, Helines, Eduardo Werley, Fernando Lucius, Fernando Almeida, Karina, Celi Regina, Maria. Há amigos mais chegados que irmãos. Muito Obrigado!

À ELETROBRÁS ELETRONORTE, na pessoa do gerente do CEOR/TM — Engenheiro Décio Bueno Junior — que permitiu que eu terminasse de concluir as disciplinas obrigatórias quando ingressei na empresa e desenvolvesse o projeto com parceiros de pesquisa na Universidade. Muito Obrigado!

A todos os meus colegas de trabalho do Centro de Operação Regional do Maranhão/Tocantins (CEOR/TM), em especial (por ordem alfabética) a Adelmo Fernandes, Aniceto de Deus, José Antonio, Sebastião Serrão Correa, Sérgio Abreu; e aos colegas Bruno Gerude (Divisão de Transmissão de São Luís I – CMAL) e Jorge Farid (Divisão de Transmissão de São Luís II – CMAU), por terem me ajudado tantas vezes com informações sobre sistemas de potência elétrica. Um Grande Abraço e Muito Obrigado!

---

Aos meus grandes parceiros de pesquisa, a saber, o Engenheiro mestrando Sérgio Augusto (Programação e Modelagem Fuzzy no MATLAB®), Engenheiro Mestre e doutorando Shigeaki Leite Lima (Modelagem Fuzzy de Transformadores) e ao Bacharel e Mestre em Matemática Fábio Nogueira Silva (Modelagem da Análise de Tendências). Sem ajuda e expertise de vocês seria muito mais difícil e demorada a conclusão deste trabalho. Muito obrigado meus amigos pelas suas horas a mim cedidas durante nossas reuniões de trabalho. Um grande abraço!

À minha amiga Danielle Nascimento Cardoso pelo seu constante incentivo e pela ajuda com a revisão deste trabalho. Muito obrigado!

Ao meu orientador professor Osvaldo R. Saavedra, por mais uma vez acreditar em meu potencial e me aceitar como seu orientando no programa de pós-graduação. Foi difícil, demorou, mas aí está concluído nosso trabalho. Professor, muito obrigado!

À professora Rosário Girardi, por aceitar ser minha co-orientadora e ter feito importantes observações durante a revisão deste trabalho. Muito obrigado!

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade (PGEE) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) por ter me aceito em seu programa e pela extensão do tempo de conclusão do trabalho. Muito obrigado!

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por ter concedido a bolsa de estudos no início do programa. Muito obrigado!

A todos aqueles que contribuíram para que eu chegasse até aqui, o meu MUITO OBRIGADO!

*“Somente um principiante que não sabe nada sobre ciência diria que a ciência descarta a fé. Se você **realmente estudar** a ciência, ela certamente o levará para mais perto de Deus”.*

*JAMES TOUR, NANOCIENTISTA.*

---

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia computacional para monitorar o estado operacional em regime permanente de transformadores de potência elétrica ao longo do tempo e suas respectivas tendências de operação. A metodologia é composta de duas etapas principais. Na primeira etapa é construído um bloco de inferência fuzzy capaz de monitorar em tempo real os valores de variáveis elétricas do transformador (corrente, tensão entre fases, potência, temperatura do óleo e temperatura dos enrolamentos), analisar e mapear estas entradas em uma única saída que reflete o que foi definido como *estado operacional do transformador*. Foram definidas cinco regiões de operação pelas quais um transformador pode trabalhar: *emergência, urgência, advertência, estável e ótimo*. A segunda etapa trata de analisar a tendência crescimento/decrescimento desse estado operativo obtido do bloco fuzzy em um determinado período, tal como um dia, um mês, um ano e/ou vários anos. Essa tendência pode ser caracterizada de várias formas, tais como crescente, muito decrescente, constante. Métodos estatísticos são empregados para realizar essa análise. A metodologia foi avaliada com uma base de dados de uma grande empresa geradora e transmissora de energia do setor elétrico brasileiro. Os resultados alcançados foram satisfatórios, na medida em que a evolução de operação desses equipamentos foi qualitativamente mapeada e suas tendências bem caracterizadas. Conceitualmente, o modelo de análise apresentado pode ser estendido para várias unidades transformadoras, para outras funções elétricas e até para uma rede de interesse completa, permitindo subsidiar a operação desta e dar indicativos de necessidade de reforços futuros no sistema.

Palavras-Chave: Análise de tendências. Condições operacionais. Modelagem fuzzy.

Monitoramento de equipamentos elétricos de potência.

Transformadores de potência.

---

## ABSTRACT

This paper presents a computational method to monitor the operating state of steady electric power transformers in a real time and perspectives of operation over time trends and their operation. The methodology consists of two main steps. The first step is building composed of a block of fuzzy inference's block that can monitor real-time values of transformer's electrical parameters of the transformer (current, voltage between phases, power, oil temperature, winding temperature), to analyze and map these inputs into a single output that reflects what has been defined as operational status of the transformer. We defined five regions of transformer's operation by which a processor can work: emergency, urgent, warning, stable and great. The second step analyze the trend of increase / decrease of operating state obtained from the fuzzy block in a given period, as one day, a month, one year and / or several years. This trend can be characterized in various ways, such as increasing, decreasing very constant. Statistical methods are employed for this analysis. The methodology was evaluated on a database of a large company of generation and transmission of electric energy from the Brazilian electricity sector. The results were satisfactory in that the development of operation of such equipment was qualitatively mapped and their tendencies well characterized. Conceptually, the analytical model presented can be extended to multiple processing units, electric and other functions for up to a full network of interest, allowing subsidize the operation of this and can indicate the need for any future system reinforcements.

Key-Words: Analyze of trends. Operational conditions. Fuzzy modeling.

On-Line monitoring electrical equipments. Power transformers.

---

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b> – Parcela variável total estratificada por mês na CMA (Regional de Transmissão do Maranhão - Eletrobrás Eletronorte).....	29
<b>Figura 2.2</b> – Parcela variável total estratificada por tipo de intervenção (programado, não programado, restrição operativa e programações canceladas) na CMA .....	29
<b>Figura 2.3</b> – Parcela variável total estratificada por funções de transmissão na CMA .....	30
<b>Figura 2.4</b> – Estrutura típica de uma rede de supervisão.....	33
<b>Figura 2.5</b> – Visão de uma rede elétrica monitorada através de um sistema SCADA.....	35
<b>Figura 2.6</b> – Visão SCADA de uma subestação.....	36
<b>Figura 2.7</b> – Variáveis supervisionadas em um transformador .....	36
<b>Figura 3.1</b> – Funções de pertinência para a variável temperatura .....	40
<b>Figura 3.2</b> – Funções de pertinência para a variável temperatura .....	41
<b>Figura 3.3</b> – Sistema de inferência fuzzy genérico.....	49
<b>Figura 3.4</b> – Modelo de interferência de Mamdani .....	51
<b>Figura 4.1</b> – Triângulo de Duval .....	64
<b>Figura 4.2</b> – Cromatografia CPG .....	66
<b>Figura 5.1</b> – Modelo da supervisão dos equipamentos nas subestações .....	72
<b>Figura 5.2</b> – Modelo para monitoramento qualitativo de transformadores de potência.....	74
<b>Figura 5.3</b> – Esboço geral do bloco fuzzy corrente.....	77
<b>Figura 5.4</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy corrente.....	78
<b>Figura 5.5</b> – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy corrente .....	79
<b>Figura 5.6</b> – Esboço geral do bloco fuzzy tensão.....	81

---

<b>Figura 5.7</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy tensão.....	82
<b>Figura 5.8</b> – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy tensão .....	83
<b>Figura 5.9</b> – Esboço geral do bloco fuzzy potência.....	84
<b>Figura 5.10</b> – Conjuntos fuzzy da entrada do bloco fuzzy potência .....	85
<b>Figura 5.11</b> – Esboço geral do bloco fuzzy <i>temp óleo</i> .....	87
<b>Figura 5.12</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy <i>temp óleo</i> .....	89
<b>Figura 5.13</b> – Esboço geral do bloco fuzzy temperatura dos enrolamentos.....	90
<b>Figura 5.14</b> – Conjuntos fuzzy de entrada do bloco fuzzy <i>temp. enrol.</i> .....	92
<b>Figura 5.15</b> – Esboço geral do bloco fuzzy <i>delta fases</i> .....	94
<b>Figura 5.16</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy <i>delta fases</i> .....	95
<b>Figura 5.17</b> – Esboço geral do bloco fuzzy operacional .....	96
<b>Figura 5.18</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy operacional .....	97
<b>Figura 5.19</b> – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy operacional.....	98
<b>Figura 5.20</b> – Potência ativa anual 2009 e tendência de comportamento .....	102
<b>Figura 5.21</b> – Potência reativa anual em 2009 e tendência .....	103
<b>Figura 5.22</b> – Corrente fase A em 01/01/2010 .....	103
<b>Figura 5.23</b> – Tensão entre fases AB e tendência em 01/01/2010 .....	104
<b>Figura 5.24</b> – Definição da inclinação da reta de regressão linear.....	105
<b>Figura 5.25</b> – Classificação da tendência quanto ao coeficiente angular.....	106
<b>Figura 5.26</b> – Classificação da tendência quanto à inclinação da reta .....	106
<b>Figura 6.1</b> – Diagrama unifilar do lado de 500 kV da Subestação SELD da CMA.....	109
<b>Figura 6.2</b> – Medidas monitoradas no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.....	113
<b>Figura 6.3</b> – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.....	117

---

<b>Figura 6.4</b> – Saída do bloco fuzzy operacional no LDAT7-01 em 05/01/2010..	118
<b>Figura 6.5</b> – Medidas monitoradas no LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.....	119
<b>Figura 6.6</b> – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.....	123
<b>Figura 6.7</b> – Saída do bloco fuzzy operacional no LDAT7-01 em 06/01/2010..	124
<b>Figura 6.8</b> – Medidas monitoradas no LDAT7-01/230 kV em janeiro de 2010 .....	125
<b>Figura 6.9</b> – Saídas dos blocos fuzzy das medidas do LDAT7-01 em janeiro/2010.....	126
<b>Figura 6.10</b> – Saída do bloco fuzzy operacional do LDAT7-01 em janeiro/2010.....	126
<b>Figura 6.11</b> – Medidas monitoradas no LDAT7-01/500 kV em março/2010 .....	130
<b>Figura 6.12</b> – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em março/2010.....	131
<b>Figura 6.13</b> – Saída do bloco fuzzy operacional LDAT7-01/500 kV em março/2010 .....	131
<b>Figura 6.14</b> – Saída do bloco fuzzy operacional LDAT7-01 em março/2010. ....	132
<b>Figura 6.15</b> – Medidas monitoradas no LDAT7-01/230 kV em 2009 .....	133
<b>Figura 6.16</b> – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em 2009 .....	135
<b>Figura 6.17</b> – Saída do bloco fuzzy operacional do LDAT7-01/230kV/500 kV em 2009 ...	136
<b>Figura 6.18</b> – Medidas monitoradas no LDAT7-01/500 kV em 2009 .....	137
<b>Figura 6.19</b> – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em 2009 .....	137
<b>Figura 6.20</b> – Saída do bloco fuzzy operacional LDAT7-01/230 kV/500 kV em 2009 .....	138
<b>Figura 6.21</b> – Avaliação da metodologia proposta – alteração da corrente.....	139
<b>Figura 6.22</b> – Avaliação da metodologia proposta – alteração da tensão.....	140
<b>Figura 6.23</b> – Avaliação da metodologia proposta – alteração do delta fases.....	141
<b>Figura 6.24</b> – Avaliação da metodologia proposta – alteração da potência .....	142
<b>Figura 6.25</b> – Avaliação da metodologia proposta – alteração da temperatura do óleo.....	143
<b>Figura 6.26</b> – Tendência do estado operacional do LDAT7-01/230 kV (2008/2010) .....	144
<b>Figura 6.27</b> – Tendência do estado operacional do LDAT7-01/500 kV (2008/2010) .....	144
<b>Figura 6.28</b> – Tendência do estado operacional do LDAT7-01/230 kV (2009/2010)..	146

---

<b>Figura 6.29</b> – Tendência do estado operacional do LDAT7-01/500 kV (2009/2010)..	146
<b>Figura 6.30</b> – Tendência do estado operacional do LDAT7-01/230 kV em 2010 .....	147
<b>Figura 6.31</b> – Tendência do estado operacional do LDAT7-01/500 kV em 2010 .....	147
<b>Figura 6.32</b> – Generalização da metodologia para monitoramento de $N$ transformadores ...	151
<b>Figura 6.33</b> – Generalização da metodologia para monitoramento de funções elétricas .....	152
<b>Figura 6.34</b> – Generalização da metodologia para monitoramento de uma subestação .....	153

---

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – PV total de junho de 2008 a junho de 2010 na CMA .....	30
<b>Tabela 4.1</b> – Complexidade dos sistemas de monitoramento de transformadores.....	33
<b>Tabela 4.2</b> – Concentração de gases dissolvidos .....	62
<b>Tabela 5.1</b> – Medidas comumente monitoradas em transformadores .....	71
<b>Tabela 5.2</b> – Entradas do bloco fuzzy corrente no lado 230 kV .....	76
<b>Tabela 5.3</b> – Nominiais da corrente nos lados de 230 kV e 500 kV e variações percentuais...	77
<b>Tabela 5.4</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy corrente no lado 230 kV .....	77
<b>Tabela 5.5</b> – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy corrente .....	78
<b>Tabela 5.6</b> – Entradas do bloco fuzzy tensão no lado 230 kV .....	81
<b>Tabela 5.7</b> – Valores nominais da tensão e variações percentuais .....	81
<b>Tabela 5.8</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy tensão no lado 230 kV.....	82
<b>Tabela 5.9</b> – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy tensão .....	82
<b>Tabela 5.10</b> – Entradas do bloco fuzzy potência .....	84
<b>Tabela 5.11</b> – Potência nominal de transformadores de 200 e 600 MVA.....	85
<b>Tabela 5.12</b> – Conjuntos fuzzy da entrada do bloco fuzzy potência .....	85
<b>Tabela 5.13</b> – Entradas do bloco fuzzy temperatura óleo no lado 230 kV .....	88
<b>Tabela 5.14</b> – Valores nominais de temperatura de óleo.....	88
<b>Tabela 5.15</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy temperatura óleo.....	88
<b>Tabela 5.16</b> – Entradas do bloco fuzzy temperatura óleo no lado 500 kV .....	91
<b>Tabela 5.17</b> – Valores nominais de temperatura de enrolamentos .....	91
<b>Tabela 5.18</b> – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy <i>temp. enrol.</i> .....	91
<b>Tabela 5.19</b> – Entradas do bloco fuzzy delta fases no lado 230 kV .....	93
<b>Tabela 5.20</b> – Conjuntos de entrada do bloco fuzzy <i>delta fases</i> .....	94

---

<b>Tabela 5.21</b> – Entradas do bloco fuzzy operacional.....	97
<b>Tabela 5.22</b> – Conjuntos fuzzy de saída do bloco fuzzy operacional.....	98
<b>Tabela 6.1</b> – Correntes, potências e tensões no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.....	114
<b>Tabela 6.2</b> – Temperaturas enrolamentos/óleo no LDAT7-01 em 05/01/2010.....	115
<b>Tabela 6.3</b> – <i>Delta fases</i> no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010 .....	116
<b>Tabela 6.4</b> – Correntes, potências e tensões no LDAT7-01 lado 500 kV em 06/01/2010 ....	120
<b>Tabela 6.5</b> – Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.....	121
<b>Tabela 6.6</b> – Delta Fases no LDAT7-01/500kV em 06/01/2010.....	122
<b>Tabela 6.7</b> – Corrente, potência, tensão no LDAT7-01/230 kV em janeiro/2010.....	127
<b>Tabela 6.8</b> – Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/230 kV em jan/2010....	128
<b>Tabela 6.9</b> – <i>Delta fases</i> das medidas trifásicas no LDAT7-01/230 kV em janeiro 2010.....	129
<b>Tabela 6.10</b> – Correntes, potências, tensões no LDAT7-01/230 kV em 2009 .....	134
<b>Tabela 6.11</b> – Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/230 kV em 2009.....	134
<b>Tabela 6.12</b> – Desvio padrão das medidas trifásicas no LDAT7-01/230 kV em 2009 .....	135
<b>Tabela 6.13</b> – Análise de tendência do estado operacional do LDAT7-01 (2008/2010) .....	145
<b>Tabela 6.14</b> – Análise de tendência do estado operacional do LDAT7-01 (2009/2010) .....	146

---

# SUMÁRIO

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	20
1.2	OBJETIVOS .....	21
1.2.1	<i>GERAL</i> .....	21
1.2.2	<i>ESPECÍFICOS</i> .....	21
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2</b>	<b>MODELO ATUAL DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO .....</b>	<b>23</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS DO MODELO .....	23
2.2	PARCELA VARIÁVEL .....	25
2.2.1	<i>DEFINIÇÕES</i> .....	25
2.2.2	<i>TIPOS DE PARCELA VARIÁVEL</i> .....	26
2.2.3	<i>CÁLCULO DA PARCELA VARIÁVEL POR INDISPONIBILIDADE</i> .....	28
2.3	TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA .....	31
2.4	MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS .....	33
2.5	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO .....	37
<b>3</b>	<b>SISTEMAS FUZZY .....</b>	<b>38</b>
3.1	FUNDAMENTOS .....	38
3.1.1	<i>CONJUNTOS FUZZY</i> .....	39
3.1.2	<i>VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS</i> .....	40
3.1.3	<i>FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA</i> .....	41
3.1.4	<i>DEFINIÇÕES E OPERAÇÕES</i> .....	42
3.1.5	<i>PROPRIEDADES</i> .....	43
3.1.6	<i>RELAÇÕES FUZZY</i> .....	44
3.1.7	<i>COMPOSIÇÃO DE RELAÇÕES FUZZY</i> .....	45
3.1.8	<i>PROPOSIÇÕES FUZZY</i> .....	46
3.1.9	<i>LÓGICA FUZZY</i> .....	47
3.2	SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY .....	49
3.2.1	<i>MODELO DE MAMDANI</i> .....	50
3.2.2	<i>MODELO DE TAKAGI-SUGENO-KANG (TSK)</i> .....	53
3.3	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO .....	56

---

<b>4</b>	<b>MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA .....</b>	<b>57</b>
4.1	MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES .....	57
4.1.1	<i>NIVEIS DE COMPLEXIDADE DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO .....</i>	<i>58</i>
4.2	TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE DIAGNÓSTICO .....	59
4.2.1	<i>ANÁLISE DA UMIDADE.....</i>	<i>59</i>
4.2.2	<i>ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS (AGD).....</i>	<i>60</i>
4.2.3	<i>GRAU DE POLIMERIZAÇÃO.....</i>	<i>64</i>
4.2.4	<i>ANÁLISE DE FURANO PELO LCAD .....</i>	<i>66</i>
4.3	TÉCNICAS INTELIGENTES APLICADAS AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS .....	68
4.4	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO .....	69
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE TENDÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
5.1	MONITORAMENTO QUALITATIVO .....	70
5.1.1	<i>BLOCO FUZZY CORRENTE.....</i>	<i>76</i>
5.1.2	<i>BLOCO FUZZY TENSÃO.....</i>	<i>80</i>
5.1.3	<i>BLOCO FUZZY POTÊNCIA.....</i>	<i>84</i>
5.1.4	<i>BLOCO FUZZY TEMPERATURA DO ÓLEO.....</i>	<i>87</i>
5.1.5	<i>BLOCO FUZZY TEMPERATURA ENROLAMENTOS.....</i>	<i>90</i>
5.1.6	<i>BLOCO FUZZY DELTA FASES .....</i>	<i>93</i>
5.1.7	<i>BLOCO FUZZY OPERACIONAL.....</i>	<i>96</i>
5.2	ANÁLISE DE TENDÊNCIAS .....	99
5.2.1	<i>O MONITORAMENTO E ANÁLISE DE TENDÊNCIAS .....</i>	<i>99</i>
5.2.2	<i>AVALIAÇÃO DA TENDÊNCIA.....</i>	<i>100</i>
5.3	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO .....	108
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>109</b>
6.1	ETAPA DE PRÉ-PROCESSAMENTO .....	110
6.1.1	<i>LIMPEZA DOS DADOS.....</i>	<i>110</i>
6.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....	111
6.2.1	<i>MONITORAMENTO DIÁRIO.....</i>	<i>112</i>
6.2.2	<i>MONITORAMENTO MENSAL.....</i>	<i>124</i>
6.2.3	<i>MONITORAMENTO ANUAL .....</i>	<i>132</i>
6.2.4	<i>AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA.....</i>	<i>138</i>
6.2.5	<i>ANÁLISE DE TENDÊNCIA .....</i>	<i>144</i>
6.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	148
6.3.1	<i>NÚMERO DE MEDIDAS.....</i>	<i>148</i>
6.3.2	<i>DIAGNÓSTICO DE FALHAS.....</i>	<i>149</i>

---

6.4	GENERALIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO .....	149
6.4.1	<i>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA N TRANSFORMADORES.....</i>	<i>149</i>
6.4.2	<i>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA OUTRAS FUNÇÕES ELÉTRICAS .....</i>	<i>151</i>
6.4.3	<i>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA N FUNÇÕES ELÉTRICAS .....</i>	<i>152</i>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>154</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>156</b>

---

# 1 INTRODUÇÃO

Sistemas para diagnóstico e monitoramento de equipamentos do sistema elétrico de potência (sem a necessidade de desligamentos) têm sido propostos em níveis de pesquisas com implementações práticas finais por empresas do setor elétrico (fabricantes, geradoras, transmissoras e distribuidoras). Neste contexto, as universidades e centros de pesquisas têm desenvolvido papéis importantes, principalmente em nível de pesquisa. Isto vem ocorrendo não somente no Brasil como também na maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento.

No Brasil, mais especificamente, o interesse por esta área tem sido acelerado nos últimos anos devido a mudanças estruturais no setor de energia elétrica que promovem a competição em todos os níveis, estabelecem índices mais rigorosos de qualidade técnica e de serviço (geralmente fiscalizados por uma empresa reguladora) e até mesmo por razões técnicas associadas ao envelhecimento natural de grande parte dos equipamentos instalados que devem, neste novo contexto, incrementar o desempenho e confiabilidade em condições inferiores à época de suas instalações.

Transformadores de potência de grande porte são um dos mais caros e críticos componentes de um sistema elétrico de transmissão e por isto um grande esforço vem sendo empregado para garantir seu bom funcionamento no que concerne a evitar possíveis falhas que venham a ocorrer devido ao seu ciclo natural de vida ou regimes elétricos a que são submetidos.

Atualmente, encontram-se disponíveis ou está em desenvolvimento um considerável número de ferramentas para o monitoramento e diagnóstico das condições dos transformadores de potência imersos em óleo.

Os sistemas de monitoramento e diagnóstico de transformadores possuem geralmente duas funções que, embora distintas por definição, evoluem e são utilizadas em conjunto. O monitoramento tem por fim a aquisição de um conjunto de dados relativos ao funcionamento do transformador e cuja coleta envolve modernas tecnologias em sensores, técnicas de aquisição de dados e dispositivos digitais ou analógicos. O diagnóstico, por sua vez, está mais relacionado à interpretação dos dados e pode ser realizado por um especialista ou por um software especialmente desenvolvido para este fim [1].

---

Observa-se hoje uma tendência unificadora dos processos de operação e manutenção, responsáveis pelo monitoramento e diagnóstico de falhas em equipamentos, respectivamente. Tal tendência é motivada pela redução de custos das empresas de energia e pelas mudanças ocorridas no setor elétrico brasileiro (devido, principalmente, às pesadas multas decorrentes da indisponibilidade de equipamentos).

Nesse cenário, os profissionais envolvidos nesses processos precisam de ferramentas que reduzam a complexidade de monitoramento bem como permitam fazer melhores previsões. Sistemas automáticos de monitoramento e diagnóstico que incorporam uma forte parcela de técnicas inteligentes para representar, entre outros conhecimentos, aquele acumulado com a experiência de especialistas, têm sido apresentados como candidatos adequados para atender a esses objetivos.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Um sistema elétrico de potência (SEP) de grande porte é um sistema altamente complexo. É composto de inúmeros sub-sistemas, tais como barras de energia, linhas de transmissão, transformadores de potência, compensadores síncronos e estáticos, entre outros equipamentos. Todos esses sub-sistemas trabalham de forma interligada e interdependente, isto é, o bom ou mau funcionamento de cada um deles pode influenciar todo o sistema elétrico onde estão inseridos.

Devido a essas características, deve-se procurar desenvolver uma metodologia para reduzir a complexidade de monitoramento e diagnóstico das principais funções elétricas nas subestações de energia, para que os responsáveis por tomadas de decisão durante a operação em tempo real tenham informações suficientes que corroborem suas intervenções no sistema e que, ao mesmo tempo, possibilite análise e previsão adequadas de ocorrências (problemas operacionais). O trabalho proposto objetiva atender a esses requisitos.

---

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 GERAL

Desenvolver uma metodologia para monitoramento qualitativo de variáveis elétricas de transformadores de potência imersos em óleo — corrente, tensão entre fases, potência ativa e reativa, temperaturas do óleo e enrolamentos — de forma a reduzir a complexidade de monitoramento desses equipamentos, permitir a observação da evolução do estado operacional no tempo e auxiliar especialistas em tomadas de decisões relacionadas à operação e planejamento do sistema.

### 1.2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a aplicabilidade de sistemas de inferência fuzzy no desenvolvimento de sistemas de monitoramento e diagnóstico de falhas em transformadores de potência;
- Mapear o comportamento operativo de transformadores em regiões operativas definidas por especialistas;
- Auxiliar na identificação de quais situações tem levado esses equipamentos a trabalharem em regiões operativas de urgência e emergência e em que períodos elas ocorrem;
- Permitir avaliar a tendência de comportamento operativo de transformadores em médio e longo prazo;
- Avaliar o sistema proposto com uma base de dados reais;
- Introduzir novo conhecimento decorrente dos estudos de caso para melhorar o grau de assertividade do sistema proposto.

---

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para um melhor entendimento do assunto proposto, este trabalho está organizado da seguinte forma: nos Capítulos **01** e **02** efetua-se uma introdução ao tema, no que diz respeito a suas generalidades, formulação do problema, objetivos e justificativas.

No Capítulo **03** contemplam-se os princípios fundamentais da lógica fuzzy e dos processos de inferência fuzzy.

No Capítulo **04** são apresentados os conceitos e o estado da arte sobre monitoramento e diagnóstico de condições em transformadores de potência.

No Capítulo **05** realiza-se a explanação da metodologia desenvolvida – sua justificativa e formulação. A metodologia é caracterizada pela descrição detalhada dos blocos de inferência fuzzy responsáveis por mapear as medidas monitoradas do transformador em estados operacionais e do método de análise de tendências empregado.

No Capítulo **06**, analisa-se sua aplicação a um sistema real, seus resultados e discussão sobre seu desempenho.

Por fim, no Capítulo **07** são tecidas as considerações finais do trabalho, contribuições e possíveis trabalhos futuros.

---

## 2 MODELO ATUAL DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Neste capítulo são apresentados conceitos e problemáticas relacionadas ao processo de operação de sistemas de potência em tempo real, principalmente os envolvidos com transformadores de potência imersos em óleo. É de fundamental importância conhecer tais conceitos, de forma a encontrar oportunidades de melhorias.

Na seção 2.1 será descrito em detalhes que mudanças ocorreram na legislação do setor elétrico brasileiro. Na seção 2.2 é descrito como são calculadas as multas em caso de indisponibilidade operacional de equipamentos. A seção 2.3 descreve a importância dos transformadores de potência e problemas relacionados à operação dos mesmos. A seção 2.4 mostra como é realizado atualmente o monitoramento de equipamentos nas subestações e, por fim, a seção 2.5 apresenta as considerações finais sobre o capítulo.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro possui dimensões e características peculiares que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. Seu sistema de produção e transmissão de energia elétrica caracteriza-se por ser predominantemente hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas com múltiplos proprietários. Este sistema constitui-se por equipamentos de subestação em tensão igual ou superior a 230 kV e geração maior ou igual a 50MW. A configuração do SIN tem por objetivos fundamentais o atendimento à demanda, a racionalização da oferta e demanda de energia elétrica, a busca por competitividade, a capacidade de investimento com participação privada, o estabelecimento de regras estáveis, busca por qualidade da energia e preço justo aos consumidores e o respeito ao meio ambiente.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão regulador e fiscalizador do sistema brasileiro [2]. Tal agência criou o Operador Nacional do Sistema (ONS), entidade de direito privado sem fins lucrativos, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN [3]. O segmento de transmissão é fortemente regulado e fiscalizado pela ANEEL, permitindo a competitividade entre as transmissoras que podem atuar numa mesma área geográfica.

---

No atual modelo, as concessionárias de transmissão mantêm junto ao ONS o *Contrato de Prestação de Serviço da Transmissão (CPST)*, por meio do qual autorizam tal órgão a representá-las junto aos usuários e se comprometem a cumprir os procedimentos operacionais determinados por esse operador.

A ANEEL recentemente passou a utilizar a chamada *Parcela Variável (PV)* como mecanismo para incentivar a qualidade do serviço de transmissão de energia elétrica. Tal mecanismo se baseia na redução do tempo da indisponibilidade de linhas de transmissão, transformadores e equipamentos de controle de tensão. Componentes estes denominados *Funções de Transmissão (FT)* [4].

Diante deste cenário, qualidade e confiabilidade são agora exigências chaves nos serviços de transmissão, fazendo parte, intrinsecamente, das cláusulas do CPST. A resultante é que os índices de qualidade e confiabilidade exigidos das empresas transmissoras estão cada vez maiores. A qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica é medida com base na disponibilidade e na capacidade plena das FTs, sendo estas consideradas indisponíveis quando ocorrer desligamentos programados, atraso na entrada em operação ou outros tipos de desligamentos [4].

A aplicação da PV traz um novo contexto para todo o setor elétrico brasileiro, onde vários avanços são esperados. Dentre eles, podem ser citadas a melhor utilização dos recursos existentes nas redes elétricas e a execução mais eficiente de controles tais como o de emergência e o de restabelecimento. O intuito é incentivar a adoção de gestões na expansão, operação e manutenção do sistema elétrico para maximizar a disponibilidade das FTs, reduzindo os impactos indesejáveis na operação das mesmas, tais como a ocorrência de desligamentos simples ou de grandes proporções. Torna-se necessária a realização de alterações nas etapas de expansão do sistema, na gestão dos ativos das transmissoras, na manutenção das FTs e nos procedimentos da operação, dentre outras. Porém, sabe-se que os equipamentos elétricos de alta tensão instalados em subestações podem ser solicitados a operar sob condições adversas, tais como: altas temperaturas, chuvas, poluição, sobrecarga e, dessa forma, mesmo tendo uma operação e manutenção de qualidade, não se pode descartar a possibilidade de ocorrerem falhas que deixem as FTs indisponíveis. Diante disto, as empresas concessionárias de energia elétrica, com instalações antigas integrantes da rede básica do SIN estão se mobilizando em busca de estratégias para maximizar a disponibilidade e a capacidade plena das suas funções de transmissão.

---

## 2.2 PARCELA VARIÁVEL

Esta seção descreve resumidamente a resolução nº 270 de 2007 da ANEEL com o objetivo de apresentar como a aplicação da PV pode impactar a receita financeira das empresas de transmissão de energia nos casos em que houver indisponibilidade operacional de equipamentos nas subestações [4].

### 2.2.1 DEFINIÇÕES

- *Função de Transmissão (FT)*

Refere-se ao conjunto de instalações funcionalmente dependentes, considerado de forma solitária para fins de apuração da prestação de serviços de transmissão, compreendendo o equipamento principal e os complementares. Os tipos de FT são: Linha de Transmissão (LT), Transformação (TR), Controle de Reativo (CR) e Módulo Geral (MG).

O tipo MG relaciona-se a equipamentos das instalações de transmissão tais como: malhas de aterramento, sistemas de telecomunicações, supervisão e controle, sistemas de ar comprimido, transformador de aterramento e de potencial, reator de barra não manobrável sob tensão, equipamentos de interligação de barra e barramentos. Observa-se que as indisponibilidades de equipamento MG geram desconto na receita devido à PV somente quando seu desligamento causar indisponibilidade de uma (ou mais) FT(s) vinculadas à mesma subestação (quando indisponibilizar uma FT de LT, por exemplo). Isso significa que os desligamentos de equipamentos MG, em condições normais, não implicam desconto de receita, no caso de não disponibilizar outra FT.

- *Receita Anual Permitida (RAP)*

Para cada FT define-se uma receita anual permitida, RAP. Esta renumera os investimentos realizados pela concessionária de transmissão para a implantação das FT, incluindo a cobertura dos custos de operação e manutenção dos equipamentos durante a vigência da concessão.

---

- *Pagamento Base (PB)*

A receita da transmissora é paga mensalmente em duodécimos da RAP ( $PB=RAP/12$ ). O PB é a receita mensal de uma FT associada à plena disponibilização das instalações de transmissão que a compõe.

- *Desligamentos Programados e Desligamentos Não Programados*

Os desligamentos das FT são considerados *desligamentos não programados* quando a intervenção é solicitada ao ONS com antecedência inferior a 24 horas ou com antecedência entre 24 e 48 horas com relação ao horário do desligamento e sem que seja possível ao ONS programar as condições operativas do SIN. Os desligamentos não programados são também denominados *outros desligamentos*.

Os desligamentos solicitados com antecedência superior aos citados acima são denominados *desligamentos programados*.

- *Padrão de Duração de Desligamento*

Refere-se à duração máxima admissível de desligamentos programados ou de outros desligamentos de uma FT no período contínuo móvel de doze meses, até o qual não se aplica o desconto relativo à PV da FT. Essa duração de tempo também é denominada de *franquia da função*.

## 2.2.2 TIPOS DE PARCELA VARIÁVEL

A aplicação da PV tem como principal inovação o estabelecimento de um sinal econômico associado ao desempenho operacional. O desconto na receita relativa à PV é aplicado considerando as indisponibilidades ocorridas numa janela móvel de 12 meses. A seguir são apresentados os tipos de PV.

---

- *Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI)*

A PVI refere-se à parcela a ser deduzida do PB por desligamentos programados ou outros desligamentos decorrentes de indisponibilidades envolvendo o equipamento principal ou equipamentos complementares da FT de responsabilidade da concessionária de transmissão. No cálculo da PVI são utilizados fatores multiplicadores.

Desligamentos programados implicam em descontos correspondentes a 10 vezes o valor recebido por determinada FT (fator Kp) e os não programados de 150 vezes (fator Ko).

- *Parcela Variável por Restrição Operativa Temporária (PVRO)*

A PVRO é a parcela a ser deduzida do PB por restrição operativa temporária existente na FT de responsabilidade da concessionária de transmissão, que resulte na redução da capacidade operativa da própria FT.

O desconto na receita da FT por PVRO é proporcional à redução da capacidade operativa desta.

- *Parcela Variável Devido à Utilização de Equipamento Reserva*

A utilização de um equipamento remunerado reserva, em substituição a uma FT da transmissora, implica em desconto do PB da FT, ou seja, a suspensão do PB da unidade reserva durante o tempo em que foi utilizada. Como exemplo, tem-se o uso da unidade reserva dos bancos de transformadores monofásicos e dos bancos de reatores.

- *Atraso na Entrada em Operação de uma Função de Transmissão*

Atraso na data de entrada em operação comercial de uma nova FT estabelecida pela ANEEL, por motivo direta ou indiretamente imputável à concessionária de transmissão, gera desconto de receita n PB desta FT.

- *Adicional à Receita Anual Permitida*

Para incentivo à melhoria no desempenho das FT, é previsto um valor adicional à RAP da FT. Este adicional será pago somente quando houver um desempenho superior ao padrão de desligamento previsto e será condicionado à existência de recursos obtidos com a PV relativa à indisponibilidade de outras FT.

As empresas transmissoras devem avaliar se o valor do adicional à RAP compensará o investimento necessário.

### 2.2.3 CÁLCULO DA PARCELA VARIÁVEL POR INDISPONIBILIDADE

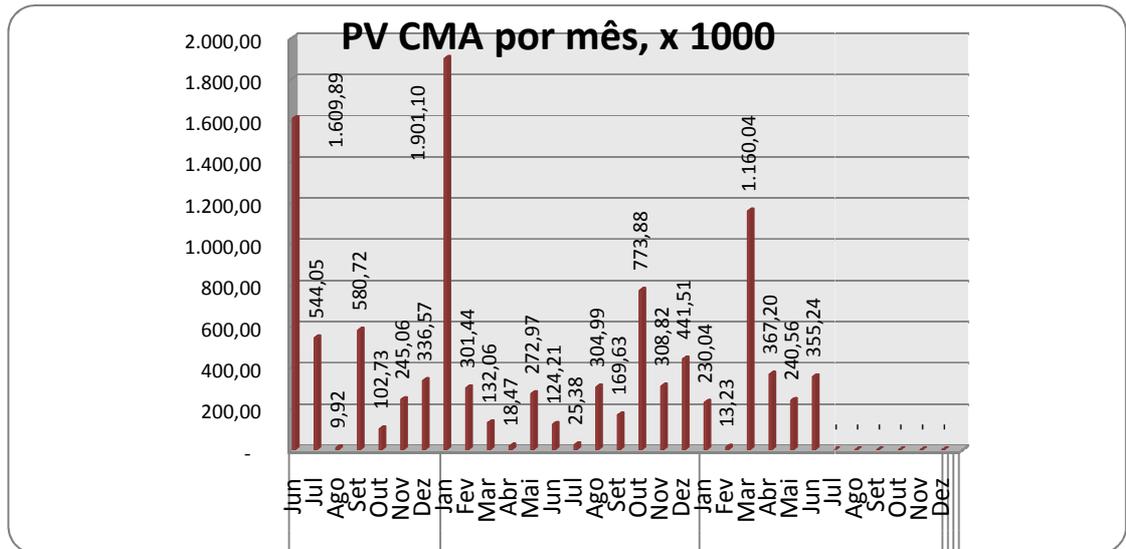
O cálculo da PVI é feito por meio da Equação (2.1).

$$PVI = \frac{PB}{1440 * D} * K_p \left( \sum_{i=1}^{NP} DVDP_i \right) + \frac{PB}{1440 * D} * \left( \sum_{l=1}^{NO} K_{o_l} * DVOP_l \right) \quad (2.1)$$

onde, PB é o pagamento base da FT; D é o número de dias do mês da ocorrência; NP é o número de desligamentos programados da FT ocorridos ao longo do mês; NO é o número de outros desligamentos da FT ocorridos ao longo do mês;  $K_p$  é um fator multiplicador para desligamento programado;  $K_o$  é um fator multiplicador para outros desligamentos não programados com duração de até 300 minutos;  $PB/1440*D$  refere-se à receita da FT por minuto;  $\sum DVDP$  é o somatório da duração em minutos de cada desligamento programado que ocorra durante o mês relativo a uma FT;  $\sum DVOP$  idem, para outros desligamentos. O fator  $K_o$  será reduzido para  $K_p$  após o minuto 300 de indisponibilidade.

A seguir são apresentadas algumas informações relativas à parcela variável de várias Funções de Transmissão (FTs) de uma empresa de transmissão nacional (CMA – Regional de Transmissão do Maranhão da Eletrobrás Eletronorte [5]) no período de junho de 2008 a junho de 2010.

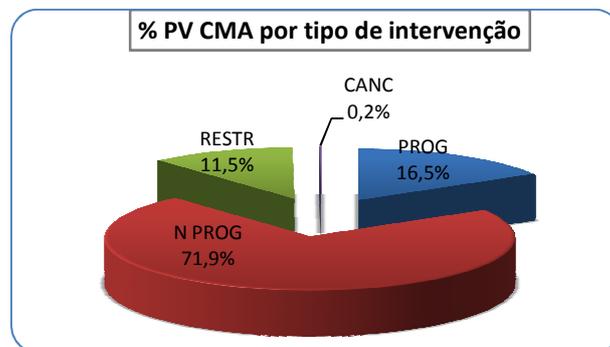
A Figura 2.1 apresenta a PV (em Reais) estratificada por mês no período citado anteriormente. Analisando a figura, observa-se que a empresa em questão obteve um prejuízo em janeiro de 2009 de quase 02 milhões de reais relativos à aplicação da PV.



**Figura 2.1** — Parcela variável total estratificada por mês na CMA (Regional de Transmissão do Maranhão— Eletrobrás Eletronorte).

**Fonte:** Relatórios operacionais do CEOR/TM (Centro de Operação Regional do Tocantins/Maranhão).

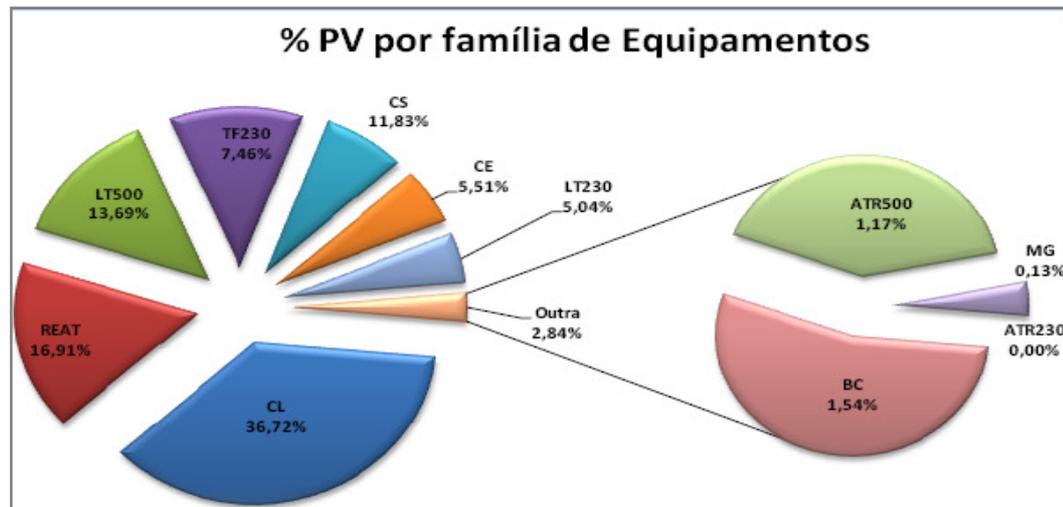
A Figura 2.2 apresenta a PV quanto ao tipo de intervenção nas FTs. Observa-se que mais de 70% da PV paga é oriunda de intervenções não programadas e/ou desligamentos intempestivos.



**Figura 2.2** — Parcela variável total estratificada por tipo de intervenção (programado, não programado, restrição operativa e programações canceladas) na CMA .

**Fonte:** Relatórios operacionais do CEOR/TM (Centro de Operação Regional do Tocantins/Maranhão).

A Figura 2.3 apresenta a PV estratificada por FTs e a Tabela 2.1 apresenta os valores (em Reais) de quanto cada FT impactou financeiramente a empresa e o prejuízo total no período.



**Figura 2.3** — Parcela variável total estratificada por funções de transmissão na CMA

**Fonte:** Relatórios operacionais do CEOR/TM.

**Tabela 2.1** — PV total de junho de 2008 a junho de 2010 na CMA.

**Fonte:** Relatórios Operacionais do CEOR/TM.

FAMÍLIA DE FUNÇÕES	PV (R\$)
COMPENSAÇÃO SÉRIE LINHAS	3.299.301,05
REATORES	1.519.674,23
LINHA TRANSMISSÃO 500 KV	1.230.610,55
COMPENSAÇÃO SÉRIE	1.063.018,88
TRAFO 230 KV	670.623,81
COMPENSAÇÃO ESTÁTICA	495.027,47
LINHA TRANSMISSÃO 230 KV	452.509,89
BANCO DE CAPACITORES	138.212,66
AUTO-TRAFO 500 KV	105.475,64
MÓDULO GERAL	11.528,51
AUT-TRAFO 230 KV	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>8.985.982,70</b>

Diante desse novo cenário no setor elétrico brasileiro é necessário construir mecanismos que auxiliem os responsáveis pela operação do sistema de energia no monitoramento, prevenção e previsão de fenômenos que possam causar e/ou contribuir para a indisponibilidade de qualquer uma das FTs, e que, conseqüentemente, ajudem os gestores das empresas a reduzirem o impacto da PV na RAP, paga às mesmas pela ANEEL.

---

## 2.3 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) [10] “O Transformador é um equipamento estático que, por indução eletromagnética, transforma tensões e correntes alternadas entre dois ou mais enrolamentos, na mesma frequência, e usualmente em valores diferente de tensão e corrente”. Portanto, em outras palavras, os transformadores são máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito para o outro, sem mudança de frequência, e normalmente, variando valores de tensão e corrente.

De modo geral, o transformador tem como outra função a de reduzir as perdas em transmissão por redução de corrente requerida para transmitir uma determinada potência elétrica. O funcionamento do transformador é explicado através da Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, que diz que quando um circuito é atravessado por uma corrente variável é produzido um campo magnético e quando um circuito é atravessado por um campo magnético variável é gerada uma corrente elétrica nesse circuito.

O número de transformadores de potência instalados no SIN representa um percentual bastante significativo na matriz energética nacional. Devido à grande importância de um transformador no sistema elétrico, a perda total ou parcial de um equipamento por falha ou redução de vida representa custos excessivos à empresa de energia, tanto pelo fato de não poder entregar potência às unidades consumidoras como pelas multas (PV) que podem ser aplicadas pelo ONS pela indisponibilidade do serviço.

As empresas podem, no caso de constatação de perda de vida útil devido à sobrecarga imposta pela ONS, exigir o pagamento de adicional financeiro, desde que o transformador esteja operando dentro dos critérios e condições de carregamento indicados na Norma Brasileira NBR 5416 de julho de 1997 [6]. Contudo, respeitar as condições de carregamento descritos na Norma e pleitear o adicional financeiro exige um comprometimento ainda maior das empresas em monitorar e diagnosticar frequentemente qualquer alteração que coloque em risco ou comprometa a operação do equipamento.

---

Nos últimos dez anos tem ocorrido com frequência a perda parcial ou total de subestações devido à explosão de transformadores. Nos EUA foram identificadas 730 explosões entre 2001 e 2008, com uma projeção de aumento de 2% ao ano [7]. No Brasil, ainda em abril de 2008 foram confirmadas duas explosões em subestações no estado de São Paulo. As causas podem estar relacionadas à redução de investimento no setor de geração, transmissão e distribuição de energia ou podem ter sido decorrentes da competitividade do mercado elétrico que exige uma maior durabilidade e uma maior produção, resultando assim, em envelhecimento acelerado e sobrecarga dos transformadores.

Para os gestores de risco e companhias de seguros, o transformador é um dos equipamentos de mais alto risco de falha dentro de uma usina de energia elétrica, devido à grande quantidade de óleo que fica em contato com elementos submetidos à alta tensão. Portanto, é necessário que as concessionárias tenham acompanhamento contínuo dos processos de operação para poder diagnosticar as possíveis situações que possam provocar falhas de operação que, particularmente, ocorrem no isolamento do equipamento. Isto gera uma necessidade de estudar formas que permitam estender a vida de um transformador ou pelo menos manter a vida útil para o qual foi projetado.

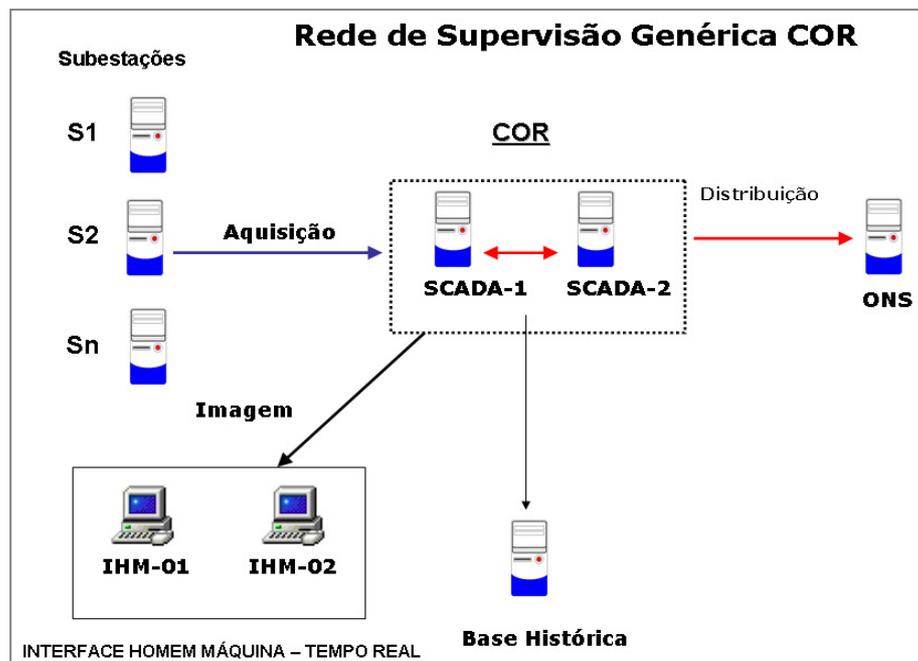
Para diagnosticar possíveis efeitos que levam a falhas de operação é necessário compreender os fenômenos físico-químicos que ocorrem no transformador em situações normais ou quando submetidos a sobrecargas excessivas. O sistema de isolamento de grande parte dos transformadores de potência consiste, basicamente, de óleo, composto de hidrocarboneto e de papel.

Muitos dos transformadores conectados a rede elétrica estão se aproximando do final da vida útil projetada, devido, principalmente, à degradação da isolação, pois os materiais isolantes dos quais são fabricados os mesmos entram em processo de degradação em função de temperaturas de operação elevadas e da presença de oxigênio e umidade, entre outros fatores.

## 2.4 MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS

Atualmente no setor elétrico, a maioria das subestações no país possui uma *rede de supervisão* responsável por disponibilizar em tempo real os valores de grandezas elétricas e digitais de equipamentos em campo para o Centro de Operação Regional (COR) da empresa de geração e/ou transmissão responsável pelos equipamentos.

O COR é a entidade responsável pela supervisão e controle de suas instalações (subestações) e pela comunicação direta com o ONS. A Figura 2.4 apresenta uma estrutura típica desse tipo de rede de supervisão.



**Figura 2.4** — Estrutura típica de uma rede de supervisão.

Nessa estrutura, o monitoramento das variáveis elétricas e digitais dos equipamentos (barras, linhas, banco de capacitores, disjuntores, reatores) nas subestações é realizado por sistemas gráficos de gerenciamento de sistemas elétricos. Esses sistemas são comumente conhecidos como sistemas SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*.

---

Um sistema SCADA muito utilizado no cenário brasileiro pelas empresas de energia é o sistema SAGE – *Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia*, desenvolvido pela Eletrobrás CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica [8] [9]. As principais funções desses sistemas são:

- Aquisição de Dados
  - Tarefa de transmitir os valores das variáveis supervisionadas medidos em campo para os computadores SCADA dos centros de operação;
  - Os valores das medidas em geral são obtidos através de sensores digitais que transmitem os dados via redes de computadores e de telecomunicações através de protocolos de comunicação proprietários.
- Exibição de Dados
  - Nas instalações, os dados são processados e exibidos em computadores modernos, com monitores de alta definição e resolução, comumente chamados de IHM – *Interface Homem Máquina* – que exibem de maneira legível e agradável para os operadores do sistema.
- Distribuição de Dados
  - Pelo CPST é obrigação do COR fazer a distribuição de todos os dados da Rede Básica para o ONS.
- Base Histórica
  - Em alguns casos, os dados capturados pelos SCADA são historiados em banco de dados, formando bases históricas de varreduras.

As Figuras 2.5, 2.6, 2.7 apresentam exemplos de capturas de tela de um sistema SCADA durante o monitoramento de todo um sistema elétrico (SEP), de toda uma subestação e das variáveis supervisionadas em um transformador de potência, respectivamente.

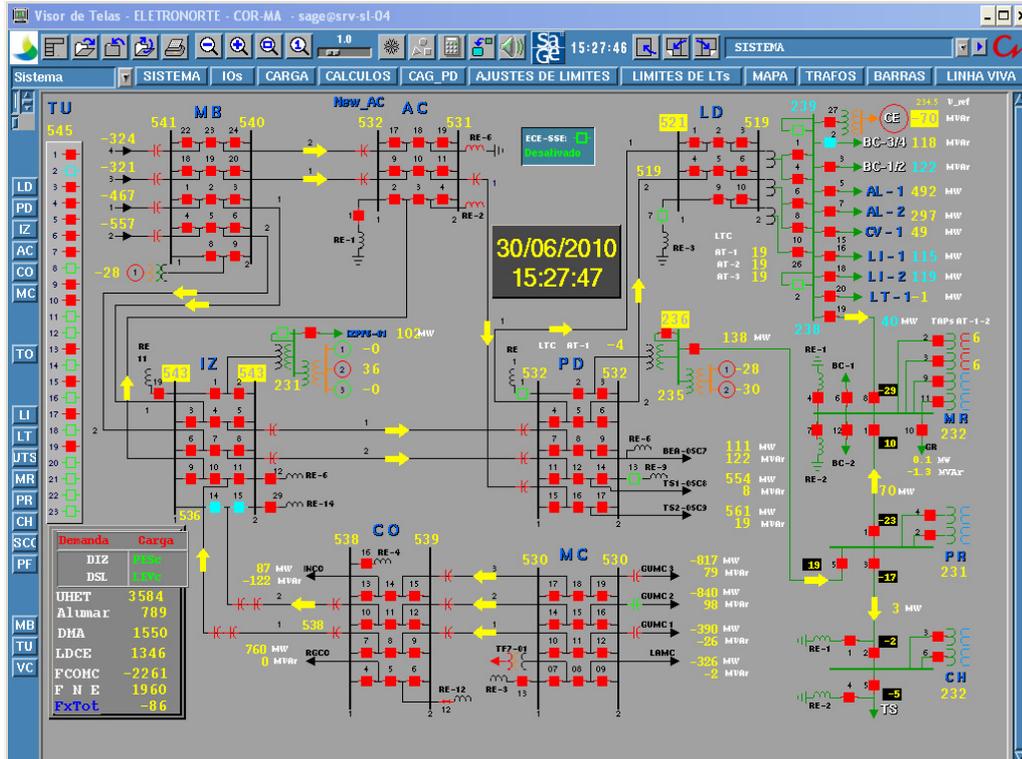


Figura 2.5 – Visão de uma rede elétrica monitorada através de um sistema SCADA.

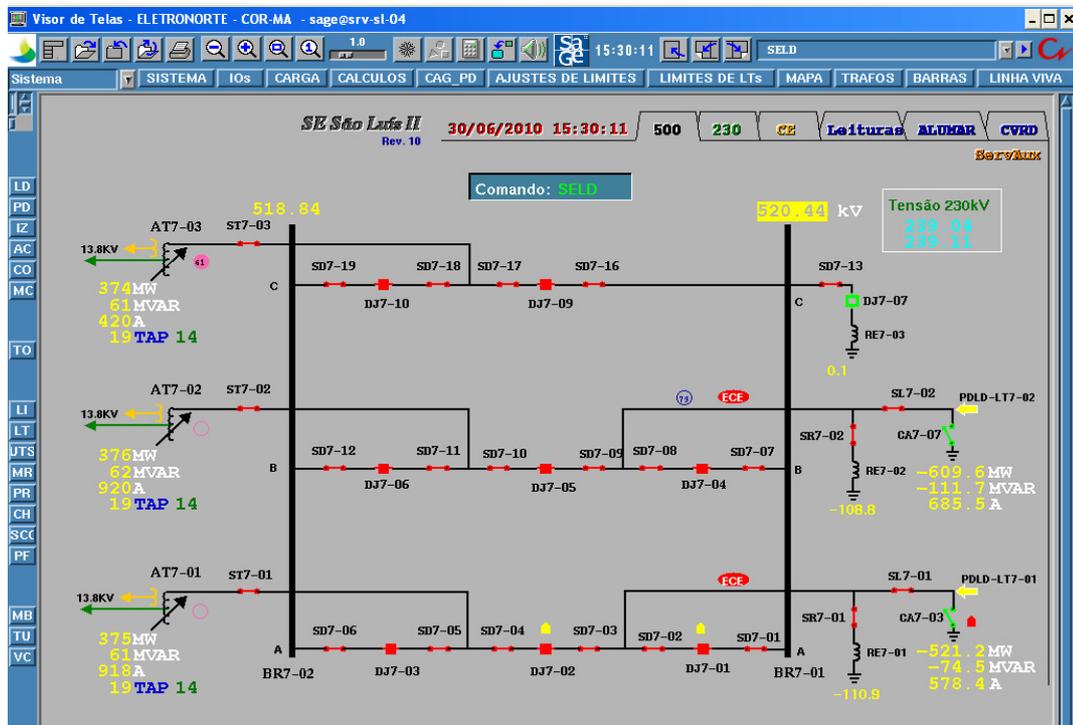
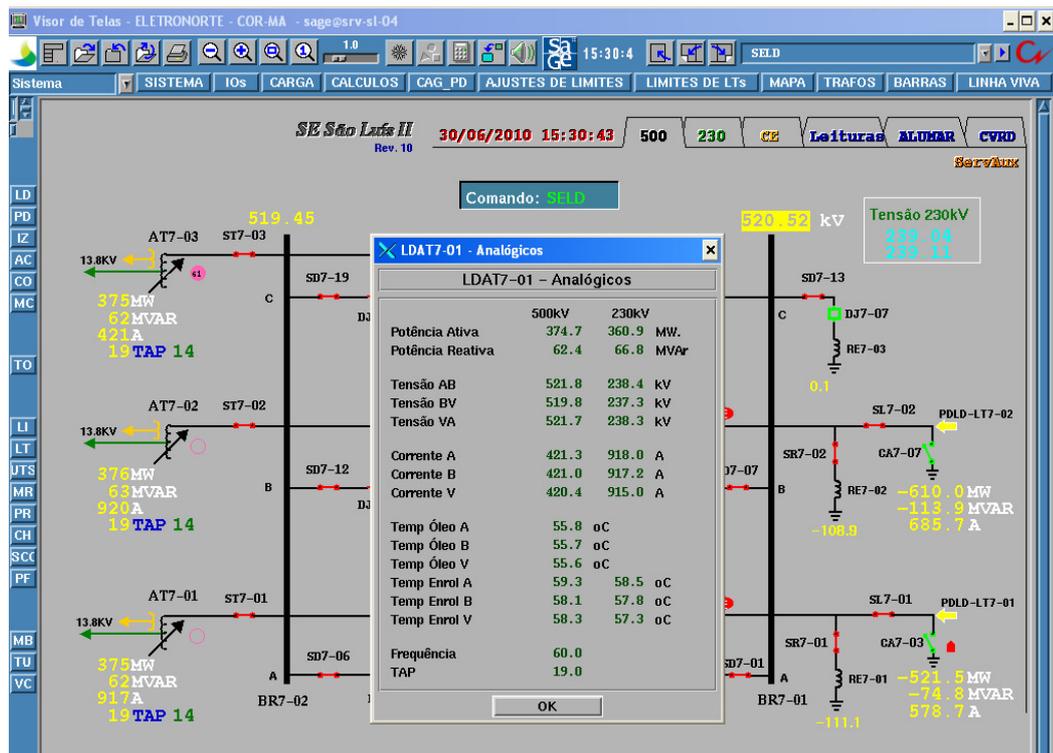


Figura 2.6 – Visão SCADA de uma subestação.



**Figura 2.7** – Variáveis supervisionadas em um transformador.

O tempo mínimo de atualização desses valores (*refresh*) ou varredura da supervisão em sistemas SCADA é um parâmetro de configuração. Valores típicos são: 02 segundos, 10 segundos, 01 minuto, 02 minutos.

Em subestações de grande porte, pode haver centenas de equipamentos de função crítica sendo monitorados pelo COR e cada um desses equipamentos pode ter dezenas de variáveis sendo monitoradas. No caso de transformadores, é comum monitorar mais de 30 variáveis elétricas e digitais. O que torna muito complexa a tarefa de observar e controlar o sistema elétrico em tempo real, principalmente em tomadas de decisão com fins de evitar panes no sistema.

---

## 2.5 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e problemáticas relacionadas ao processo de operação em tempo real de sistemas elétricos de potência.

Pode-se observar que as mudanças ocorridas na legislação do setor elétrico brasileiro têm forçado as empresas de geração, transmissão e distribuição a evitar a todo custo ocorrências (falhas no sistema elétrico) que levem a indisponibilidades de operação de equipamentos, devido à aplicação de pesadas multas da parcela variável. Porém, é notável a dificuldade dessas empresas em manter seus equipamentos disponíveis, principalmente devido ao fato dos seus parques elétricos estarem muito envelhecidos.

Além disso, percebe-se que a atual forma de monitoramento das subestações não é a mais adequada, haja vista que não permite uma interpretação rápida e fácil das condições operativas dos equipamentos. É necessário, portanto, encontrar alternativas que facilitem a identificação e previsão (em tempo real) de falhas em equipamentos nas subestações.

No próximo capítulo são apresentados conceitos da *lógica fuzzy* (*fuzzy logic*, do inglês. lógica difusa ou nebulosa no português), área da inteligência artificial que permite tratar matematicamente informações imprecisas, o que faz dessa área de pesquisa, uma boa candidata para auxiliar no monitoramento de equipamentos.

---

## 3 SISTEMAS FUZZY

A *Lógica Fuzzy* e *Sistemas Fuzzy* são áreas de pesquisa da Inteligência Artificial. A primeira que permite o tratamento formal e matemático de informações imprecisas. A segunda permite a modelagem, controle e automatização de atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que envolvam situações ambíguas e/ou desconhecidas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana.

Essas características fazem dessa área de pesquisa boa candidata para modelagem das tarefas de *monitoramento* e *diagnóstico* em sistemas de potência. É necessário, portanto, um tratamento científico adequado para o desenvolvimento de tais sistemas, atribuição pertinente ao ramo da Engenharia chamado de *Sistemas Fuzzy (Fuzzy Systems)*.

Na seção 3.1 é descrito em detalhes os conceitos, operações e propriedades fundamentais da *Lógica Fuzzy*. Na seção 3.2 são definidos os principais tipos de sistemas de inferência fuzzy e suas formulações matemáticas e na seção 3.3 são apresentadas as considerações finais sobre o Capítulo.

### 3.1 FUNDAMENTOS

Os seres humanos são capazes de lidar com processos complexos baseados em informações imprecisas ou aproximadas. A estratégia adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e geralmente pode ser expressa em termos linguísticos.

A teoria de conjuntos fuzzy e os conceitos de *Lógica Fuzzy* (nebulosa) podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma *se – então (se – então)*, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a teoria de *conjuntos fuzzy* e a *lógica fuzzy* fornecem o ferramental matemático para se lidar com tais regras linguísticas.

---

A teoria de *conjuntos fuzzy* foi concebida por L. A. Zadeh [11-12] com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso.

A *lógica fuzzy*, baseada nessa teoria, foi inicialmente construída com base nos conceitos já estabelecidos da lógica clássica (ou *booleana*).

Nas próximas subseções, serão abordados sucintamente os conceitos fundamentais de *conjuntos fuzzy* e da *lógica fuzzy*, bem como algumas definições e operações que permitem abordar os mecanismos de inferência que servem de base para o que se convencionou chamar *raciocínio aproximado* [15-18].

### 3.1.1 CONJUNTOS FUZZY

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Dado um conjunto  $A$  em um universo  $X$ , os elementos desse universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isso pode ser expresso pela função característica  $f_A$ :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

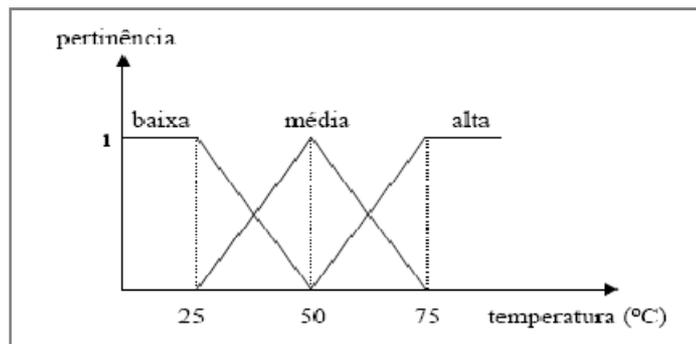
Essa função característica pode ser generalizada de modo que ela possa assumir um número infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ . Um conjunto fuzzy  $A$  em um universo  $X$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$  e representado por um conjunto de pares ordenados  $A = \{\mu_A(x)/x\}, x \in X$ , onde  $\mu_A(x)$  indica quanto  $x$  é compatível com o conjunto  $A$ . Determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto fuzzy com diferentes graus de pertinência.

Conjuntos fuzzy podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo  $X$  for discreto e finito, o conjunto fuzzy  $A$  é normalmente representado:

- Por um vetor contendo os graus de pertinência no conjunto  $A$  dos elementos correspondentes de  $X$ ;
- Por meio da notação  $\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i$  (não deve ser confundida com a soma algébrica).

### 3.1.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy. Por exemplo, a *temperatura* de determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média e alta. Esses valores são descritos através de conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 3.1:



**Figura 3.1** — Funções de pertinência para a variável temperatura.

Generalizando, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (*alto*, *baixo*, *pequeno*, *médio*, *grande*, *zero*, por exemplo), de conectivos lógicos (negação *não*, conectivo *e/ou*), de modificadores (*muito*, *pouco*, *levemente*, *extremamente*) e de delimitadores (como parênteses).

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados pelos termos matemáticos convencionais.

Formalmente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla  $[N, T(N), X, G, M]$ , na qual:

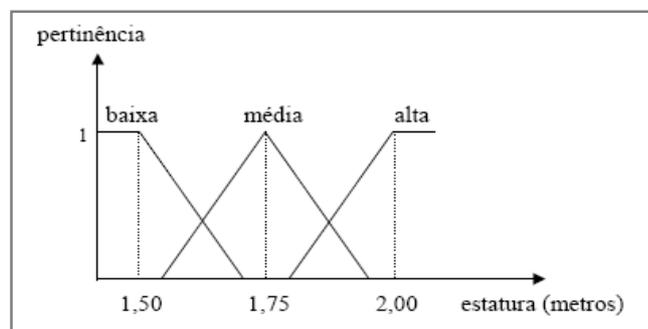
- $N$ : nome da variável;
- $T(N)$ : conjunto de termos de  $N$ , ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de  $N$ ;
- $X$ : universo de discurso;
- Regra sintática para gerar os valores de  $N$  como uma composição de termos de  $T(N)$ , conectivos lógicos, modificadores e delimitadores.

No caso da variável *temperatura* da Figura 3.1, teríamos:

- $N$ : temperatura;
- $T(N)$ : {baixa, média, alta};
- $X$ : 0 a 100 graus (por exemplo);
- $G$ : temperatura não baixa e não muito alta, por exemplo;
- $M$ : associa o valor anterior a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

### 3.1.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. Para exemplificar quanto o contexto é relevante na definição de funções de pertinência e sua distribuição, ao longo de dado universo, considere-se a variável linguística *estatura* (de pessoas), constituída pelos seguintes termos:  $T(\text{estatura}) = \{\text{baixa, média, alta}\}$ . Uma escolha possível de funções de pertinência seria (Figura 3.2):



**Figura 3.2** — Funções de pertinência para a variável estatura.

Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal e gaussiana. Em aplicações práticas, as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados.

### 3.1.4 DEFINIÇÕES E OPERAÇÕES

A exemplo do que ocorre com conjuntos ordinários, há uma série de definições e operações envolvendo conjuntos fuzzy. A seguir são descritas as operações principais.

Um conjunto fuzzy  $A$  em  $X$  é **vazio** se e somente se sua função de pertinência for igual a zero sobre todo  $X$ :

$$A = \emptyset \text{ se e somente se } \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X$$

O **complemento**  $A'$  de um conjunto fuzzy  $A$  é normalmente dado por:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X$$

Dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  em  $X$  são **iguais** se suas funções de pertinência forem iguais sobre todo  $X$ :

$$A = B \text{ se e somente se } \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

Um conjunto fuzzy  $A$  é um **subconjunto** de  $B$  se sua função de pertinência for menor ou igual à de  $B$  sobre todo  $X$ :

$$A \subset B \text{ se } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

No caso de conjuntos ordinários, a interseção de dois conjuntos  $A$  e  $B$  em um universo  $X$ , denotada por  $A \cap B$ , contém todos os elementos pertencentes a  $A$  e a  $B$  (isto é,  $f(x)_{A \cap B} = 1$  se  $x \in A$  e  $x \in B$  e  $f(x)_{A \cap B} = 0$  se  $x \notin A$  e  $x \notin B$ ). A união dos mesmos conjuntos, denotada por  $A \cup B$ , contém todos os elementos que pertencem a  $A$  ou a  $B$ . Fazendo-se uso dos operadores *minimum* (min ou  $\wedge$ ) e *maximum* (max ou  $\vee$ ), as funções características dos conjuntos resultantes (interseção e união) podem ser representadas da seguinte forma:

$$f_{A \cap B}(x) = f_A(x) \wedge f_B(x) \quad \forall x \in X$$

$$f_{A \cup B}(x) = f_A(x) \vee f_B(x) \quad \forall x \in X$$

Embora a união e a interseção possam ser descritas também por meio de outros operadores, Zadeh estendeu a descrição dada (com os operadores *min* e *max*) para a representação de interseção e união fuzzy, de modo que:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

Zadeh também sugeriu a soma algébrica [ $\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x)$ ] para a união

fuzzy e o produto algébrico  $[\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x)]$  para a interseção fuzzy. Posteriormente, com o objetivo de generalização, foram definidos operadores de base axiomática, baseados nos conceitos de norma triangular (**norma-t**) e co-norma triangular (**co-norma-t** ou **norma-s**).

Uma norma-t é uma operação binária  $*$  :  $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  tal que  $\forall x, y, z \text{ e } w \in [0,1]$  as seguintes propriedades são satisfeitas:

- Comutativa:  $x*y = y*x$ ;
- Associatividade:  $(x*y)*z = x*(y*z)$ ;
- Monotonicidade:  $x \leq y, w \leq z$ , então  $x*w < y*z$ ;
- Condições de contorno:  $x*0 = 0$  e  $x*1 = x$ .

Uma co-norma-t, ou norma-s, é uma operação binária  $\oplus$ :  $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  que satisfaz as seguintes propriedades:

- Comutativa:  $x \oplus y = y \oplus x$ ;
- Associatividade:  $(x \oplus y) \oplus z = x \oplus (y \oplus z)$ ;
- Monotonicidade:  $x \leq y, w \leq z$ , então  $x \oplus w < y \oplus z$ ;
- Condições de contorno:  $x \oplus 0 = 0$  e  $x \oplus 1 = x$ .

A bibliografia registra inúmeras normas-t e co-normas-t, mas em aplicações – principalmente em Engenharia – têm sido utilizados preponderantemente os operadores *min* e *produto algébrico* para interseção e operador *max* para a união.

### 3.1.5 PROPRIEDADES

Utilizando-se os operadores *max* e *min* para a descrição da união e interseção fuzzy, respectivamente, é fácil verificar que as seguintes propriedades algébricas de conjuntos ordinários também valem para conjuntos fuzzy:

- Involução:  $(A')' = A$
- Idempotência:  $\begin{cases} A \cap A = A \\ A \cup A = A \end{cases}$
- Comutatividade:  $\begin{cases} A \cap B = B \cap A \\ A \cup B = B \cup A \end{cases}$

- 
- Associatividade:  $\left\{ \begin{array}{l} (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) \\ (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) \end{array} \right\}$
  - Distributividade:  $\left\{ \begin{array}{l} A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{array} \right\}$
  - Absorção:  $\left\{ \begin{array}{l} A \cap (A \cup B) = A \\ A \cup (A \cap B) = A \end{array} \right\}$
  - Lei Transitiva:  $\text{se } A \subset B \text{ e } B \subset C \Rightarrow A \subset C$
  - Leis De Morgan:  $\left\{ \begin{array}{l} (A \cap B)' = A' \cup B' \\ (A \cup B)' = A' \cap B' \end{array} \right\}$

Observando que as funções de pertinência dos conjuntos vazio e universo ( $X$ ) são definidas como 0 e 1, respectivamente, verificam-se também as seguintes propriedades:

$$\left\{ \begin{array}{l} A \cap \emptyset = \emptyset \\ A \cup \emptyset = A \end{array} \right\} \quad \text{e} \quad \left\{ \begin{array}{l} A \cap X = A \\ A \cup X = X \end{array} \right\}$$

As propriedades de conjuntos clássicos que não se verificam para conjuntos fuzzy quando os operadores *max* e *min* são utilizados:

$$\mu_{A \cap A'}(x) = \mu_A(x) \wedge (1 - \mu_A(x)) \neq 0 \Rightarrow A \cap A' \neq \emptyset$$

$$\mu_{A \cup A'}(x) = \mu_A(x) \vee (1 - \mu_A(x)) \neq 1 \Rightarrow A \cup A' \neq X$$

Observa-se que, em geral, normas-t e co-normas-t não satisfazem as duas leis dadas anteriormente; exceções são o produto limitado  $\mu_A(x) * \mu_B(x) = \max[0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1]$  e a soma limitada  $\mu_A(x) \oplus \mu_B(x) = \min[1, \mu_A(x) + \mu_B(x)]$ .

A distributividade também não é satisfeita para a maioria das normas-t e co-normas-t; exceções são os operadores *min* e *max*.

### 3.1.6 RELAÇÕES FUZZY

Em conjuntos ordinários, uma relação exprime a presença ou a ausência de uma associação (interação) entre elementos de dois ou mais conjuntos. Formalmente dados dois universos  $X$  e  $Y$ , a relação  $R$  definida em  $X \times Y$  é um subconjunto do produto cartesiano do dois universos, de tal forma que  $R: X \times Y \rightarrow \{0, 1\}$ ; se algum  $x \in X$  e  $y \in Y$  estiverem relacionados,  $R(x, y) = 1$ , caso contrário,  $R(x, y) = 0$ .

Isso pode ser expresso pela seguinte função característica (ou função de pertinência bivalente):

$$f_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } (x, y) \in R \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Relações fuzzy generalizam o conceito de relações e representam o grau da associação entre elementos de dois ou mais conjuntos fuzzy. Exemplos de caráter linguístico seriam: *X é muito maior que y*, *x está próximo de y*. Formalmente, dado dois universos  $X$  e  $Y$ , a relação fuzzy  $R$  é um conjunto fuzzy em  $X \times Y$ , caracterizada por uma função de pertinência  $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$ , onde  $x \in X$  e  $y \in Y$ .

A interseção e a união de relações fuzzy são definidas de forma similar às mesmas operações com conjuntos fuzzy. Considerando-se duas relações fuzzy  $R$  e  $S$  definidas em um mesmo espaço  $X \times Y$ , as funções de pertinência resultantes são:

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y)$$

### 3.1.7 COMPOSIÇÃO DE RELAÇÕES FUZZY

A composição de relações representa papel muito importante em sistemas de inferência fuzzy. Considerem-se duas relações *não-fuzzy*  $P(X, Y)$  e  $Q(X, Y)$  que têm um conjunto ( $Y$ ) em comum.

A composição dessas duas relações é definida como um subconjunto  $R(X, Z)$  de  $X \times Z$  tal que  $(x, y) \in P$  e  $(y, z) \in Q$  e é denotada por  $R(X, Z) = P(X, Y) \circ Q(Y, Z)$ .

A operação realizada para se obter  $R(X, Z)$  por ser representada por qualquer uma (embora não somente) das seguintes expressões:

- composição max-min:

$$f_R(x, z) = f_{P \circ Q}(x, z) = \left\{ (x, z), \max_y \left[ \min \left( f_P(x, y), f_Q(y, z) \right) \right] \right\}$$

- composição max-produto:

$$f_R(x, z) = f_{P \circ Q}(x, z) = \left\{ (x, z), \max_y [f_P(x, y) \cdot f_Q(y, z)] \right\}$$

A composição de relações fuzzy é definida de maneira análoga à forma realizada em

relações *não fuzzy*. A expressão para a função de pertinência resultante da composição de duas relações fuzzy com um conjunto fuzzy em comum é generalizada para:

$$\mu_R(x, z) = \mu_{P \circ Q}(x, z) = \left\{ (x, z), \sup_y [\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)] \right\}$$

onde a norma-t (representada por \*) é normalmente o *min* ou o *produto*, embora seja permitido usar outras normas-t. No caso de *universos finitos*, a operação *sup* é o *maximum*.

### 3.1.8 PROPOSIÇÕES FUZZY

Uma frase da forma  $\square$  é A – onde  $\square$  é o nome de uma variável linguística e A é um conjunto fuzzy definido no universo de discurso X de  $\square$  - é chamada de *proposição fuzzy*. No caso mais geral de uma proposição fuzzy n-ária, a representação é dada através do produto cartesiano das variáveis linguísticas e da utilização de relações fuzzy.

Proposições fuzzy podem ser combinadas por meio de diferentes operadores, por exemplo, os conectivos lógicos *e* ou *ou*, a negação *não* e o operador de implicação *se então*. As proposições fuzzy daí resultantes podem ser descritas em termos de relações fuzzy.

Em geral, o conectivo *e* é usado com variáveis em diferentes universos, enquanto o conectivo *ou* conecta valores linguísticos de uma mesma variável, os quais estão no mesmo universo. A operação *não* é considerada semanticamente sinônima da negação em linguagem natural:  $A = \{\mu_A(x)/x\} \Rightarrow \text{não } A = \{(1 - \mu_A(x))/x\}$ .

Considere-se

- Variáveis linguísticas de nomes  $x$  e  $y$  definidas nos universos  $X$  e  $Y$ , respectivamente;
- Conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  definidos nos universos  $X$  e  $Y$ , respectivamente;
- Proposições fuzzy  $\left\{ \begin{array}{l} x \text{ é } A \\ y \text{ é } B \end{array} \right\}$ .

Conectando-se essas proposições por meio do conectivo *ou*, tem-se a proposição fuzzy ( $x$  é A) ou ( $y$  é B), que pode ser expressa por uma relação fuzzy  $R_{A \text{ ou } B}$  cuja função de pertinência é dada por  $\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \oplus \mu_B(y)$ . Caso as proposições sejam conectadas por *e*, a função de pertinência da relação  $R_{A \text{ e } B}$  é dada por  $\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y)$ . Esclarecendo, o operador usado para representar o conectivo *ou* é normalmente uma co-

norma-t, enquanto uma norma-t é utilizada na representação do conectivo *e*.

O operador *se - então* é também conhecido como declaração condicional fuzzy e descreve a dependência do valor de uma variável linguística em relação ao valor de outra. Em muitas aplicações essas declarações condicionais são simplesmente denominadas regras linguísticas, constituindo-se em frases da forma *se*  $x$  é  $A$  *então*  $y$  é  $B$ .

Uma frase desse tipo é normalmente denominada implicação e é representada por uma relação  $R_{A \rightarrow B}$  expressa pela função de pertinência  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = f_{\rightarrow}(\mu_A(x), \mu_B(y))$ , onde  $f$  é *operador de implicação*. Quando uma declaração condicional apresenta mais do que uma variável *antecedente* ( $x$  é  $A$ ), as diversas variáveis são geralmente combinadas por meio do conectivo *e*:

$$\textit{se } (x_1 \text{ é } A_1) \textit{ e } (x_2 \text{ é } A_2) \textit{ e } \dots \textit{ e } (x_m \text{ é } A_m), \textit{ então } (y \text{ é } B)$$

que pode ser representada por uma relação expressa pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_m, y) = f_{\rightarrow}(f_e(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_m}(x_m)), \mu_B(y))$$

onde  $f_e$  é o operador (geralmente *min* ou *produto*) que representa o conectivo *e*.

Várias declarações podem ser combinadas por meio do conectivo *ou*:

$$R^1: \textit{se } (x \text{ é } A^1) \textit{ então } (y \text{ é } B^1) \textit{ ou}$$

$$R^2: \textit{se } (x \text{ é } A^2) \textit{ então } (y \text{ é } B^2) \textit{ ou}$$

$$R^n: \textit{se } (x \text{ é } A^n) \textit{ então } (y \text{ é } B^n).$$

A função de pertinência do conjunto  $R^N$  de declarações é:

$$\mu_{R^N}(x, y) = f_{ou}[\mu_{R^1}(x, y), \mu_{R^2}(x, y), \dots, \mu_{R^m}(x, y)]$$

$$\mu_{R^N}(x, y) = f_{ou}[f_{\rightarrow}(\mu_{A^1}(x), \mu_{B^1}(y)), f_{\rightarrow}(\mu_{A^2}(x), \mu_{B^2}(y)), \dots, f_{\rightarrow}(\mu_{A^n}(x), \mu_{B^n}(y))]$$

### 3.1.9 LÓGICA FUZZY

Os conceitos de Lógica Fuzzy nasceram inspirados na lógica tradicional, embora modificações tenham se tornado necessárias para adaptá-los aos requisitos de aplicações em engenharia. A extensão da lógica tradicional para a Lógica Fuzzy foi efetuada pela simples substituição das funções características (ou funções de pertinência bivalentes) da primeira por funções de pertinência fuzzy, à semelhança extensão de conjuntos ordinários para conjuntos

fuzzy. Assim, a declaração condicional se  $x$  é  $A$  então  $y$  é  $B$  tem uma função de pertinência  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$  que mede o grau de verdade da relação de implicação entre  $x$  e  $y$ .

Exemplos de  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ , obtidos pela simples *extensão* de funções de pertinência bivalentes da lógica proposicional para a Lógica Fuzzy, são:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = 1 - \min[\mu_A(x), 1 - \mu_B(y)]$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)]$$

Quanto à inferência, o *modus ponens* é estendido para o modus ponens generalizado, descrito da seguinte forma:

*Premissa 1:  $x$  é  $A^*$*

*Premissa 2: se  $x$  é  $A$  então  $y$  é  $B$*

*Conseqüência:  $y$  é  $B^*$*

No *modus ponens generalizado*, o conjunto fuzzy  $A^*$  não é necessariamente o mesmo que  $A$  (antecedente da regra), assim como  $B^*$  não é necessariamente o mesmo que o conseqüente  $B$ . Na lógica clássica, uma regra será “disparada” somente se a premissa 1 for exatamente o antecedente da regra e o resultado será exatamente o conseqüente dessa regra. Na Lógica Fuzzy, uma regra será disparada se houver um *grau de similaridade* diferente de zero entre a premissa 1 e antecedente da regra; o resultado será um conseqüente com grau de similaridade não-nulo em relação ao conseqüente da regra.

Formalmente, a função de pertinência do conseqüente,  $\mu_{B^*}(y)$ , é obtida a partir do conceito de *regra de inferência composicional*  $B^* = A^* \circ R$ , na qual a conexão entre duas proposições é representada *explicitamente* por uma relação  $R$ . O *modus ponens generalizado* (em que a relação fuzzy é representada de modo implícito pela regra *se - então*) é um caso especial dessa regra, embora os dois nomes sejam frequentemente empregados como “sinônimos”.

A questão pode ser colocada como: dada uma relação entre duas variáveis fuzzy, qual o conseqüente para dado antecedente? Isso é equivalente a se considerar duas proposições fuzzy: uma simples, correspondendo a um fato, e outra, a uma regra fuzzy, em que a primeira relação é meramente um conjunto fuzzy.

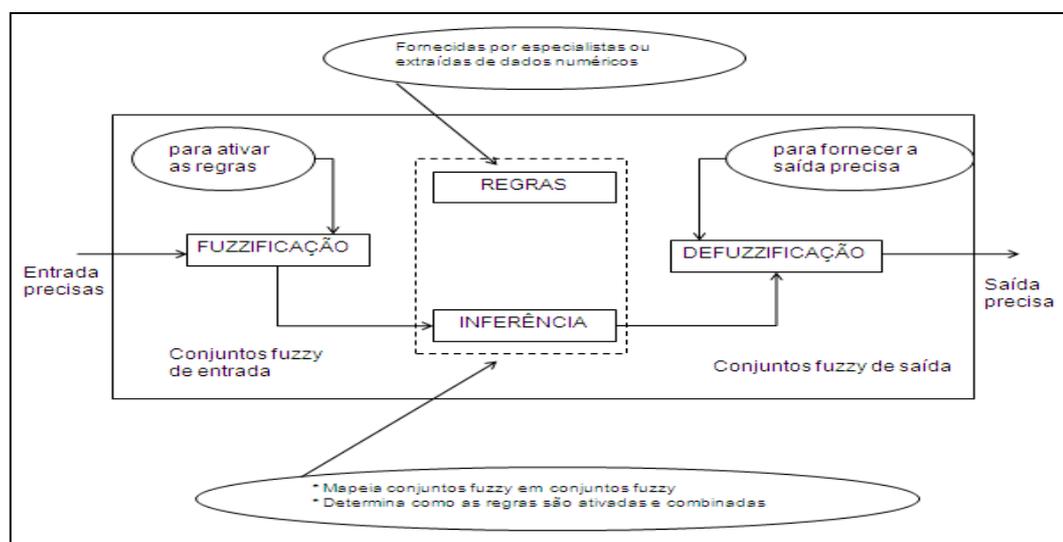
Utilizando a expressão para *composição de um conjunto fuzzy com uma relação fuzzy*, tem-se que:  $\mu_{B^*}(y) = \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) * \mu_R(x, y)]$ .

Como  $R$  é uma relação de implicação, a expressão anterior pode ser reescrita como:

$$\mu_{B^*}(y) = \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) * \mu_{A \rightarrow B}(x, y)]$$

## 3.2 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

Um sistema de inferência fuzzy é mostrado na Figura 3.3, na qual estão identificadas as funções de cada bloco [17].



**Figura 3.3** – Sistema de inferência fuzzy genérico.

Nesse sistema de inferência fuzzy, consideram-se entradas não-fuzzy, ou precisas – resultantes de medições ou observações (conjunto de dados, por exemplo) – que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disso, é necessário efetuar-se um mapeamento desses dados precisos para os conjuntos fuzzy (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de *fuzzificação*. Nesse estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para dada situação.

Uma vez obtido o conjunto fuzzy de saída através do processo de inferência (*modus ponens generalizado*), no estágio de *desfuzzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação. Isso se faz necessário, pois em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. No caso de um sistema de controle, por exemplo, em que o controle é efetuado por um sistema de inferência fuzzy (ou controlador fuzzy), este deve fornecer à planta dados ou sinais precisos, já que a “apresentação” de um conjunto fuzzy à entrada da

---

planta não teria significado algum. Existem vários métodos de desfuzzificação na literatura; os dois mais empregados são o *centro de gravidade* e a *média dos máximos*.

As *regras* podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças lingüísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência. Em sistemas de controle, esse tipo de sistema só terá bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle forem consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo *se - então* pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que eles sejam do problema em questão. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de dados numéricos. Esses métodos são particularmente úteis em problemas de classificação e previsão de séries temporais.

No estágio de *inferência* ocorrem as operações com conjuntos fuzzy: combinação de *antecedentes* das regras, *implicação* e *modus ponens generalizado*. Os conjuntos fuzzy de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao conseqüente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente gerados automaticamente a partir dos dados.

Um aspecto importante é a definição dos conjuntos correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e à(s) de saída (conseqüente(s)), pois o desempenho do sistema de inferência dependerá do número de conjuntos e de sua forma. Pode-se efetuar uma sintonia “manual” das funções de pertinência dos conjuntos, mas é mais comum empregar-se métodos automáticos. A integração entre sistemas de inferência fuzzy e redes neurais – originando os sistemas *neurofuzzy* – ou algoritmos genéticos tem-se mostrado adequados para a sintonia de funções de pertinência, assim como para a geração automática de regras.

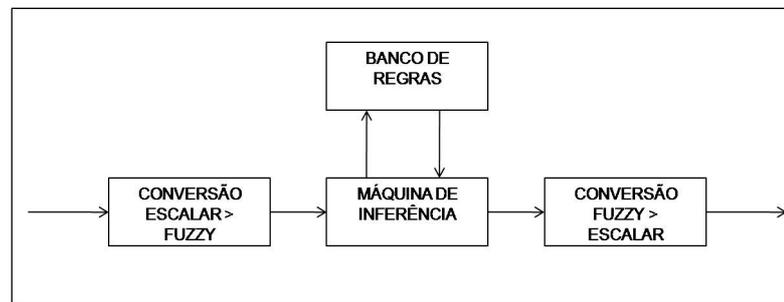
A seguir, são descritos os dois principais modelos de inferência fuzzy, a saber, modelo de Mamdani e o modelo Takagi-Sugeno [16].

### 3.2.1 MODELO DE MAMDANI

Na década de 1970, [13] propôs um método de inferência fuzzy que foi por muitos anos um padrão para a utilização dos conceitos da lógica fuzzy em processamento de conhecimento. As regras de produção em um modelo de Mamdani possuem relações fuzzy tanto em seus antecedentes como em seus conseqüentes. Uma regra típica deste modelo é mostrada em (3.1).

$$\begin{aligned} & \text{Se } \textit{Temperatura} = \textit{Aumentando Muito} \textit{ E } \textit{Pressão} = \textit{Muito Alta} \\ & \text{Então } \textit{Perigo De Explosão} = \textit{Grande} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Como a maioria das aplicações de interesse possui sistemas convencionais de aquisição e atuação baseados em grandezas numéricas, o modelo de Mamdani inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos fuzzy equivalentes e, posteriormente, as variáveis fuzzy geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes. Na Figura 3.4 é mostrado um diagrama típico de um sistema de processamento de conhecimento fuzzy que utiliza este modelo de inferência.



**Figura 3.4** — Modelo de inferência de Mamdani.

Pelo diagrama acima, a máquina de inferência recebe valores fuzzy provenientes do módulo de interface de entrada, processa as regras existentes na base de conhecimento e gera um conjunto fuzzy de saída para o módulo de interface correspondente, a partir da composição de todas as regras disparadas. Por uma regra disparada, entende-se uma regra cujo processamento do antecedente para as entradas atuais gerou graus de pertinência não-nulos, ou seja, a relação fuzzy entre as entradas e os termos primários do antecedente é maior que zero.

A regra semântica tradicionalmente utilizada para o processamento de inferências com o modelo de Mamdani é chamada de inferência *Max-Min*. Ela utiliza as operações de união e de interseção entre conjuntos da mesma forma que Zadeh [12], por meio dos operadores de máximo e de mínimo, respectivamente. Considerando uma regra de produção fuzzy genérica como mostrada em (3.2) o método de inferência *Max-Min* proposto por Mamdani era detalhado a seguir.

$$\text{Se } x_1 = A_i \text{ E } x_2 = A_j \text{ E } \dots \text{ E } x_p = A_j \text{ então } y_1 = B_i \text{ E } y_2 = B_m \quad (3.2)$$

Em (3.2),  $x_i$  são as entradas do sistema,  $A_1, \dots, A_j$  são termos primários definidos nas

partições fuzzy de cada variável de entrada,  $y_1$  e  $y_2$  são variáveis de saída e  $B_1, \dots, B_m$  são termos primários definidos em suas partições fuzzy.

Durante o processo de conversão escalar→fuzzy, os antecedentes de cada regra são processados por meio da intersecção fuzzy entre os graus de pertinência das entradas atuais nos termos primários definidos em cada uma. Este processo gera um grau de pertinência de disparo para cada regra de produção. Em outras palavras, é calculado para a  $k$ -ésima regra da base de conhecimento um coeficiente de disparo segundo (3.3), onde o índice  $k$  nos conjuntos fuzzy denotam os termos primários que compõem a regra  $k$  na base de conhecimento. Este processamento transformou informações quantitativas em informações qualitativas e é considerado um processo de generalização. Em inglês, ele é comumente chamado de *fuzzification*.

$$D^{(k)} = T \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] = \min \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] \quad (3.3)$$

Todas as regras para as quais o coeficiente de disparo for maior que zero são ditas regras que dispararam para as entradas atuais. Isto quer dizer que elas vão contribuir para o cálculo da saída correspondente do sistema de inferência. Os coeficientes de disparo, por sua vez, vão limitar os valores máximos dos conjuntos fuzzy de saída gerados por estas regras. Finalmente, uma operação global de união vai compor um conjunto fuzzy para cada variável de saída, contendo informações sobre todas as regras disparadas para as entradas atuais. Em (3.4), é mostrada a composição deste conjunto para o caso da saída  $y_2$  da regra mostrada em (3.2). O universo de discurso desta variável de saída é composto pelos elementos  $y \in U_{y_2}$ .

$$\mu_{B_i'}(y) = S_{k=1..n} \left[ T \left( D^{(k)}, \mu_{B_i}(y) \right) \right] = \max_{k=1..n} \left[ \min \left( D^{(k)}, \mu_{B_i}(y) \right) \right], \forall y \in U_{y_2} \quad (3.4)$$

O processo de inferência acima descrito transforma uma informação qualitativa em outra informação qualitativa, por meio de uma conversão. O conjunto fuzzy gerado durante o processo de inferência pode então ser utilizado diretamente em um diagnóstico qualitativo de tomada de decisão, ou será convertido em um valor escalar proporcional para atuação externa por meio de atuadores convencionais, no caso de um sistema de controle.

A conversão fuzzy→escalar transforma informações qualitativas em uma informação quantitativa, sendo um processo de especificação. Em inglês, este processo é comumente chamado de *defuzzification*. Para a regra de produção definida em (3.2), parte-se do conjunto fuzzy de saída  $\mu_{B_i'}(y)$  obtido pelo processo de inferência e chega-se a um valor escalar  $y_2$  correspondente.

Os métodos mais utilizados para a conversão fuzzy→escalar são o método do centro de massa e o método da média dos máximos. O método do centro de massa calcula, para um dado conjunto fuzzy de saída proveniente de uma base de conhecimento processada, a abscissa (no universo de discurso definido para a variável em questão) do ponto de centro de massa correspondente e a utiliza como valor escalar de saída. A expressão analítica da implementação deste método é mostrada em (3.5).

$$y_2^{\wedge} = \frac{\sum_{y \in U_{y_2}} y \cdot \mu_{B'_i}(y)}{\sum_{y \in U_{y_2}} \mu_{B'_i}(y)} \quad (3.5)$$

No caso do método da média dos máximos, o valor numérico da saída corresponde ao ponto do universo de discurso que corresponde à média dos pontos de máximos locais da função de pertinência do conjunto de saída, produzida pelo processo de inferência, como mostrado em (3.6).

$$y_2^{-} = \frac{\sum_{y \in U_{y_2}} y \cdot \mu_{B'_i}(y_k)}{n_{y_2}}, \text{ onde } y_k = \max_{y \in U', U' \subset U_{y_2}} [\mu_{B'_i}(y)] \quad (3.6)$$

### 3.2.2 MODELO DE TAKAGI-SUGENO-KANG (TSK)

Na década de 1980, foi proposta uma estrutura de inferência também baseada na teoria de conjuntos fuzzy [14]. Esta estrutura é denominada sistema de inferência de Sugeno, modelo de inferência paramétrico ou simplesmente modelo TSK. Os autores demonstraram que estes modelos funcionam como bons aproximadores para sistemas que podem ser completa ou satisfatoriamente representados apenas por meio de suas relações de entrada e saída. Similarmente ao modelo de Mamdani, os modelos fuzzy TSK são também baseados na utilização de uma base de regras condicionais de inferência. Porém, no modelo TSK os consequentes das regras em vez de serem formados por relações fuzzy, compõem-se de equações paramétricas relacionando as entradas e saídas do processo. A expressão (3.7) mostra uma regra genérica de um modelo TSK.

$$\text{Se } x_1 = A_i \text{ e } x_2 = A_j \text{ e } \dots \text{ e } x_p = A_j \text{ então } y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (3.7)$$

O processamento de conhecimento em um modelo TSK é similar ao dos modelos de Mamdani. A etapa de conversão escalar → fuzzy é idêntica, como mostrado em (3.8), exceto pelo fato de que a norma  $T$  utilizada na maioria das aplicações não é a função “min(.)”.

$$D^{(k)} = T \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] \quad (3.8)$$

A saída numérica é calculada diretamente pela soma das saídas das regras, ponderada pelos valores de ativação  $D^{(k)}$  de cada uma delas (3.9). Um modelo TSK com múltiplas saídas sempre pode ser transformado em múltiplos modelos de saída única.

$$y^{\wedge} = \frac{\sum D^{(i)} \cdot \varphi_i(x_1, \dots, x_p)}{\sum D^{(i)}}, \text{ onde } i = 1, \dots, k \quad (3.9)$$

É comum a utilização de um modelo TSK em substituição a um modelo matemático convencional em um esquema de controle ou modelagem de sistemas reais. Para ser utilizado desta maneira, é necessário que o modelo seja ajustado para se comportar como o sistema real que está representando. Assim, devem ser criadas partições fuzzy para as variáveis de entrada, ou seja, são definidos conjuntos fuzzy nos universos de discurso das variáveis. Por meio de um conjunto de dados de entrada e saída do sistema a ser modelado, os parâmetros  $P$  dos consequentes destas regras são estimados segundo algum índice de desempenho definido pelo usuário. A minimização do erro quadrático entre a saída do modelo de Sugeno e os dados de saída disponíveis é normalmente utilizada como medida de desempenho. Neste caso, um algoritmo de mínimos quadrados recursivo (MQR) pode ser utilizado para realizar esta estimação.

Uma vez que as partições fuzzy e os parâmetros de saída estão otimizados segundo o índice escolhido pelo usuário, o modelo está pronto para substituir o modelo convencional existente. Em (3.10), a expressão relaciona as entradas e as saídas de um modelo TSK de primeira ordem, utilizando um conjunto  $k$  de regras fuzzy e  $p$  entradas. Ela é consistente com a regra de produção genérica mostrada em (3.7).

$$y(x_1, x_2, \dots, x_p) = \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot (P_{i0} + P_{i1} \cdot x_1 + \dots + P_{ip} \cdot x_p) \quad (3.10)$$

$$\beta_i = \frac{T \left[ \mu_{A_{j1}}(x_1), \dots, \mu_{A_{jp}}(x_p) \right]}{\sum_{j=1}^k T \left[ \mu_{A_{j1}}(x_1), \dots, \mu_{A_{jp}}(x_p) \right]} \quad (3.11)$$

A seguir, é descrito resumidamente um método de ajuste de modelos TSK baseado em um índice de desempenho quadrático. Dado um conjunto de dados de entrada e saída representado por  $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{kj}, y_j$ , onde  $(j = 1, 2, \dots, m)$ .

O conjunto de parâmetros  $P$  dos consequentes das regras fuzzy pode ser estimado por MQR. Considerando uma matriz  $X$  de dimensões  $m \times k \cdot (p + 1)$ , um vetor  $Y$  de dimensão  $m$  e um vetor  $P$  de parâmetros de dimensão  $k \cdot (p + 1)$ , tem-se:

$$X = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \dots & \beta_{k1} & x_{11} \cdot \beta_{11} & \dots & x_{11} \cdot \beta_{k1} \\ & & & x_{p1} \cdot \beta_{11} & & \\ \dots & & & \dots & & \dots \\ \beta_{1m} & & & & x_{1m} \cdot \beta_{1m} & \\ \dots & & x_{p1} \cdot \beta_{1m} & \dots & & x_{p1} \cdot \beta_{km} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$Y = [y_1, \dots, y_m]^T \quad P = [P_{10}, \dots, P_{k0}, P_{11}, \dots, P_{k1}, \dots, P_{kp}]^T$$

Então os parâmetros  $P$  podem ser calculados por:

$$P = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (3.13)$$

E, alternativamente, podem ser estimados de forma recursiva por meio de um filtro de Kalman em regime permanente do tipo:

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i \cdot S_{i+1} \cdot (y_{i+1} - x_{x+1} \cdot P_i) \\ S_{i+1} &= S_i - \frac{S_i \cdot x_i + x_{i+1} \cdot S_i}{1 + x_{i+1} \cdot S_i \cdot x_{i+1}^T} \end{aligned} \quad (3.14)$$

onde  $i = 0, 1, \dots, m - 1$ .

Na Equação (3.14),  $x_i$  são linhas da matriz  $X$ . Os valores iniciais  $P_0$  e  $S_0$  são definidos como em (3.15) a seguir, onde  $\alpha$  é um número escalar positivo com grande módulo e  $I$  uma matriz-identidade de dimensões  $k \cdot (p + 1) \times k \cdot (p + 1)$ .

$$\begin{aligned} P_0 &= 0 \\ S_0 &= \alpha \cdot I \end{aligned} \quad (3.15)$$

---

A matriz  $S$  é comumente chamada na literatura de matriz de covariâncias. Ela mede a correlação entre os parâmetros  $P$  durante o treinamento.

### 3.3 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foram apresentados os principais conceitos, propriedades e operações matemáticas da Lógica Fuzzy e os principais sistemas de inferência fuzzy, a saber, Mandani e Takagi-Sugeno.

A metodologia proposta neste trabalho estará fortemente centrada no desenvolvimento de sistemas de inferência fuzzy capazes de mapear qualitativamente as variáveis elétricas monitoradas nos transformadores de potência em regiões operacionais. A justificativa está no fato que sistemas fuzzy possibilitam encapsular nos mesmos o conhecimento sobre diagnóstico de falhas de engenheiros, técnicos e operadores das subestações, além de permitir trabalhar matematicamente com informações imprecisas.

No próximo capítulo, será apresentada uma classificação para sistemas de monitoramento e uma revisão das principais técnicas convencionais de diagnóstico de falhas em transformadores de potência imersos em óleo.

---

## 4 MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Neste capítulo é apresentado um quadro geral do estado da arte em monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência. É apresentada uma classificação para sistemas de monitoramento das condições operativas de transformadores e uma revisão das principais técnicas convencionais e inteligentes (que utilizam técnicas da *soft computing*) de diagnóstico de falhas em transformadores imersos em óleo. O objetivo principal é estabelecer que tipo de sistemas de monitoramento a metodologia proposta pode suportar, além de situar onde a proposta traz melhorias ao estado da arte.

Na seção 4.1 é apresentada uma classificação para tipos de sistemas de monitoramento de transformadores de potência. A seção 4.2 apresenta as principais técnicas convencionais de diagnósticos de falhas em transformadores imersos em óleo. A seção 4.3 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre a utilização de técnicas inteligentes aplicadas em diagnóstico de falhas e, por fim, na seção 4.4 são apresentadas as considerações finais sobre o Capítulo.

### 4.1 MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES

O monitoramento em tempo real (*online*) de transformadores em operação no sistema elétrico de potência pode ser definido como o arquivamento de coleções de dados relevantes destes equipamentos. Diagnóstico seria a tarefa de interpretar esses dados monitorados junto ao seu histórico operacional bem como o juízo estatístico da taxa de falhas.

Um sistema de monitoramento *online* é particularmente adequado para a utilização com transformadores de potência, como ferramenta para auxiliar no fornecimento *confiável* de potência elétrica de *qualidade*, para reduzir custos de manutenção e explorar carregabilidade ótima de potência do equipamento. Além disso, o tempo de vida restante do equipamento pode ser estimado com dados relevantes historiados.

#### 4.1.1 NÍVEIS DE COMPLEXIDADE DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO

No mercado atual existem diferentes níveis de complexidade nos sistemas de monitoramento [19]. A Tabela 4.1 apresenta a descrição resumida desses sistemas quanto à complexidade de monitoramento.

**Tabela 4.1** – Níveis de complexidade dos sistemas de monitoramento de transformadores.

NÍVEL	EXEMPLO	BENEFÍCIO
Monitoramento do Transformador	Medida do nível de gás no óleo Imagem térmica	Alarmes Advertências
Sistema de Monitoramento do Transformador	Monitoramento de várias medidas	Valor de Status dos Principais Componentes
Sistema de monitoramento das condições operativas de transformadores - compreensível e interativo	Monitoramento de todos os principais componentes com apenas um único sistema.	Valor de status do transformador e funções de diagnósticos e sistemas especialistas acoplados.

No caso mais simples, monitorar um transformador significa a medição de alguns poucos parâmetros, tal como uma imagem térmica e/ou a medida de gás no óleo. Este tipo de monitoramento torna possível a notificação dos usuários quando o limiar máximo (*threshold*) de determinada grandeza é alcançado e/ou ultrapassado. A correlação com outros valores não é possível. O gerenciamento de falhas e/ou da manutenção é limitado e a interpretação dos dados obtidos fica por conta dos próprios usuários.

O próximo nível de complexidade é do tipo *sistema de monitoramento de transformadores*. Neste nível é realizado o monitoramento básico dos principais componentes de um único transformador. Mais de um parâmetro é observado ao mesmo tempo e são utilizados modelos simples a fim de avaliar a saúde dos componentes supervisionados.

Um *sistema de monitoramento da condição operativa de transformadores* – compreensível e interativo – é aquele que integra informações de todos os principais componentes de um transformador em um único sistema. Nesse nível de monitoramento, deve existir a correlação entre informações de vários transformadores, porque os dados desses equipamentos são armazenados em um único banco de dados e em apenas um único sistema. A interpretação dos dados é exibida como uma nota para a saúde do transformador e de seus componentes. Sistemas especialistas e funções de diagnóstico suportam as ações do usuário em tomadas de decisões.

---

Nota-se dessa forma, que sistemas modernos de monitoramento são altamente adequados para gerenciar a complexidade dos sistemas de potência, uma vez que eles podem realizar correlações entre as variáveis monitoradas, fazer a interpretação automática dos dados, fornecer informações sobre a condição operativa geral do transformador, entre outras informações pertinentes para a operação em tempo real.

## 4.2 TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE DIAGNÓSTICO

A seguir, serão apresentadas as principais técnicas convencionais utilizadas em tarefas de diagnóstico de falhas na isolação de transformadores de potência imersos em óleo.

### 4.2.1 ANÁLISE DA UMIDADE

A umidade é um fator importante na avaliação da condição de isolação, pois os materiais isolantes na presença de umidade tendem a absorver água, tendo como resultado o aumento da condutividade elétrica, reduzindo a força elétrica de coesão das partículas do papel isolante [20] [21].

Atualmente existem vários métodos de medição direta de umidade, como por exemplo, a utilização de um filme fino capacitivo como sensor de umidade e que apresenta bons resultados em condições variadas de temperatura ambiente. A técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é bastante eficiente para detectar pequenas mudanças na umidade contida no papel isolante e também para determinar a umidade contida no papel impregnado por óleo [22][23]. Muitas técnicas de diagnósticos baseados no dielétrico também estão em uso como ferramenta de análise indireta da umidade do sistema de isolação óleo-papel.

A finalidade de existirem vários métodos diretos ou indiretos de diagnóstico da umidade decorre da necessidade de manter a unidade transformadora em operação, pois a umidade é um catalisador das reações químicas que podem ocorrer e prejudicar o isolamento do transformador.

Além dos cuidados necessários refletidos em processos de manutenção periódica, existem equipamentos que utilizam filtros de coalescência (junção de duas ou mais gotas de um líquido que se encontra disperso numa emulsão) para realizar a secagem do óleo

---

(eliminação da umidade) com o transformador energizado. Isto tem sido uma forma razoável adotada por muitas empresas de energia a fim de manterem as unidades em operação [24].

#### 4.2.2 ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS (AGD)

A análise dos gases dissolvidos no óleo isolante é uma técnica bastante utilizada e permite determinar a condição de operação do isolamento, identificando as eventuais falhas que podem ocorrer ou que estão em processo inicial de formação (falhas incipientes).

Normalmente, as causas estão relacionadas ao sobreaquecimento do material isolante ou da ocorrência de descargas elétricas internas geradas a partir da formação de gases, denominados de *gases de falha*. Esses gases são produzidos em função da degradação do óleo do transformador e do material isolante, sendo o primeiro indício de mau funcionamento do equipamento [25].

Os gases gerados devido às descargas de baixa energia, de alta energia e sobreaquecimento e que levam à decomposição do material isolante, provocam a formação de gases caracterizados como combustíveis e não-combustíveis que tendem a se manter dissolvidos no óleo. Um transformador que não foi submetido a nenhum tipo de análise de gás, pode ao longo dos anos ter sido submetido a várias perturbações decorrendo a formação de grandes quantidades de gases combustíveis, o que representa um grande risco para a operação [26].

Os principais *gases de falha* gerados a partir da operação do transformador são do tipo hidrocarbonetos (metano  $CH_4$ , etano  $C_2H_6$ , etileno  $C_2H_4$ , acetileno  $C_2H_2$ ), hidrogênio ( $H_2$ ) e óxidos de carbono ( $CO$  e  $CO_2$ ). Existem ainda traços de outros gases formados durante o processo de operação e são classificados como *gases não-falha*, como o nitrogênio ( $N_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) [27].

Os primeiros trabalhos relacionados nessa área foram voltados para estabelecer uma relação entre o *tipo do gás* e a *severidade da falha* apresentada. Normalmente, as causas de gases de falha são classificadas como sendo de origem térmica (sobreaquecimento) ou elétrica (corona e arco). Porém, o processo de falha também está relacionado com as temperaturas esperadas no óleo em função das perturbações que o equipamento esteja submetido (sobrecargas ou transitórios) [20]. Portanto, a ocorrência de sobreaquecimento no isolamento provoca a elevação da temperatura do óleo a valores que variam em função da severidade.

---

Da mesma forma, a ruptura da rigidez dielétrica do óleo, dependendo da intensidade das descargas internas, pode ser associada com as temperaturas de formação de arco. Assim, podem ser estabelecidas faixas de temperatura para as quais existe a maior probabilidade de uma ocorrência, de forma que falhas específicas que apresentam certa intensidade possam ser reconhecidas dentro de faixas de temperatura. Por exemplo, falhas de origem elétrica, do tipo descargas contínuas ou arco elétrico, podem levar a temperatura do óleo, no local onde ocorreu a descarga, a níveis próximos dos 1800 °C. O que implica na formação de acetileno ( $C_2H_2$ ) [28].

Existem outras relações de temperatura e formação de gás que podem ser citadas. Por exemplo, para temperaturas entre 150 °C e 400 °C os gases mais significativos são os de baixo peso molecular como o hidrogênio ( $H_2$ ) e o metano ( $CH_4$ ), sendo que na maioria dos casos existem concentrações mais elevadas de metano. Todavia, se houver uma pequena variação de temperatura, a concentração de hidrogênio pode ser tornar superior a do metano. Portanto, a relação entre os dois gases será totalmente alterada.

Esta relação entre os dois gases é importante para determinar falhas térmicas de baixa intensidade [29]. Tais relações entre gases, em proporções definidas pelas variações de temperatura, são a base da metodologia de análise e diagnóstico da condição de isolamento para detecção de falhas em transformadores que utilizam o sistema óleo-papel. Portanto, os métodos de diagnóstico do óleo mais utilizados, em função da presença de gases são:

- IEEE 57.104 (1991) [26];
  - Método Doernenburg;
  - Método de Rogers;
- IEC 605 (1999) [30];
- Triângulo de Duval.

Os métodos para diagnóstico do óleo apresentam relações entre os gases e estas relações determinam uma condição do estado do isolamento. No padrão IEEE 57.104 (1991) [30] são apresentadas cinco relações baseadas nos cinco gases, onde:

- Relação 1:  $CH_4 / H_2$ ;
- Relação 2:  $C_2H_2 / C_2H_4$ ;
- Relação 3:  $C_2H_2 / CH_4$ ;

- Relação 4:  $C_2H_6 / C_2H_2$ ;
- Relação 5:  $C_2H_4 / C_2H_6$ ;

Tanto o método de Doernenburg quanto o método de Rogers utilizam relações entre os gases gerados, todavia, existe uma variação entre o número de relações abordadas em cada método.

O método da relação de Doernenburg é aplicado apenas nos casos em que há um aumento significativo na geração de cada gás, de forma que as relações 1, 2, 3 e 4 possam ser comparadas com os valores limites (Tabela 4.2), para que se possa indicar um possível diagnóstico de falha. Já o método da relação de Rogers utiliza apenas três relações entre gases (Relação 1, 2 e 5) para indicar um diagnóstico.

Estes dois métodos são os mais abordados na IEEE 57.104 (1991) [26] e, em alguns casos, tanto o método de Doernenburg quanto o de Rogers podem fornecer um resultado que esteja fora do padrão de diagnóstico. Neste caso, outros métodos analíticos que envolvam a concentração total de gases dissolvidos devem ser usados a fim de garantir um resultado satisfatório.

**Tabela 4.2 – Concentração de gases dissolvidos.**

Gás	Concentração (PPM)
Hidrogênio ( $H_2$ )	100
Metano ( $C_2H_4$ )	120
Monóxido de Carbono ( $CO$ )	350
Acetileno ( $C_2H_2$ )	35
Etileno ( $C_2H_4$ )	50
Etano ( $C_2H_6$ )	65

Com a publicação da IEC 605 (1999) [30] e do banco de dados IEC TC 10 foi possível realizar novas interpretações da análise do gás no óleo [31] e, com isso, possibilitar melhorias nos resultados dos diagnósticos, através de cinco diferentes tipos de falhas.

---

As principais relações de gases têm sido aplicadas para diagnósticos com novos limites de códigos e os gases adicionais indicados para especificar os casos de falhas. Outras definições mais precisas de concentrações normais ou de alarme são destacadas, pois estas falhas podem ser identificadas por inspeção visual do equipamento depois da falha ter ocorrido em operação.

Os exemplos discutidos na IEC 605 (1999) ou no IEC 60599 são para os casos em que ocorreram as seguintes condições:

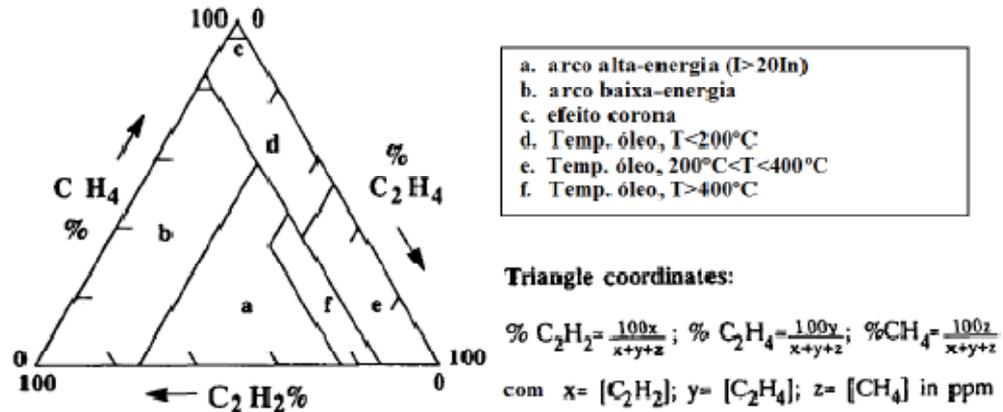
- Descargas parciais;
- Descargas de pouca energia;
- Descargas de grande energia;
- Falhas térmicas abaixo de 300 °C;
- Falhas térmicas abaixo de 700 °C.

Na IEC 60599 foram apresentados os cálculos dos valores típicos de concentrações de gases, os valores alarmantes (máximos aceitáveis) e taxas típicas de aumento de gás nos transformadores de potência. Além disso, foram introduzidas duas relações adicionais ( $C_2H_2/H_2$  e  $O_2/N_2$ ) para casos de diagnósticos específicos. A primeira relação é recomendada para detectar possíveis contaminações relacionadas à comutação em carga e a segunda relação para detectar aquecimento e oxidação anormal do óleo.

O triângulo de Duval foi proposto como uma representação para diagnósticos de falhas, para ser aplicado em casos de AGD que não podiam ser resolvidos por intermédio dos códigos IEEE e IEC [32].

De acordo com este método, altas taxas de degradação do papel ocorrem quando a concentração de etileno aumenta fortemente e a relação de  $CO_2/CO$  diminui abaixo de 06 (Figura 4.1).

Para uma situação em que a relação de  $CO_2/CO$  fica abaixo de 02, a probabilidade de falhas aumenta significativamente quando a concentração de gás combustível excede 200 ppm.



**Figura 4.1** – Triângulo de Duval.

Outra abordagem foi proposta para análise do AGD usando método do gás-chave, onde as proporções relativas dos seis gases combustíveis  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $H_2$  e  $CO$  são apresentadas na forma de gráfico de barras para ilustrar o comportamento do gás [33]. O aspecto inovador desta abordagem permite ser usado para investigar e ilustrar a clara diferença que existe entre os resultados “normais” e “anormais”.

#### 4.2.3 GRAU DE POLIMERIZAÇÃO

O papel isolante usado em transformadores é basicamente composto de celulose vegetal. Este material possui boas propriedades mecânicas devido à natureza fibrosa e polimérica. Estas características permitem a utilização da celulose como um bom isolante.

A quantidade de celulose existente no papel isolante é medida através do grau médio de polimerização, sendo que o grau de polimerização (GP) é representado pelo número de monômeros (hidrocarbonetos derivados do petróleo) no polímero.

O comprimento da cadeia celulósica, medido pela média do grau de polimerização, através do método da viscosidade, é chamado de GPv [34]. O valor associado a um GPv medido é utilizado como ferramenta de diagnóstico para determinar a condição da isolação de transformadores.

Dentre os materiais isolantes utilizados, o papel *Kraft* é o mais aplicado, tendo em média, uma cadeia com comprimento de 1000 a 1500. Porém, depois de um longo período de operação a altas temperaturas e com grande teor de água e oxigênio o papel se torna frágil, muda a sua cor para marrom escuro e o GPv diminui para 200 a 250. A resistência mecânica

---

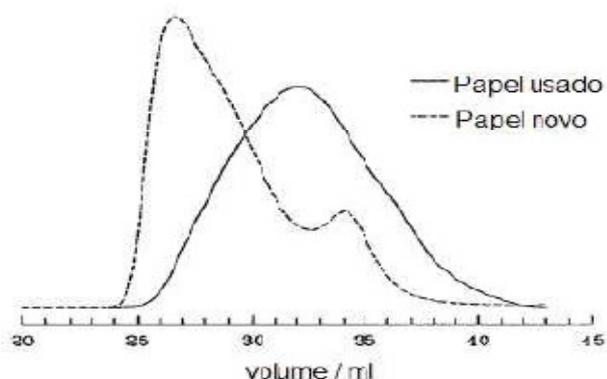
do papel *Kraft* com um GPv de 150 a 200 pode ser reduzida a 20 % do valor inicial e este ponto é observado como um critério do final de vida para a isolação do transformador [35].

Para casos em que o GPv medido estiver entre 500 e 900, a resistência do papel é praticamente constante, mas na faixa de 200 e 500 a resistência diminui em uma proporção direta à diminuição do GPv. A maioria dos trabalhos publicados adota como critério para o fim de vida do papel quando a resistência mecânica atinge 50 % do valor original, ou seja, com um grau de polimerização de 200 a 250. Nestes casos, é padrão se levantar uma curva de resistência térmica para prever o tempo de vida restante da isolação do papel e assim acompanhar frequentemente o processo de degradação do mesmo [36].

Os vários estudos realizados reportam diferentes pontos de níveis de GPv para representar o fim de vida do papel, sendo os valores mais utilizados entre 100 – 200, porém um termo comum abordado é que o envelhecimento do papel está relacionado com o aumento da temperatura. As investigações experimentais feitas para determinar o envelhecimento térmico do papel *Kraft* sugerem que o GPv começa a diminuir a 120 °C e progride mais rapidamente com o aumento da temperatura, sendo que para uma temperatura de 180 °C o GPv encontrado indicaria o fim da vida do isolante [37].

As técnicas atualmente mais promissoras estão relacionadas à obtenção do peso molecular através de Cromatografia de Permeação de Gel (CPG). Os resultados obtidos mostraram-se adequados quando empregados ao papel *Kraft*, particularmente em casos onde a distribuição do peso molecular muda, significativamente, quando a degradação aumenta.

O CPG é o modo mais conveniente de se obter uma distribuição de peso molecular detalhada para um polímero. Como o CPG fornece toda a distribuição do polímero, qualquer pequena mudança no peso molecular durante o processo de envelhecimento do material isolante é facilmente observada através do cromatograma. No processo de determinação da medida do peso molecular, a celulose nas amostras de papel passa por um processo de purificação e, então, é submetida, em temperatura ambiente, à análise da distribuição do peso molecular por cromatografia de permeação de gel. Na Figura (4.2) é apresentado um cromatograma CPG com as distribuições do peso molecular de um papel novo e um papel de um transformador com 25 anos de operação [38].



**Figura 4.2** – Cromatografia CPG.

De acordo com o cromatograma da Figura (4.2), quando o papel atinge 25 anos de operação, o pico do peso molecular é reduzido significativamente e o formato do gráfico também muda. Isto foi evidenciado em outros cromatogramas de papel isolante de transformadores envelhecidos, no qual o peso molecular da celulose diminui em função do tempo de operação. Medidas de CPG também foram realizadas para investigar o envelhecimento oxidativo e térmico em condições controladas de envelhecimento acelerado e foi notado como sendo muito sensível ao envelhecimento [39].

Em comparação com o uso do GPv, o CPG tem potencial para fornecer análises detalhadas das mudanças da distribuição do peso molecular durante o envelhecimento da celulose, podendo fornecer a base para modelos mais sofisticados de degradação, uma vez que mais situações complexas podem ser contempladas [40].

#### 4.2.4 ANÁLISE DE FURANO PELO LCAD

O *furano* pode ser definido como um composto orgânico heterocíclico e aromático formado a partir da destilação da celulose –  $C_4H_4O$ . É um dos produtos resultantes da degradação do papel isolante, sendo encontrado no óleo isolante de transformadores em operação. A análise de furano oferece um método mais conveniente de análise do que a medida direta no papel isolante.

A observação da formação de 2-furfuraldeído (2-FAL) durante a degradação da celulose de papéis isolantes é conhecida há algumas décadas. Este conhecimento resultou na descoberta de uma relação quase logarítmica entre o 2-FAL e o GPv do papel [41], o que possibilitou que várias análises fossem feitas baseadas nessa técnica.

A primeira aplicação da técnica de Cromatografia de Líquidos de Alto Desempenho (HPLC - High Performance Liquid Chromatography) para monitorar a formação de componentes de furano durante o envelhecimento do papel isolante foi aplicada a temperaturas de 20 °C, 80 °C e 110 °C e os resultados apresentaram uma relação entre a força tensora do papel com a concentração de 2-FAL [41]. Ou seja, pode-se observar que a diminuição da força tensora do papel estava relacionada a um aumento da concentração de furano no óleo.

A Equação (4.4) representa um modelo cinético da concentração de furano no óleo do transformador. Esta concentração cresce em forma de uma parábola decorrente da degradação da isolamento em função do tempo de operação do transformador.

$$Ft = A(Nc)t + \frac{Akt^2}{2} = bt + ct^2 \quad (4.4)$$

em que  $Nc$  é número de cadeias de celulose por Kg do papel em um tempo  $t$ ;  $A$  é a constante de proporcionalidade;  $k$  é a constante de taxa;  $b$  é igual a  $A*(Nc)$  e  $c$  igual a  $(9*A*k)/2$ .

Os componentes de furano que estão presentes no óleo em concentrações maiores são o 5-hidroximetil-2-furfuraldeído (HMF) e o 2-furfuraldeído (F), porém a presença de 2-furfuraldeído é maior que a dos outros furanos e a principal produção ocorre quando o GPv cai abaixo de 400. Quando o GPv se aproxima do ponto crítico de 200, o papel perde toda a resistência mecânica e torna-se susceptível a dano. Os níveis de furano são geralmente menores que 0.1 ppm e estes níveis podem ser mantidos por toda a vida útil do transformador. Entretanto, em muitas unidades antigas, os níveis variam entre 1.0 ppm até 10 ppm.

Este conjunto de técnicas abordadas para a avaliação da condição de isolamento de transformadores de potência permite conhecer com maior exatidão o número de variáveis a que está submetido o equipamento, sendo que o estudo dessas variáveis possibilita um resultado mais elaborado para compor uma solução de diagnóstico. A utilização de um ou vários desses métodos está relacionado com as necessidades imediatas de análise e custos que cada empresa pode assumir, assim pode-se optar por uma análise menos complexa, porém com um bom grau de eficiência para diagnósticos rápidos como é o AGD, onde o controle das variáveis (gases-chave) garante que não haja falhas de operação do equipamento.

---

### 4.3 TÉCNICAS INTELIGENTES APLICADAS AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Recentemente muitos trabalhos têm sido propostos para diagnóstico de falhas baseadas em técnicas da inteligência artificial, tais como sistemas especialistas, algoritmos genéticos, redes neurais, lógica fuzzy [54-77]. Em geral, esses trabalhos adicionam melhorias e/ou superam dificuldades encontradas nas técnicas convencionais, principalmente no método de análise de gases dissolvidos no óleo (DGA) do sistema de isolamento do transformador.

Os sistemas especialistas de uma maneira geral utilizam os critérios de diagnóstico tradicionais citados anteriormente para a formação de sua base de regras, além de incorporar algumas regras provenientes de experiência prévia na área. Podem conter ainda dados referentes aos modelos de cada equipamento e utilizar os dados característicos na análise final, sugerindo recomendações de intervenção ou re-amostragens [49] [62].

Redes neurais já vinham sendo usadas extensivamente em aplicações onde o reconhecimento de padrões é necessário. Elas são adaptativas, capazes de tratar com relações não lineares e também para generalizar soluções para um novo conjunto de dados. Seguindo estas características, o processo de detecção de falhas incipientes em transformadores usando RN pode ser reduzido à associação do processo de entradas (padrões de concentrações de gases) e saídas (tipo de falha) [55] [59].

O uso de sistemas de diagnóstico baseados em conjuntos fuzzy tem como vantagem reduzir a sensibilidade aos processos de amostragem e análise dos gases. Também podem incorporar informações históricas da evolução dos dados de geração de gases e utilizá-las em seus processos de diagnóstico. Normalmente, o ajuste das funções de pertinência ao conjunto fuzzy é dependente dos métodos tradicionais de análise e do conhecimento existente. Também teriam maior facilidade para trabalhar com as incertezas existentes, como por exemplo, a dos dados de medição, obtendo conclusões que métodos convencionais não alcançariam, principalmente no caso do método tradicional DGA [46] [47] [50] [57] [60] [63] [65] [67].

Todas estas técnicas são utilizadas de forma individual ou ainda na forma de sistemas híbridos, com a aplicação de sistemas neuro-fuzzy [51] [52] [53] [61] [66] ou sistemas especialistas combinados com lógica fuzzy. Outras técnicas também têm sido aplicadas ao diagnóstico de falhas, tais como clusterização [44], *rough sets* (conjunto robustos) [53], análise *cloud matter* [45], redes *wavelets* [58].

---

## 4.4 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Observa-se que no atual estado da arte em monitoramento e diagnóstico de falhas em transformadores de potência há uma forte tendência de pesquisa para aprimoramento das técnicas convencionais de diagnósticos de falhas incipientes. Porém, é necessário estender essas técnicas, fornecendo ferramentas que permitam fazer correlações entre as principais variáveis elétricas (temperatura, umidade e gases no óleo) dos equipamentos, além de analisar o comportamento de cada uma dessas variáveis ao longo do tempo.

Além disso, tais técnicas fornecem suporte, principalmente, para as equipes de manutenção. Com as mudanças legislativas no setor elétrico nacional, todas as intervenções no sistema de potência devem ser evitadas ou pelo menos minimizadas, para evitar indisponibilidades nos equipamentos sob pena de arcar com pesadas multas. Portanto, os processos de operação em tempo real também devem ter acesso a ferramentas que reduzam a complexidade de monitoramento das instalações, que permitam acompanhar a evolução operativa destes no tempo e que realizem previsões de tendências operativas, para que esses processos também participem ativamente da tarefa de evitar falhas incipientes nas instalações.

O próximo Capítulo apresenta uma proposta de metodologia de monitoramento de transformadores que atenda a esses requisitos e que forneça o suporte necessário para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento da condição operativa de transformadores.

# 5 METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE TENDÊNCIAS

A proposta de uma metodologia computacional para monitoramento qualitativo e análise de tendências operativas de transformadores de potência é descrita em detalhes neste Capítulo. A mesma é composta de duas tarefas principais: (i) a definição de blocos de inferência fuzzy que mapeiam variáveis elétricas de um transformador de potência em estados operacionais e (ii) a análise da tendência das saídas desses blocos fuzzy ao longo de um determinado período de avaliação.

A seção 5.1 descreve como realizar um monitoramento de forma qualitativa; a seção 5.2 descreve como realizar análise de tendências e a seção 5.3 apresenta considerações finais sobre o Capítulo.

## 5.1 MONITORAMENTO QUALITATIVO

Nas subestações de grandes empresas de energia, uma *rede de supervisão* tem a função de adquirir os valores (medidos em campo por sistemas digitais de aquisição de dados e sinais) de variáveis analógicas e digitais de equipamentos elétricos e transmitir esses dados para os Centros de Operação Regional (COR) através de uma complexa rede de computadores e telecomunicações.

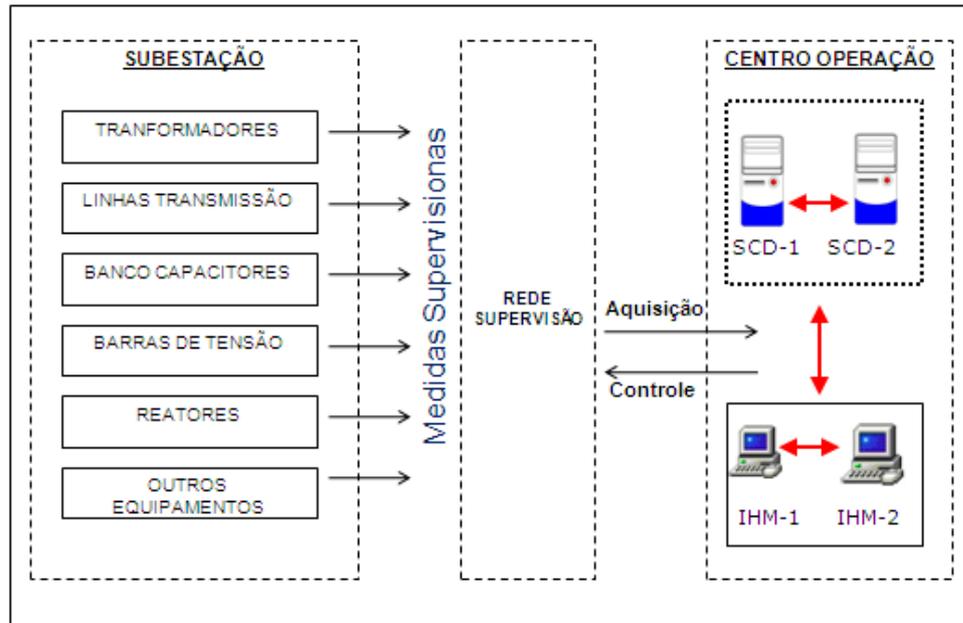
O COR monitora esses equipamentos por sistemas gráficos de supervisão, tipicamente denominados de sistemas *SCADA*. Esses sistemas recebem os dados enviados pela rede de supervisão e os exibem como informações legíveis aos *operadores* em monitores de alta definição e resolução. O *operador* é o profissional responsável por supervisionar a operação das instalações (subestações) sob sua responsabilidade, monitorando as condições operativas de todos os equipamentos, além de intervir na operação em situações diversas, tais como na execução de rotinas estabelecidas pelo ONS, restabelecimento do sistema em caso de falhas e previsão de panes em geral.

Em subestações de grande porte, é comum ter dezenas de equipamentos sendo supervisionados pelo COR e cada um desses equipamentos pode ter dezenas de variáveis sendo monitoradas. No caso de transformadores, é comum monitorar mais de 30 variáveis elétricas e digitais. A Tabela 5.1 apresenta algumas medidas que são comumente supervisionadas nos dias atuais. O tempo mínimo de atualização desses valores ou *varredura da supervisão* varia em cada empresa. Valores típicos são 02 segundos, 10 segundos, 01 minuto e 02 minutos.

Tal cenário torna muito difícil a tarefa de observar e controlar o sistema elétrico em tempo real, principalmente quando é necessário realizar tomadas de decisão para tratar ocorrências no sistema e/ou evitar panes em equipamentos importantes. A Figura 5.1 apresenta um esboço de como é executada a supervisão de equipamentos em subestações.

**Tabela 5.1** – Medidas comumente monitoradas em transformadores.

NOME DA MEDIDA	TIPO
Corrente Elétrica	Analógica
Tensão entre Fases	Analógica
Potência Ativa e Reativa	Analógica
Temperatura do Óleo	Analógica
Temperatura dos Enrolamentos	Analógica
Temperatura Ambiente	Analógica
Fator de Potência	Analógica
Freqüência	Analógica
Comutação de TAP	Digital



**Figura 5.1** – Modelo da supervisão dos equipamentos nas subestações.

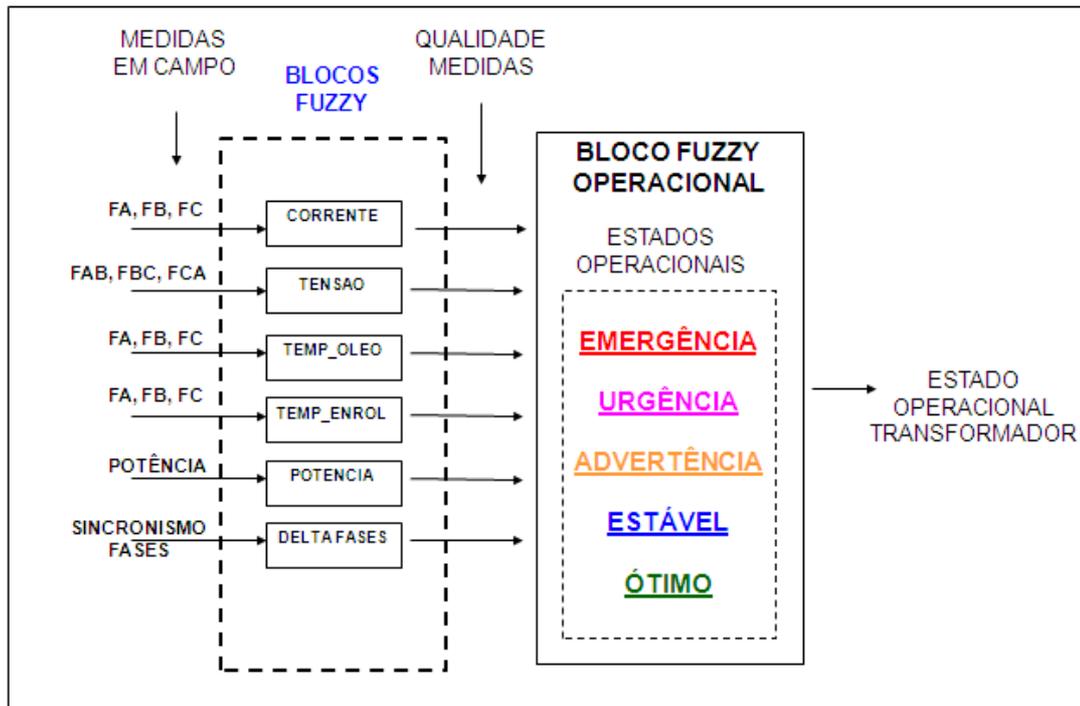
Uma solução para aumentar a eficiência do monitoramento de transformadores de potência é adicionar um componente que intercepte os valores das principais variáveis supervisionadas (ou as de interesse) e interprete esses dados de forma a enviar para os centros de operação o conhecimento do *estado operacional* do equipamento em qualquer instante  $t$  de tempo em vez de enviar apenas os dados brutos.

O *estado operacional* pode ser definido como uma nota que representa *qualidade* do funcionamento do equipamento, levando em conta as características do equipamento, as características do sistema em que o mesmo está inserido e ainda os interesses operacionais especificados pelos especialistas do COR. Esta será a interpretação assumida para o termo “qualidade” no decorrer deste trabalho. Tal procedimento ajudaria os operadores dos centros de operação a terem uma melhor noção da saúde operativa de seus equipamentos, bem como prever com antecedência situações de perigo para o sistema e/ou equipamento. Dessa forma, o monitoramento poderia ter um viés *qualitativo* e não apenas *quantitativo*.

A lista a seguir apresenta os passos para a implementação de um sistema de monitoramento *qualitativo*:

- Definem-se as variáveis elétricas que serão monitoradas pelo modelo fuzzy;
- Definem-se blocos de inferência fuzzy para cada uma das variáveis de tal forma que notas de qualidade serão atribuídas para essas variáveis de acordo com os valores medidos em campo;
  - Definem-se valores referência para fins comparação com os valores adquiridos ;
  - Baseado na experiência dos operadores, define-se as regras dos blocos fuzzy;
  - Definem-se os parâmetros fuzzy, a saber: variáveis de entrada e saída, conjuntos fuzzy para cada variável de entrada e saída, forma e parâmetros das funções de pertinência de cada conjunto fuzzy, operadores fuzzy e a base de regras ou *base de conhecimento* do bloco;
- Define-se estados operacionais pelos quais o transformador pode trafegar durante seu funcionamento;
- Define-se um bloco fuzzy operacional responsável por mapear as notas de qualidade extraídas pelos blocos fuzzy das medidas das variáveis em campo, nas regiões operacionais definidas pelos especialistas.

A Figura 5.2 apresenta o modelo genérico de monitoramento utilizando sistemas fuzzy de inferência. Cada retângulo na figura representa um bloco fuzzy de inferência. Nesse modelo as medidas consideradas como de fundamental importância são: *corrente, tensão entre fases, temperatura do óleo, temperatura dos enrolamentos, potência ativa e o sincronismo entre as fases*. A corrente elétrica e as temperaturas do óleo e enrolamentos são supervisionadas nas fases A, B e C, a tensão elétrica é monitorada entre as fases AB, BC e CA e a variável *delta fases* mede o grau de sincronização entre as fases das medidas trifásicas.



**Figura 5.2** – Modelo para monitoramento qualitativo de transformadores de potência.

O bloco principal desse modelo é o *bloco fuzzy operacional*. É este bloco que irá indicar automaticamente para o COR qual é o status operativo do equipamento em um instante  $t$  qualquer. Foram definidos cinco estados operativos, a saber, por ordem decrescente de criticidade: *emergência*, *urgência*, *advertência*, *estável* e *ótimo*.

A seguir, apresenta-se um resumo do significado de cada estado operativo:

- EMERGÊNCIA
  - É o pior estado operativo. Nesse estado o equipamento pode parar de funcionar a qualquer momento. Seja porque o sistema de proteção digital foi acionado, seja porque houve uma falha crítica. Situações que podem levar a esse estado: sobrecargas, correntes muito altas (curto-circuito), temperaturas elevadas, dessincronização acentuada entre as fases, entre outros;
  - Quando o bloco fuzzy operacional acusa que o equipamento está funcionando nessa região, o operador pode alertar a equipe de operação/manutenção lotada na subestação onde o equipamento está fixado sobre a situação eminente de falha.

- URGÊNCIA
  - É um estado operativo ruim, pois nesse estado o equipamento funciona além de suas capacidades. A operação contínua nesse estado pode levar o equipamento para o estado de *emergência* operativa.
- ADVERTÊNCIA
  - É o estado operativo intermediário entre os estados de *estável* e *urgência*. Nesse estado o equipamento não se encontra em situação crítica, porém seu funcionamento fica muito aquém do melhor desempenho operativo.
- ESTÁVEL
  - É o estado operativo em que o equipamento apresenta boas medidas de qualidade, porém não apresenta um funcionamento que atenda os interesses operacionais de seus operadores, tal como maximizar o uso do transformador em relação à sua capacidade nominal.
- ÓTIMO
  - É o melhor estado possível para o equipamento. Nesse estado o equipamento apresenta suas medidas com a mais alta qualidade possível e operando na forma mais proveitosa para operação.

A seguir, são descritos os blocos de inferência fuzzy que fazem parte da metodologia proposta. Todos os blocos são do tipo Mamdani, tipo escolhido devido a sua adaptabilidade para a modelagem de um sistema de monitoramento qualitativo e facilidade de implementação em um cenário prático. Para cada bloco será descrito seu objetivo principal, definição dos conjuntos fuzzy de entradas e saídas e as regras da base de conhecimento do bloco. Todos os parâmetros dos blocos fuzzy medidas são definidos baseados nas características típicas de um transformador de 600 MVA de 230/500kV, equipamento tipicamente utilizado nas empresas transmissoras de energia.

### 5.1.1 BLOCO FUZZY CORRENTE

- *Objetivo*

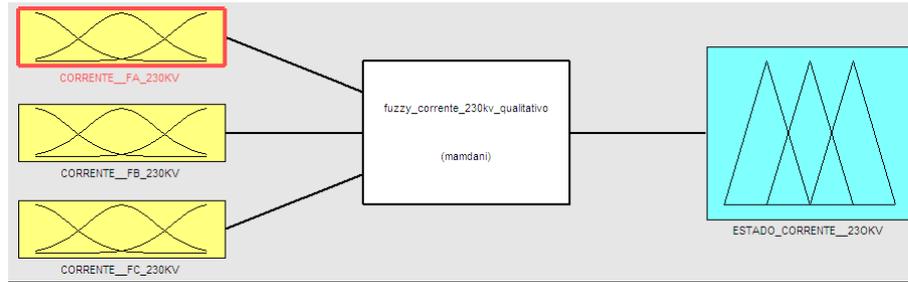
O bloco fuzzy corrente é responsável por monitorar a qualidade da corrente elétrica no transformador de potência em determinado lado da transformação (69, 138, 230 e/ou 500 kV) e em qualquer período de análise em questão (em tempo real, horário, diário, semanal, mensal ou anual). Essa medida ou *nota* de qualidade atribuída para a corrente é baseada na comparação dos valores obtidos da supervisão do sistema elétrico com o valor da corrente nominal definido pelo fabricante do equipamento.

- *Definição das Entradas e Saídas*

Este bloco possui três entradas e uma saída. As entradas são os valores das correntes das fases A, B e C do lado de transformação em análise. A saída foi definida como *estado corrente*. Os métodos utilizados para as operações fuzzy de disjunção (E/AND), conjunção (OU/OR), implicação, agregação e desfuzzificação são, respectivamente, as operações min, max, min, max e o método do menor dos máximos (*lom*). Este último método utiliza o menor valor de pertinência dentre os valores máximos de pertinência do conjunto fuzzy a ser desfuzzificado. A Tabela 5.2 apresenta o domínio das variáveis fuzzy de entrada (em relação ao monitoramento qualitativo do lado 230 kV em um transformador 600MVA) e a Figura 5.3 exibe um esboço geral do bloco.

**Tabela 5.2** — Entradas do bloco fuzzy corrente no lado 230 kV.

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
CORRENTE_FA_230	ENTRADA	[0 2000]
CORRENTE_FB_230	ENTRADA	[0 2000]
CORRENTE_FC_230	ENTRADA	[0 2000]
ESTADO_CORRENTE_230	SAIDA	[0 1]



**Figura 5.3** – Esboço geral do bloco fuzzy corrente.

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy são definidos de acordo com os valores nominais especificados pelo fabricante para a corrente máxima em cada lado de transformação do equipamento. A Tabela 5.3 exibe alguns valores nominais e variações percentuais.

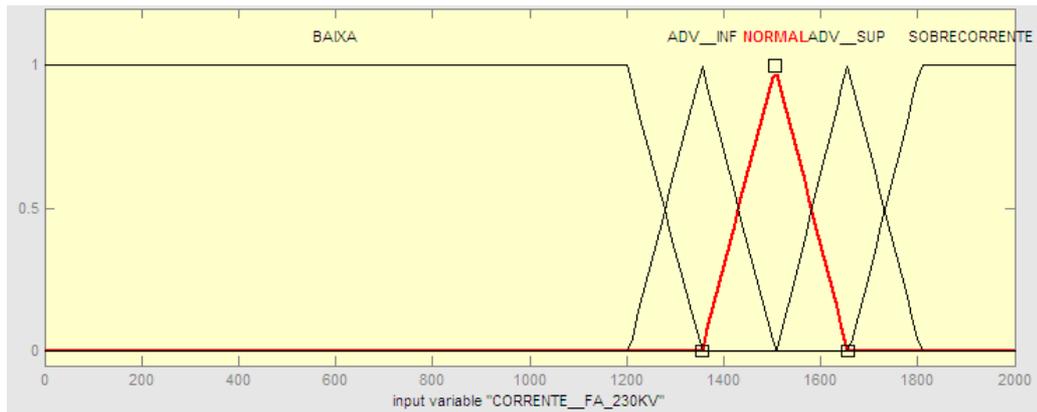
**Tabela 5.3** – Nominais da corrente nos lados de 230 kV e 500 kV e variações percentuais.

VARIÁVEL	UNIDADE	TENSÃO (kV)	LIMITES OPERACIONAIS				
			-20%	-10%	NOMINAL	+10%	+20%
CORRENTE	A	230	1204,8	1355,4	1506	1656,6	1807,2
CORRENTE	A	500	553,6	622,8	692	761,2	830,4

Na Tabela 5.4 são descritos os nomes dos conjuntos fuzzy das entradas, os parâmetros e as formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal ( $N$ ) utilizado para definir cada conjunto ( $C$ ). A Figura 5.4 apresenta o esboço geral desses conjuntos fuzzy das entradas desse bloco.

**Tabela 5.4** – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy corrente no lado 230 kV.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	(%) em relação ao Nominal
BAIXA	TRAPEZOIDAL	[0 0 1204 1355]	$C < -20\%*N$
ADVERTENCIA INFERIOR	TRIANGULAR	[1204 1355 1506]	$-20\%*N < C < N$
NORMAL	TRIANGULAR	[1355 1506 1656]	$-10\%*N < C < +10\%*N$
ADVERTENCIA SUPERIOR	TRIANGULAR	[1506 1655 1807]	$N < C < +20\%*N$
SOBRECORRENTE	TRAPEZOIDAL	[1656 1807 2000 2000]	$C > +20\%*N$



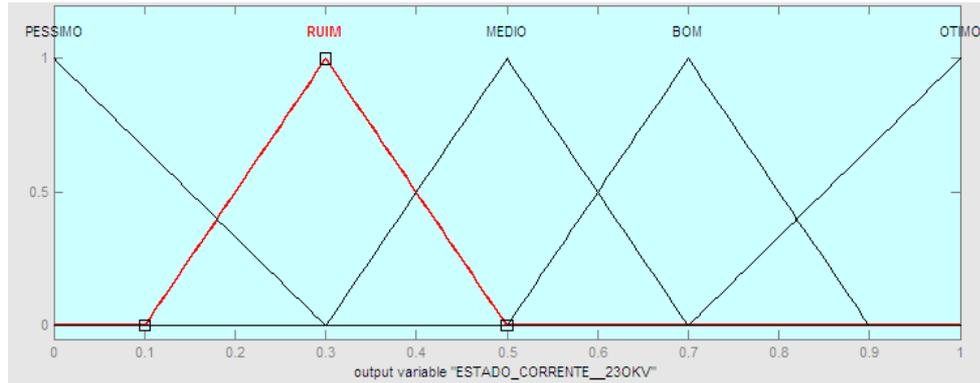
**Figura 5.4** – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy corrente.

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

A saída do bloco é um número entre 0.0 e 1.0 que deve ser interpretado como uma nota que irá refletir a qualidade da corrente no lado de transformação em questão. Quanto menor a saída do bloco (mais próximo de 0.0), pior é a qualidade das correntes como um todo; quanto mais próximo de 1.0, melhor é o *estado corrente*. A Tabela 5.5 exibe os nomes dos conjuntos fuzzy da saída, a forma e parâmetros de suas funções de pertinência. A Figura 5.5 exibe um esboço do arranjo da saída fuzzy.

**Tabela 5.5** – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy corrente.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	PARÂMETROS
PÉSSIMO	TRIANGULAR	[0 0 0.3]
RUIM	TRIANGULAR	[0.1 0.3 0.5]
MÉDIO	TRIANGULAR	[0.3 0.5 0.7]
BOM	TRIANGULAR	[0.5 0.7 0.9]
ÓTIMO	TRIANGULAR	[0.75 1 1]



**Figura 5.5** – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy corrente.

Como os blocos fuzzy corrente, potência, temperatura do óleo, temperatura dos enrolamentos apresentam a mesma estrutura do bloco de saída apresentado nesta seção, com fins de economia de espaço na escrita, tal estrutura não será apresentada nas suas respectivas seções (*definição dos conjuntos de saída*).

#### 5.1.1.1 Definição das Regras de Inferência

A seguir, as regras para o bloco fuzzy da corrente são descritas em pseudocódigo:

- 1) Se *corrente\_fa* está em **sobrecorrente** ou *corrente\_fb* está em **sobrecorrente** ou *corrente\_fc* está em **sobrecorrente** então *estado\_corrente* está **PÉSSIMO** (1.0);
- 2) Se *corrente\_fa* está em **advertencia\_superior** ou *corrente\_fb* está em **advertencia\_superior** ou *corrente\_fc* está em **advertencia\_superior** então *estado\_corrente* está **RUIM** (0.8).
- 3) Se *corrente\_fa* está em **normal** ou *corrente\_fb* está em **normal** ou *corrente\_fc* está em **normal** então *estado\_corrente* está **MÉDIO** (0.6);
- 4) Se *corrente\_fa* está em **advertencia\_inferior** ou *corrente\_fb* está em **advertencia\_inferior** ou *corrente\_fc* está em **advertencia\_inferior** então *estado\_corrente* está **BOM** (0.4).
- 5) Se *corrente\_fa* está em **baixa** ou *corrente\_fb* está em **baixa** ou *corrente\_fc* está em **baixa** então *estado\_corrente* está **ÓTIMO** (0.2);

As regras acima foram definidas de tal forma que quando os valores de corrente tendem ao limite nominal e/ou além deste (rumo à sobrecorrente), a qualidade da corrente tende a cair (tende a 0.0); quanto menor é o valor da corrente maior é a sua nota de qualidade (tende a 1.0). Os valores entre parênteses são pesos que indicam a relevância de cada regra. Uma vez que as três entradas têm a mesma natureza (Ampères) e mesmo domínio, as mesmas podem ser mapeadas em conjuntos fuzzy de saída diferentes. Dessa forma, os pesos indicam qual regra deve ter maior impacto durante o processo de desfuzzificação. Por exemplo, a regra 1 possui peso 1.0, enquanto que a regra 5 possui peso 0.2, indicando que essa base de regras tende a evidenciar as piores situações operativas.

O conjunto de regras da base de conhecimento do bloco fuzzy corrente foi definido por meio de entrevistas realizadas com especialistas do setor elétrico, refletindo a experiência desses profissionais em diagnósticos operativos de equipamentos. Essa observação é redundante para todos os outros blocos fuzzy descritos posteriormente.

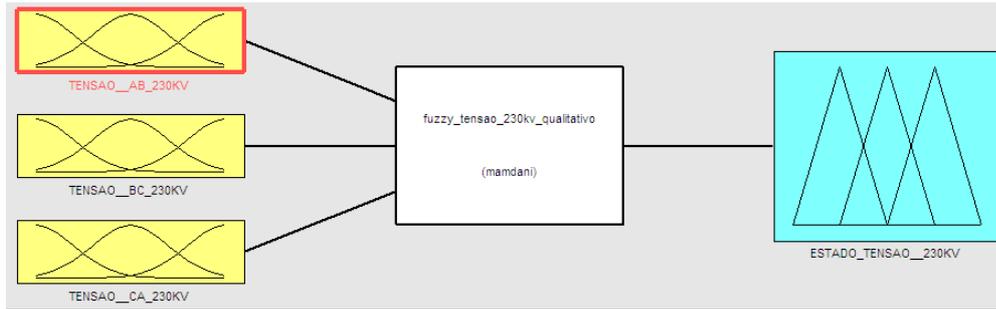
### 5.1.2 BLOCO FUZZY TENSÃO

- *Objetivo*

É responsável por monitorar a qualidade da tensão entre as fases do transformador de potência. Essa medida ou *nota* de qualidade é baseada na comparação dos valores das tensões entre fases *AB*, *BC* e *CA* com a tensão nominal no lado de transformação.

- *Definição das Entradas e Saídas*

Este bloco possui três entradas e uma saída. As entradas são os valores das tensões entre as fases *AB*, *BC* e *CA* do lado de transformação em questão. A saída foi definida como *estado tensão* e reflete a qualidade geral da tensão entre fases. Os métodos utilizados para as operações fuzzy são os mesmos definidos para o bloco fuzzy corrente. Na Figura 5.6 é apresentado o esboço geral do bloco e a Tabela 5.6 apresenta o domínio das variáveis fuzzy.



**Figura 5.6** – Esboço geral do bloco fuzzy tensão.

**Tabela 5.6** – Entradas do bloco fuzzy tensão no lado 230 kV.

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
TENSAO_FAB_230	ENTRADA	[0 400]
TENSAO_FBC_230	ENTRADA	[0 400]
TENSAO_FCA_230	ENTRADA	[0 400]
ESTADO_TENSAO	SAIDA	[0 1]

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy são definidos de acordo com os valores nominais determinados pela tensão de transformação no lado em questão. No lado de 230 kV, por exemplo, o valor nominal é 230; no lado de 500 kV, o nominal será 500. A Tabela 5.7 exhibe os valores desses nominais e algumas variações percentuais em relação a esses valores.

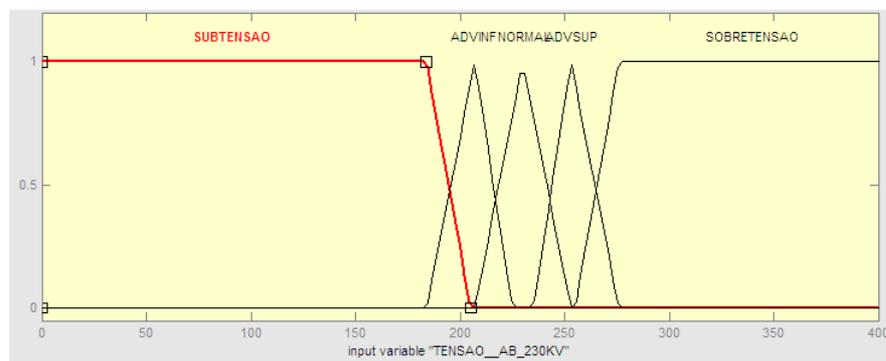
**Tabela 5.7** – Valores nominais da tensão e variações percentuais.

VARIÁVEL	UNIDADE	TENSAO (kV)	LIMITES FUZZY				
			-20%	-10%	NOMINAL	+10%	+20%
TENSAO	V	230	184	207	230	253	276
TENSAO	V	500	400	450	500	550	600

Na Tabela 5.8 são descritos os nomes dos conjuntos fuzzy das entradas, os parâmetros e as formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal ( $N$ ) utilizado para definir cada conjunto ( $C$ ). A Figura 5.7 apresenta o esboço geral dos conjuntos fuzzy das entradas desse bloco.

**Tabela 5.8** – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy tensão no lado 230 kV.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	(%) em relação ao Nominal
SUBTENSÃO	TRAPEZOIDAL	[0 0 160 196]	$C < -20\%*N$
ADVERTENCIA INFERIOR	TRIANGULAR	[184 207 230]	$-20\%*N < C < N$
NORMAL	TRIANGULAR	[207 230 253]	$-10\%*N < C < +10\%*N$
ADVERTENCIA SUPERIOR	TRIANGULAR	[230 253 276]	$N < C < +20\%*N$
SOBRETENSÃO	TRAPEZOIDAL	[265 300 400 400]	$C > +20\%*N$

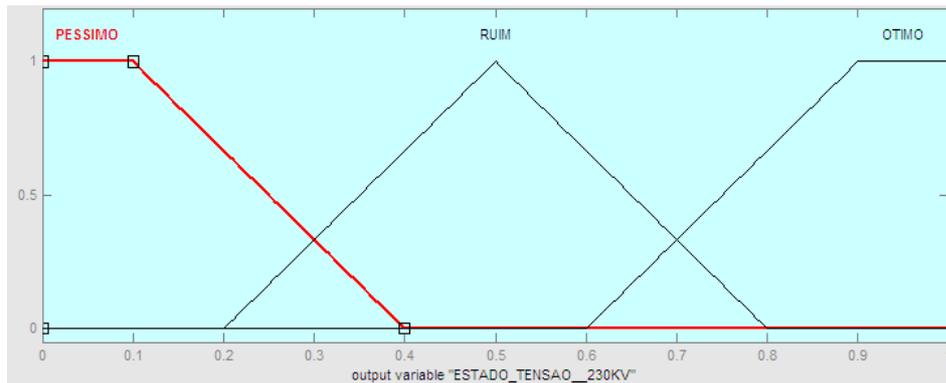
**Figura 5.7** – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy tensão.

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

A Tabela 5.9 exibe os nomes dos conjuntos fuzzy da saída, a forma e parâmetros de suas funções de pertinência. A Figura 5.8 exibe um esboço do arranjo da saída fuzzy.

**Tabela 5.9** – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy tensão.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS
PESSIMO	TRAPEZOIDAL	[0 0 0.4]
RUIM	TRIANGULAR	[0.2 0.5 0.8]
OTIMO	TRAPEZOIDAL	[0.6 0.9 1]



**Figura 5.8** – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy tensão.

#### 5.1.2.1 Definição das Regras de Inferência

Na lista abaixo, as regras para o bloco fuzzy tensão são descritas.

- 1) Se *tensão\_fab* está em **subtensão** ou *tensão\_fbc* está em **subtensão** ou *tensão\_fca* está em **subtensão** então *estado\_tensão* está PÉSSIMO (1.0);
- 2) Se *tensão\_fab* está em **sobretensão** ou *tensão\_fbc* está em **sobretensão** ou *tensão\_fca* está em **sobretensão** então *estado\_tensão* está PÉSSIMO (1.0);
- 3) Se *tensão\_fab* está em **advertência\_inferior** ou *tensão\_fbc* está em **advertência\_inferior** ou *tensão\_fca* está em **advertencia\_inferior** então *estado\_tensão* está RUIM (0.5);
- 4) Se *tensão\_fab* está em **advertencia\_superior** ou *tensão\_fbc* está em **advertencia\_superior** ou *tensão\_fca* está em **advertencia\_superior** então *estado\_tensão* está RUIM (0.5);
- 5) Se *tensão\_fab* está **normal** ou *tensão\_fbc* está **normal** ou *tensão\_fca* está **normal** então *estado\_tensão* está ÓTIMO (0.2).

A tensão é uma medida que não pode ser retirada do seu nominal, sob pena de prejuízo do funcionamento de outros equipamentos; subtensões e sobretensões diminuem drasticamente a qualidade da medida (conjunto *péssimo*) e levam o transformador a trabalhar na região operativa de *emergência*. A tensão alcança seu ótimo somente quando seu valor estiver exatamente no nominal.

### 5.1.3 BLOCO FUZZY POTÊNCIA

- *Objetivo*

O objetivo principal é obter uma nota ou medida de qualidade para o valor da potência do transformador medido em campo. O que irá refletir o grau de carregamento do equipamento no período de análise em questão.

- *Definição das Entradas e Saídas e Parâmetros Fuzzy Gerais*

O bloco possui uma entrada e uma saída. A entrada representa a potência medida em campo e a saída o *estado potência*. Os métodos utilizados para as operações fuzzy são os mesmos definidos para o bloco fuzzy corrente. A Figura 5.9 apresenta as características e o esboço geral desse bloco e a Tabela 5.10 apresenta o domínio das variáveis fuzzy.



**Figura 5.9** — Esboço geral do bloco fuzzy potência.

**Tabela 5.10** — Entradas do bloco fuzzy potência

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
POTÊNCIA	ENTRADA	[0 800]
ESTADO_POTÊNCIA	SAIDA	[0 1]

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy são definidos de acordo com o valor da potência máxima do transformador definido pelo fabricante do transformador. A Tabela 5.11 exibe os valores de alguns nominais e variações percentuais em relação a esses valores.

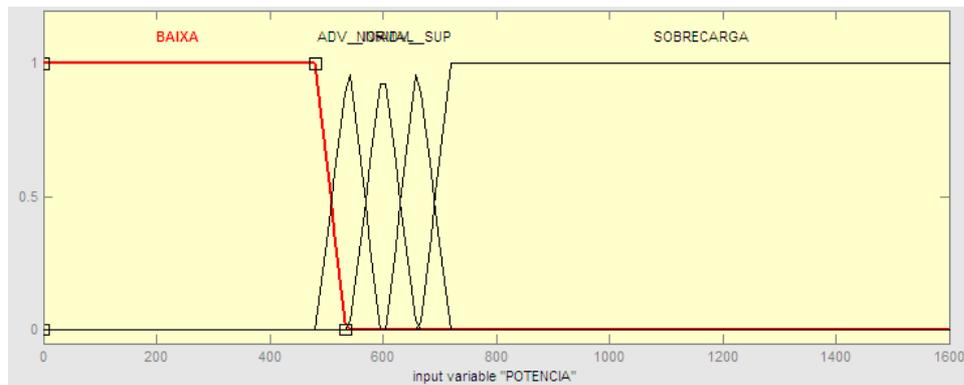
**Tabela 5.11** – Potência nominal de transformadores de 200 e 600 MVA.

VARIÁVEL	UNIDADE	LIMITES FUZZY				
		-20%	-10%	NOMINAL (MVA)	10%	20%
POTÊNCIA	MVA	160	180	200	220	240
POTÊNCIA	MVA	480	540	600	660	720

Na Tabela 5.12 são descritos os nomes dos conjuntos fuzzy das entradas, os parâmetros e as formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal ( $N$ ) utilizado para definir cada conjunto ( $C$ ). A Figura 5.10 apresenta o esboço geral dos conjuntos fuzzy das entradas desse bloco.

**Tabela 5.12** – Conjuntos fuzzy da entrada do bloco fuzzy potência.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	(%) em relação ao nominal
BAIXA	TRAPEZOIDAL	[0 0 480 540]	$C < -20\%*N$
ADVERTENCIA INFERIOR	TRIANGULAR	[480 540 600]	$-20\%*N < C < N$
NORMAL	TRIANGULAR	[540 600 660]	$-10\%*N < C < +10\%*N$
ADVERTENCIA SUPERIOR	TRIANGULAR	[600 660 720]	$N < C < +20\%*N$
SOBRECARGA	TRAPEZOIDAL	[660 720 800 800]	$C > +20\%*N$

**Figura 5.10** – Conjuntos fuzzy da entrada do bloco fuzzy potência.

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

Mesma configuração do bloco fuzzy corrente.

- *Definição das Regras de Inferência*

Na lista abaixo, as regras para o bloco fuzzy potência são descritas.

- 1) Se *potência* está em **sobrecarga** então *estado\_potência* é PÉSSIMO (1.0);
- 2) Se *potência* está em **advertencia\_superior** então *estado\_potência* é RUIM (1.0);
- 3) Se *potência* está **normal**, então *estado\_potência* é MÉDIO (1.0);
- 4) Se *potência* está em **advertencia\_inferior** então *estado\_potência* é BOM (1.0);
- 5) Se *potência* está **baixa** então *estado\_potência* é ÓTIMO (1.0).

Ao observar as regras acima, percebe-se que as regras seguem a mesma semântica operativa das regras definidas para o bloco fuzzy corrente, onde valores acima do nominal recebem notas cada vez mais baixas, enquanto que valores baixos recebem notas altas. Porém, tal base de regras pode não ser a mais adequada no caso da potência, do ponto de vista operacional, uma vez que a maior parte dos transformadores em funcionamento atualmente já está no final de sua vida útil e por isso, é desejável utilizar o máximo possível de sua capacidade. A seguir, será apresentada uma base de regras (opcional) capaz de traduzir esse anseio dos especialistas:

- 1) Se *potência* está em **sobrecarga** então *estado\_potência* é PÉSSIMO;
- 2) Se *potência* está **baixa** então *estado\_potência* é RUIM;
- 3) Se *potência* está em **advertencia\_superior** então *estado\_potência* é MÉDIO;
- 4) Se *potência* está **normal** então *estado\_potência* é BOM;
- 5) Se *potência* está em **advertencia\_inferior** então *estado\_potência* é ÓTIMO.

As regras da base de regras acima foi definida para atribuir melhores notas (regras 1, 2 e 3) para cargas de potência mais próximas do nominal do transformador (com fins de recompensar a utilização máxima da capacidade de transformação) e piores notas (regras 4 e 5) para cargas nos extremos de sobrecarga (com fins de evitar explosão e/ou desligamento do equipamento pela proteção) e de carga baixa (para evitar a sub-utilização do mesmo durante a operação).

#### 5.1.4 BLOCO FUZZY TEMPERATURA DO ÓLEO

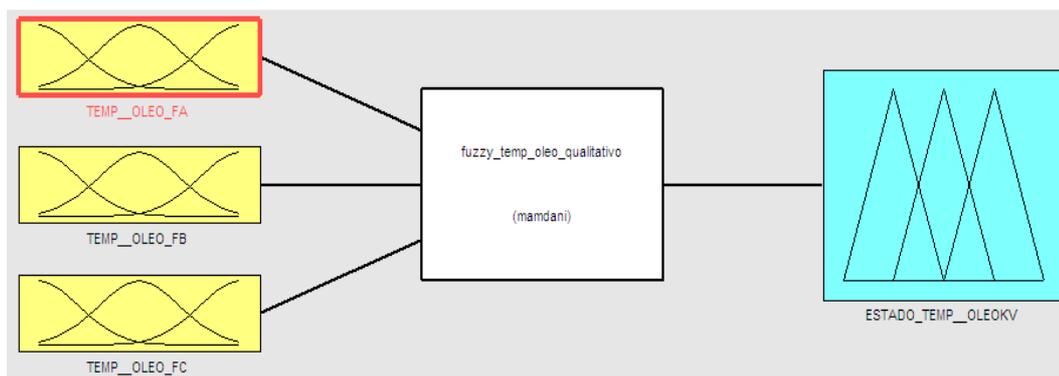
- *Objetivo*

O objetivo principal é obter uma nota de qualidade para a medida de acordo com os valores medidos em campo da temperatura do óleo nas fases *A*, *B* e *C* no lado de transformação. Essa medida irá refletir o grau de aquecimento no tanque de óleo do equipamento onde os enrolamentos das fases *A*, *B* e *C* estão imersos, o que influencia consideravelmente o sistema de isolamento.

- *Definição das Entradas e Saídas e Parâmetros Fuzzy Gerais*

O bloco possui três entradas que são as temperaturas do óleo nos enrolamentos nas fases *A*, *B* e *C* e uma saída, que reflete o estado da temperatura do óleo, denominado de *estado temp\_oleo*. Os métodos utilizados para as operações fuzzy são os mesmos definidos para o bloco fuzzy corrente.

A Figura 5.11 apresenta as características e esboço geral desse bloco e a Tabela 5.13 apresenta o domínio das variáveis.



**Figura 5.11** — Esboço geral do bloco fuzzy *temp óleo*.

**Tabela 5.13** – Entradas do bloco fuzzy temperatura óleo no lado 230 kV.

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
TEMP_OLEO_FA_230	ENTRADA	[0 200]
TEMP_OLEO_FB_230	ENTRADA	[0 200]
TEMP_OLEO_FC_230	ENTRADA	[0 200]
ESTADO_TENSAO	SAIDA	[0 1]

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy são definidos de acordo com o valor nominal de temperatura do óleo definido pelo fabricante do equipamento. A Tabela 5.14 exibe um exemplo de valor nominal para temperatura e variações percentuais em relação a esse valor.

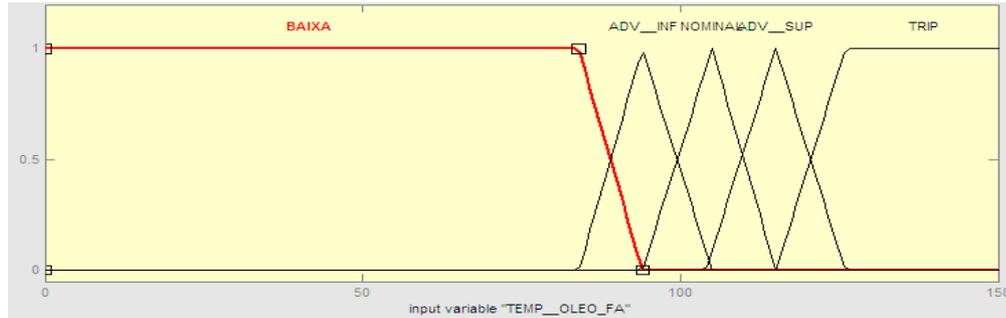
**Tabela 5.14** – Valores nominais de temperatura de óleo.

VARIÁVEL	UNIDADE	LIMITES FUZZY				
		-20%	-10%	NOMINAL (°C)	+10%	+20%
TEMP_OLEO	Graus Celsius (°C)	84	94,5	105	115,5	126

Na Tabela 5.15 são descritos os nomes dos conjuntos fuzzy das entradas, os parâmetros e as formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal ( $N$ ) utilizado para definir cada conjunto ( $C$ ). A Figura 5.12 apresenta o esboço geral dos conjuntos fuzzy de entrada desse bloco.

**Tabela 5.15** – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy temperatura óleo.

NOME CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	(%) em relação ao nominal
BAIXA	TRAPEZOIDAL	[0 0 84 94]	$C < -20\%$
ADVERTENCIA INFERIOR	TRIANGULAR	[84 94 105]	$-10\%*N < C < N$
NOMINAL	TRIANGULAR	[94 105 115]	$-10\%*N < C < +10\%*N$
ADVERTENCIA SUPERIOR	TRIANGULAR	[104 115 126]	$N < C < +20\%*N$
TRIP	TRAPEZOIDAL	[115 126 150 150]	$C > +20\%*N$



**Figura 5.12** — Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy *temp óleo*.

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

Mesma configuração do bloco fuzzy corrente.

- *Definição das Regras de Inferência*

Na lista abaixo, as regras para o bloco fuzzy temperatura do óleo são descritas.

- 1) Se *temp\_oleo\_fa* está **trip** ou *temp\_oleo\_fb* está **trip** ou *temp\_oleo\_fc* está **trip**, então *estado temp\_oleo* está **PÉSSIMO** (1.0);
- 2) Se *temp\_oleo\_fa* está em **advertência\_superior** ou *temp\_oleo\_fb* está em **advertência\_superior** ou *temp\_oleo\_fc* está em **advertência\_superior**, então *estado temp\_oleo* está **RUIM** (0.8);
- 3) Se *temp\_oleo\_fa* está **nominal** ou *temp\_oleo\_fb* está **nominal** ou *temp\_oleo\_fc* está **nominal**, então *estado temp\_oleo* está **MÉDIO** (0.6);
- 4) Se *temp\_oleo\_fa* está em **advertência\_inferior** ou *temp\_oleo\_fb* está em **advertência\_inferior** ou *temp\_oleo\_fc* está em **advertência\_inferior**, então *estado temp\_oleo* está **BOM** (0.4);
- 5) Se *temp\_oleo\_fa* está **baixa** ou *temp\_oleo\_fb* está **baixa** ou *temp\_oleo\_fc* está **baixa**, então *estado temp\_oleo* está **ÓTIMO** (0.2);

O estado de *trip* reflete a situação em que sistemas digitais de proteção atuam no equipamento para protegê-lo de danos graves e evitar a propagação desses danos para outros equipamentos na instalação. No caso da temperatura do óleo, a temperatura de *trip* é de 115 °C. Após essa temperatura, o equipamento será desligado, devido à atuação da proteção. Notar que a temperatura nominal do equipamento é de 105 °C.

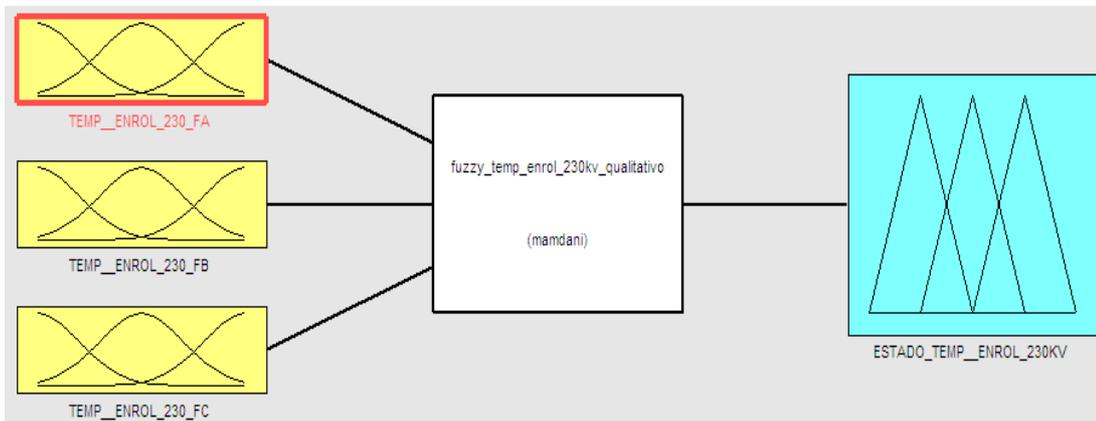
### 5.1.5 BLOCO FUZZY TEMPERATURA ENROLAMENTOS

- *Objetivo*

O objetivo principal é obter uma nota de qualidade de acordo com os valores medidos em campo da temperatura dos enrolamentos nas fases A, B e C no lado de transformação em questão. Essa medida que irá refletir o grau de aquecimento dos enrolamentos do equipamento.

- *Definição das Entradas e Saídas e Parâmetros Fuzzy Gerais*

O bloco possui três entradas que são as temperaturas dos enrolamentos nas fases A, B e C (em um determinado lado da transformação) e uma saída, que reflete o estado da temperatura dos enrolamentos como um todo, denominado de *estado temp\_enrol*. Os métodos utilizados para as operações fuzzy são os mesmos utilizados no bloco fuzzy corrente. A Figura 5.13 apresenta as características e esboço geral desse bloco e a Tabela 5.16 apresenta o domínio das variáveis fuzzy.



**Figura 5.13** — Esboço geral do bloco fuzzy temperatura dos enrolamentos.

**Tabela 5.16** – Entradas do bloco fuzzy temperatura óleo – lado 500 kV.

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
TEMP_ENROL_FA_500	ENTRADA	[0 200]
TEMP_ENROL_FB_500	ENTRADA	[0 200]
TEMP_ENROL_FC_500	ENTRADA	[0 200]
ESTADO_TENSAO	SAIDA	[0 1]

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy são definidos de acordo com o valor nominal de temperatura do enrolamento definido pelo fabricante do equipamento. A Tabela 5.17 exibe um exemplo de valor nominal para temperatura e variações percentuais em relação a esse valor.

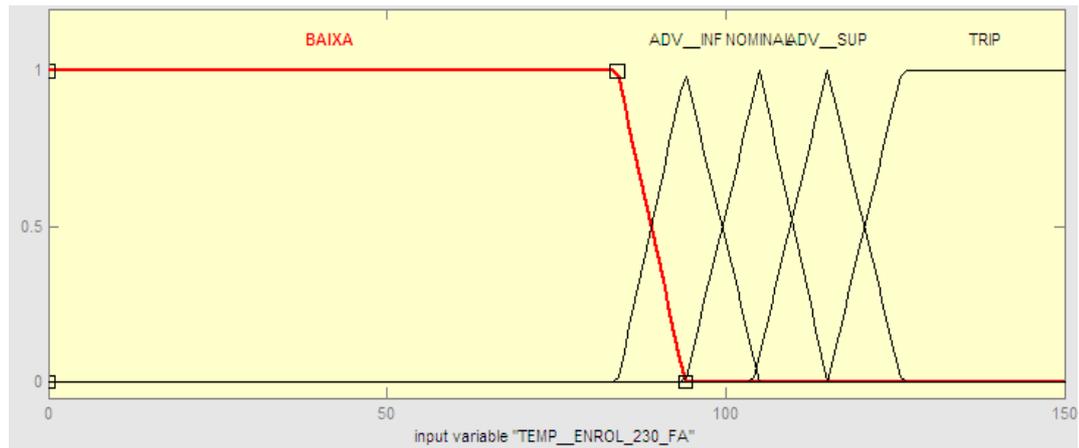
**Tabela 5.17** – Valores nominais de temperatura de enrolamentos.

VARIÁVEL	UNIDADE	LIMITES FUZZY				
		-20%	-10%	NOMINAL (°C)	+10%	+20%
TEMP_ENROL	Graus Celsius (°C)	84	94,5	105	115,5	126

Na Tabela 5.18 são descritos os nomes dos conjuntos fuzzy das entradas, os parâmetros e as formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal ( $N$ ) utilizado para definir cada conjunto ( $C$ ). A Figura 5.14 apresenta o esboço geral dos conjuntos fuzzy de entrada desse bloco.

**Tabela 5.18** – Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy *temp. enrol.*

NOME CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	(%) em relação ao nominal
BAIXA	TRAPEZOIDAL	[0 0 84 94]	$C < -20\%$
ADVERTENCIA INFERIOR	TRIANGULAR	[84 94 105]	$-10\% < C < N$
NOMINAL	TRIANGULAR	[94 105 115]	$-10\% < C < +10\%$
ADVERTENCIA SUPERIOR	TRIANGULAR	[104 115 126]	$N < C < +20\%$
TRIP	TRAPEZOIDAL	[115 126 150 150]	$C > 20\%$



**Figura 5.14** – Conjuntos fuzzy de entrada do bloco fuzzy *temp. enrol.*

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

Mesma configuração do bloco fuzzy corrente.

- *Definição das Regras de Inferência*

Na lista abaixo, as regras para o bloco fuzzy *temp enrol* são descritas.

- 1) Se *temp\_enrol\_fa* está em **trip** ou *temp\_enrol\_fb* está em **trip** ou *temp\_enrol\_fc* está em **trip** então *estado temp enrol* está **PÉSSIMO** (1.0);
- 2) Se *temp\_enrol\_fa* está em **advertência superior** ou *temp\_enrol\_fb* está em **advertência superior** ou *temp\_enrol\_fc* está em **advertência superior** então *estado temp enrol* está **RUIM** (0.8);
- 3) Se *temp\_enrol\_fa* está em **nominal** ou *temp\_enrol\_fb* está em **nominal** ou *temp\_enrol\_fc* está **nominal** então *estado temp enrol* está **MÉDIO** (0.6);
- 4) Se *temp\_enrol\_fa* está em **advertência inferior** ou *temp\_enrol\_fb* está em **advertência inferior** ou *temp\_enrol\_fc* está em **advertência inferior** então *estado temp enrol* está **BOM** (0.4);
- 5) Se *temp\_enrol\_fa* está **baixa** ou *temp\_enrol\_fb* está **baixa** ou *temp\_enrol\_fc* está **baixa** então *estado temp enrol* está **ÓTIMO** (0.2);

A explicação para essa base de regras é a mesma descrita no bloco fuzzy *temp. óleo*.

### 5.1.6 BLOCO FUZZY DELTA FASES

- *Objetivo*

O bloco fuzzy sincronização das medidas trifásicas ou *delta fases* tem como objetivo principal obter uma medida de qualidade que revele o grau de sincronização ou *balanço* entre as fases *A*, *B* e *C* nas medidas trifásicas monitoradas pelos bloco fuzzy medidas, a saber, a corrente, tensão, temperaturas do óleo e dos enrolamentos no período de análise em questão.

Em um sistema de potência equilibrado e ideal, as fases devem ser sempre sincronizadas em valores absolutos, mas em termos práticos, tal requisito é muito difícil de ser atendido, haja vista que o sistema é muito complexo e sujeito a inúmeras intempéries. Mesmo assim, a dessincronização ou *desbalanço* das fases não pode alcançar níveis muito altos, sob pena de acionar as proteções digitais programadas para desligar o equipamento caso tal fenômeno aconteça de maneira contínua e/ou extrema.

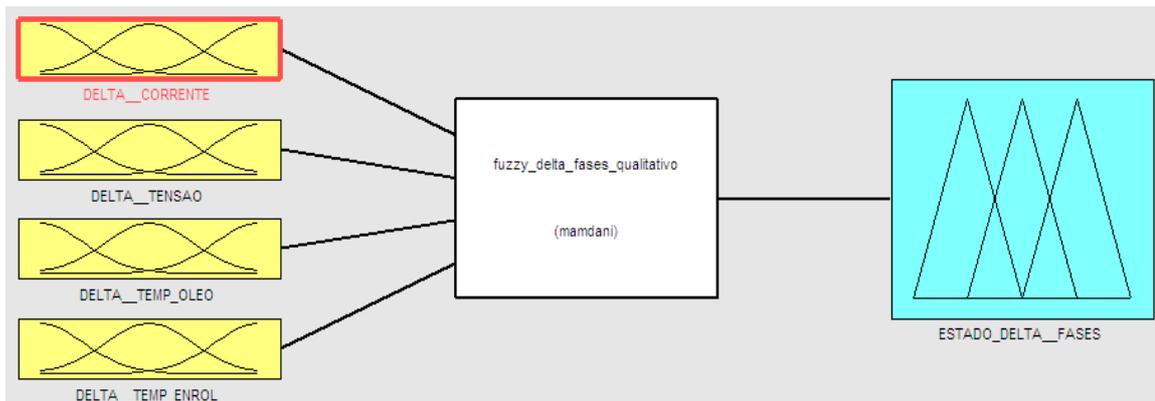
- *Definição das Entradas e Saídas e Parâmetros Fuzzy Gerais*

O bloco possui quatro entradas e uma saída. As entradas, que representam o desvio padrão calculado a partir dos valores nas três fases *A*, *B* e *C* nas medidas da corrente, tensão entre fases, temperatura do óleo e temperatura dos enrolamentos, são denominadas respectivamente de, *delta corrente*, *delta tensão*, *delta temp\_oleo*, *delta temp\_enrol*. A saída, que reflete o estado geral de sincronização das fases, é denominada de *estado delta\_fases*.

Os métodos utilizados para as operações fuzzy são os mesmos do bloco fuzzy corrente. A Figura 5.15 apresenta um esboço geral do bloco e a Tabela 5.19 apresenta o domínio dessas variáveis.

**Tabela 5.19** — Entradas do bloco fuzzy *delta fases* no lado 230 kV.

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
DELTA_CORRENTE_230	ENTRADA	[0 400]
DELTA_TENSAO_230	ENTRADA	[0 400]
DELTA_TEMP_OLEO_230	ENTRADA	[0 400]
DELTA_TEMP_ENROL_230	ENTRADA	[0 400]
ESTADO_TENSAO	SAIDA	[0 1]



**Figura 5.15** — Esboço geral do bloco fuzzy *delta fases*.

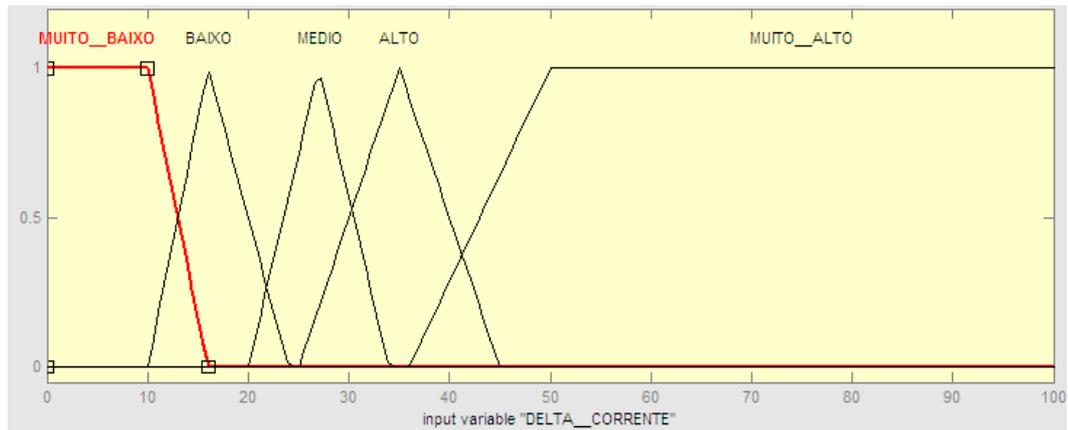
- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy deste bloco, diferentemente dos blocos anteriores, não são definidos de acordo com algum valor nominal ou referência. Na Tabela 5.20 são descritos os nomes dos conjuntos fuzzy, os parâmetros e as formas das funções de pertinência. A Figura 5.16 apresenta o esboço geral dos conjuntos fuzzy de entrada do bloco.

**Tabela 5.20** — Conjuntos de entrada do bloco fuzzy *delta fases*.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS
MUITO BAIXO	TRAPEZOIDAL	[0 0 10 16]
BAIXO	TRIANGULAR	[10 16 24]
MEDIO	TRIANGULAR	[20 27 34]
ALTO	TRIANGULAR	[25 35 45]
MUITO ALTO	TRAPEZOIDAL	[36 50 100 100]

Os valores dos parâmetros dos conjuntos fuzzy de entrada foram definidos de acordo com a experiência dos especialistas do que é considerado como *alta* e *baixa* dessincronização entre fases, além da realização de testes empíricos para definir os outros conjuntos intermediários e nas extremidades do domínio.



**Figura 5.16** — Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy *delta fases*.

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

Mesma configuração do bloco fuzzy corrente.

- *Definição das Regras de Inferência*

A seguir são descritas as regras definidas para o bloco delta fases.

- 1) Se *delta\_corrente* está **muito\_alto** ou *delta\_tensao* está **muito\_alto** ou *delta\_temp\_oleo* está **muito\_alto** ou *delta\_temp\_enrol* está **muito\_alto** então *estado\_delta\_fases* está PÉSSIMO (1.0);
- 2) Se *delta\_corrente* está **alto** ou *delta\_tensao* está **alto** ou *delta\_temp\_oleo* está **alto** ou *delta\_temp\_enrol* está **alto** então *estado\_delta\_fases* está RUIM (0.8);
- 3) Se *delta\_corrente* está **médio** ou *delta\_tensao* está **médio** ou *delta\_temp\_oleo* está **médio** ou *delta\_temp\_enrol* está **médio** então *estado\_delta\_fases* está MÉDIO (0.6);
- 4) Se *delta\_corrente* está **baixo** ou *delta\_tensao* está **baixo** ou *delta\_temp\_oleo* está **baixo** ou *delta\_temp\_enrol* está **baixo** então *estado\_delta\_fases* está BOM (0.4);
- 5) Se *delta\_corrente* está **muito\_baixo** ou *delta\_tensao* está **muito\_baixo** ou *delta\_temp\_oleo* está **muito\_baixo** ou *delta\_temp\_enrol* está **muito\_baixo** então *estado\_delta\_fases* está ÓTIMO (0.2);

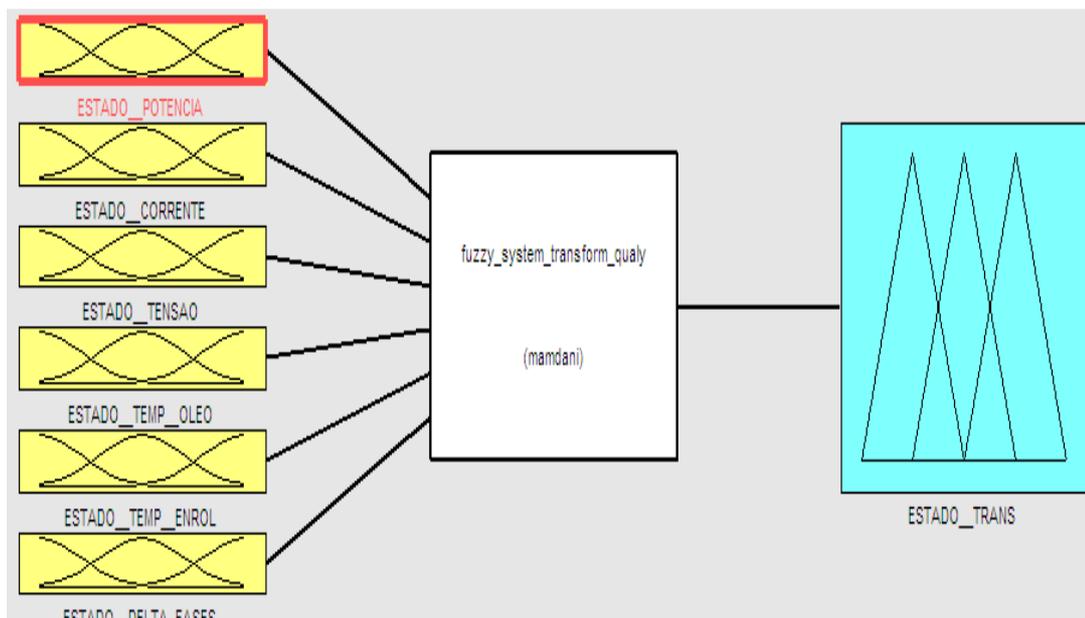
### 5.1.7 BLOCO FUZZY OPERACIONAL

- *Objetivo*

Analisar as notas de qualidade das medidas monitoradas e mapear estas entradas em uma única saída que reflete o *estado operacional* do transformador.

- *Definição das Entradas e Saídas e Parâmetros Fuzzy Gerais*

O bloco possui seis entradas e uma saída. As entradas são as notas de qualidade das medidas monitoradas, a saber, o *estado corrente*, *estado tensão*, *estado potência*, *estado temp\_enrol*, *estado temp\_oleo*, *estado delta\_fases*. A saída, que reflete o estado operacional do transformador, é denominada de *estado transformador*. Os métodos utilizados para as operações fuzzy de disjunção (E/AND), conjunção (OU/OR), implicação, agregação e desfuzzificação, são respectivamente as operações min, max, min, max e lom (método do menor dos máximos). A Figura 5.17 apresenta um esboço geral desse bloco e a Tabela 5.21 apresenta o domínio das variáveis fuzzy.



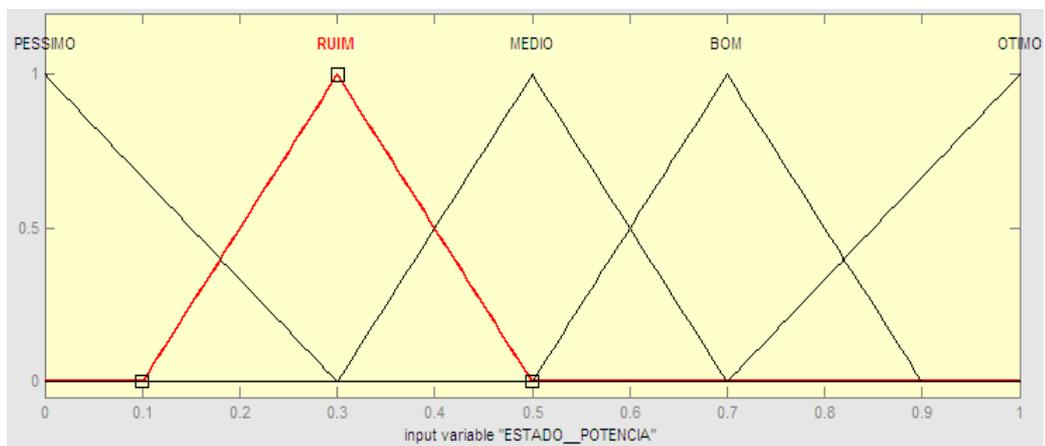
**Figura 5.17** — Esboço geral do bloco fuzzy operacional.

**Tabela 5.21** — Entradas do bloco fuzzy operacional.

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
ESTADO_CORRENTE	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TENSAO	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_POTÊNCIA	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TEMP_ENROL	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TEMP_OLEO	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_DELTA_FASES	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TRANSFORMADOR	SAIDA	[0.0 100]

- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Entrada*

Os conjuntos fuzzy de todas as entradas do bloco fuzzy operacional são definidos da mesma forma que as saídas de cada bloco fuzzy das medidas de corrente, tensão, potência, temperaturas de óleo/enrolamento e delta fases. A Figura 5.18 apresenta um esboço geral dos conjuntos de entrada.

**Figura 5.18** — Conjuntos fuzzy das entradas do bloco fuzzy operacional.

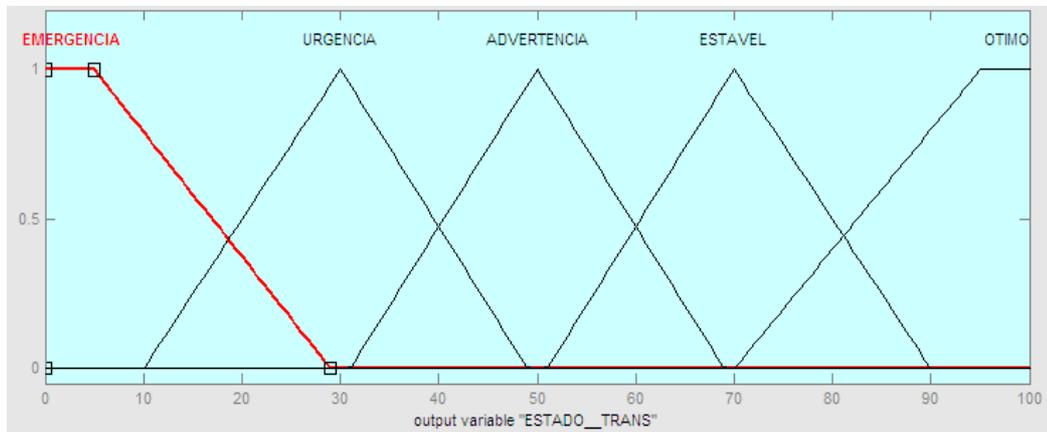
- *Definição dos Conjuntos Fuzzy de Saída*

A saída do bloco é um número entre 0.0 e 100 que deve ser interpretado como uma nota que irá refletir o estado operacional no lado de transformação em questão. Quanto menor a saída do bloco (mais próximo de zero), pior é o estado operativo do equipamento; quanto mais próximo de 100, melhor é o *estado transformador*.

A Tabela 5.22 exibe os nomes dos conjuntos fuzzy da saída, a forma e parâmetros de suas funções de pertinência. A Figura 5.19 exibe um esboço do arranjo da saída fuzzy.

**Tabela 5.22** – Conjuntos fuzzy de saída do bloco fuzzy operacional.

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS
EMERGENCIA	TRAPEZOIDAL	[0 0 5 29]
URGENCIA	TRIANGULAR	[10 30 49]
ADVERTENCIA	TRIANGULAR	[31 50 69]
ESTAVEL	TRIANGULAR	[51 70 90]
OTIMO	TRAPEZOIDAL	[70 95 100 100]



**Figura 5.19** – Conjuntos fuzzy da saída do bloco fuzzy operacional.

- *Definição das Regras de Inferência*

A seguir são descritas as regras definidas para o bloco fuzzy operacional.

- 1) Se *estado\_corrente* está **péssimo** ou *estado\_tensao* está **péssimo** ou *estado\_potência* está **péssimo** ou *estado\_temp\_oleo* está **péssimo** ou *estado\_temp\_enrol* está **péssimo** ou *estado\_delta\_fases* está **péssimo** então *estado\_transformador* está em EMERGÊNCIA (1.0);
- 2) Se *estado\_corrente* está **ruim** ou *estado\_tensao* está **ruim** ou *estado\_potência* está **ruim** ou *estado\_temp\_oleo* está **ruim** ou *estado\_temp\_enrol* está **ruim** ou *estado\_delta\_fases* está **ruim** então *estado\_transformador* está em URGÊNCIA (0.9);

- 3) Se *estado\_corrente* está **médio** ou *estado\_potência* está **médio** ou *estado\_temp\_oleo* está **médio** ou *estado\_temp\_enrol* está **médio** ou *estado\_delta\_fases* está **médio** então *estado\_transformador* está em ADVERTÊNCIA (0.5);
- 4) Se *estado\_corrente* está **bom** ou *estado\_potência* está **bom** ou *estado\_temp\_oleo* está **bom** ou *estado\_temp\_enrol* está **bom** ou *estado\_delta\_fases* está **bom** então *estado\_transformador* está ESTÁVEL (0.2);
- 5) Se *estado\_corrente* está **ótimo** ou *estado\_tensao* está **ótimo** ou *estado\_potência* está **ótimo** ou *estado\_temp\_oleo* está **ótimo** ou *estado\_temp\_enrol* está **ótimo** ou *estado\_delta\_fases* está **ótimo** então *estado\_transformador* está ÓTIMO (0.1);

## 5.2 ANÁLISE DE TENDÊNCIAS

Nesta seção é apresentada uma metodologia para analisar as saídas de todos os blocos fuzzy e automaticamente retornar um indicativo da *tendência* principal para o período avaliado. Discutiremos inicialmente a problemática e importância de se analisar a tendência na seção 5.2.1, seguido da caracterização da metodologia proposta na seção 5.2.2.

### 5.2.1 O MONITORAMENTO E ANÁLISE DE TENDÊNCIAS

O bloco fuzzy operacional descrito na seção anterior tem como função principal mapear os valores das medidas (modeladas) de transformadores em notas qualitativas dentro de regiões ou estados operacionais definidos por especialistas. Porém, é necessário prover aos responsáveis pelo planejamento da operação e manutenção, subsídios objetivos para tomadas de decisão no médio e longo prazo que estejam relacionadas com a operação de transformadores de potência. Algumas dessas questões são apresentadas na lista abaixo:

- Durante os últimos anos de operação em determinada subestação, pode-se notar um *aumento crescente* na carga consumida?

- Esse aumento pode ser classificado como *pouco* ou *muito crescente*?
- O equipamento irá suportar a carga, caso esse aumento *continue* no mesmo ritmo?
- Por quais *condições operacionais* o transformador *tem trafegado* durante os últimos anos?
- Existem evidências de *operação contínua* rumo a *estados operacionais críticos*?

Essas e outras questões são levantadas por especialistas do setor responsáveis pelo planejamento da expansão das subestações bem como pelos processos de pós-operação que orientam, através de relatórios de ocorrências de situações críticas, as tomadas de decisão em nível gerencial da operação da instalação. Portanto, é importante oferecer uma ferramenta para analisar os dados históricos já obtidos e definir uma tendência principal sobre a condição de operação. A proposta é poder realizar a análise de tendência de modo automático para que o operador tenha um indicativo desse comportamento ao longo do tempo e, com isso, diminuir a dependência de um especialista no local e/ou métodos muito complexos para realizar análise nos resultados dos blocos fuzzy.

A seguir, a seção 5.2.2 apresenta uma proposta para uma *avaliação qualitativa* da tendência de comportamento das saídas dos blocos fuzzy apresentados na seção anterior.

## 5.2.2 AVALIAÇÃO DA TENDÊNCIA

Em termos matemáticos, a saída do bloco fuzzy operacional pode ser caracterizado como uma *série temporal*, considerando a precisão da supervisão do equipamento constante (varredura a cada 10 segundos, a cada minuto, etc.). Uma série temporal denomina-se como uma sequência de dados distribuídos equiespaçadamente ou em intervalos regulares no tempo. Pode-se expressar uma série temporal por [48]:

$$Z_t = \{Z_t \in R \mid t = 1, 2, 3, \dots, N\}$$

onde  $t$  é um índice temporal e  $N$  é o número de observações.

As saídas de todos os blocos fuzzy para monitoramento das medidas do transformador podem ser tratadas como séries temporais. Logo, o cálculo da tendência pode ser inferido para todas essas saídas fuzzy bem como nas curvas das próprias medidas supervisionadas. A

seguir, é descrito como é o método de cálculo da tendência dessas curvas bem como os critérios de classificação das mesmas.

- *Regressão linear*

Os valores da série podem ser utilizados para estabelecer-se uma regressão linear com a variável tempo. O método escolhido é o da *regressão por mínimos quadrados*, que encontra a equação da reta  $y = mx + b$  que melhor representa o conjunto de pontos da série. As Equações 5.1 e 5.2 definem como são calculados os valores de  $m$  e  $b$  da reta  $y = mx + b$  da regressão linear [69].

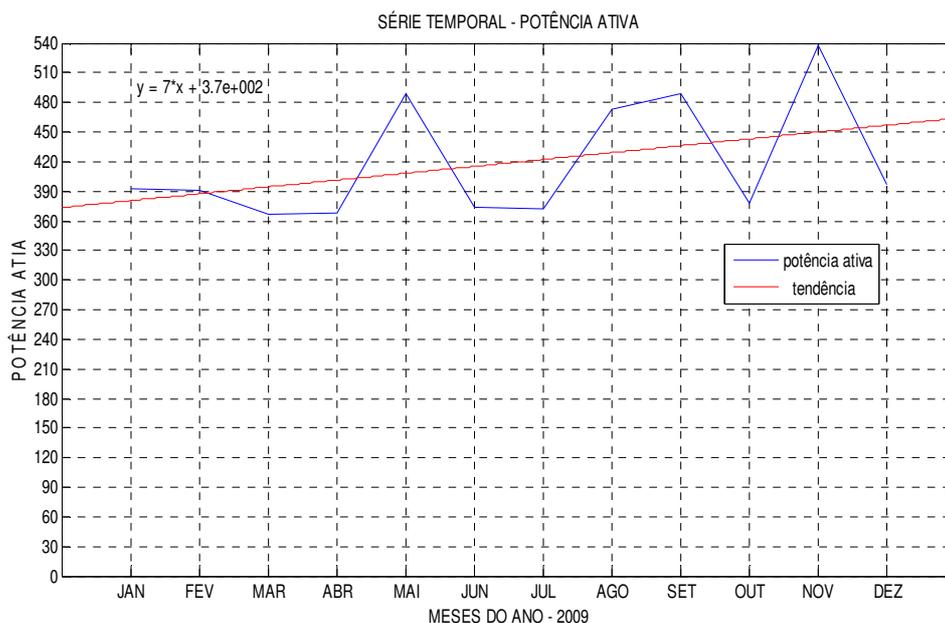
$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i^2} \quad (5.1)$$

$$b = y_m - mx_m \quad (5.2)$$

onde  $n$  é o número de pontos da série,  $y$  o vetor de dados e  $x$  o vetor os valores do eixo das abscissas;  $y_m$  e  $x_m$  são os valores médios dos vetores  $y$  e  $x$ , respectivamente.

A regressão linear pelo método de mínimos quadrados foi escolhida pela sua facilidade de implementação e por servir perfeitamente para determinar se uma série qualquer possui mais picos positivos e/ou negativos relativos à média da mesma. Além de ser útil para comparar os fenômenos iniciais com os presentes no período final da mesma.

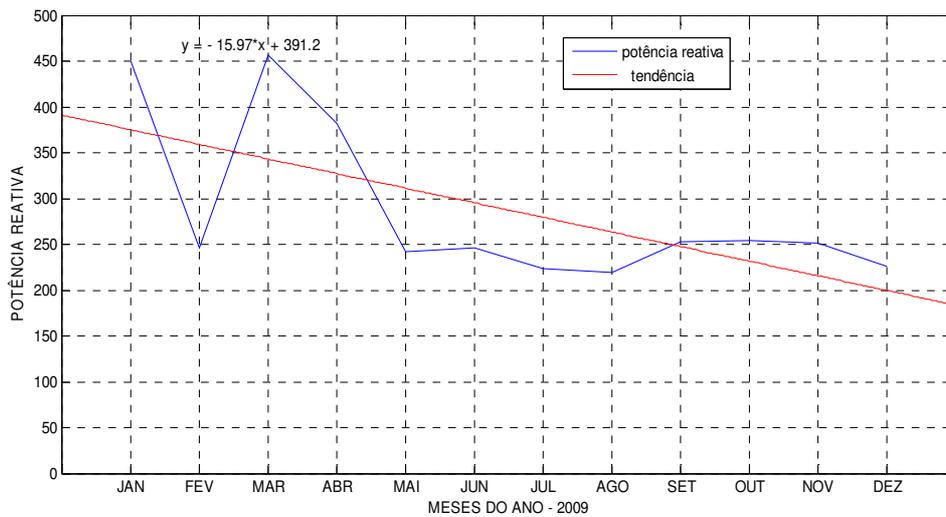
Para exemplificar a questão, obteve-se uma série de 12 valores que representam os valores máximos de potência em 2009 medidos em um determinado transformador. A Figura 5.20 apresenta o gráfico da série mais a tendência linear de comportamento estabelecida com a regressão linear utilizado os valores da série.



**Figura 5.20** — Potência ativa anual 2009 e tendência de comportamento.

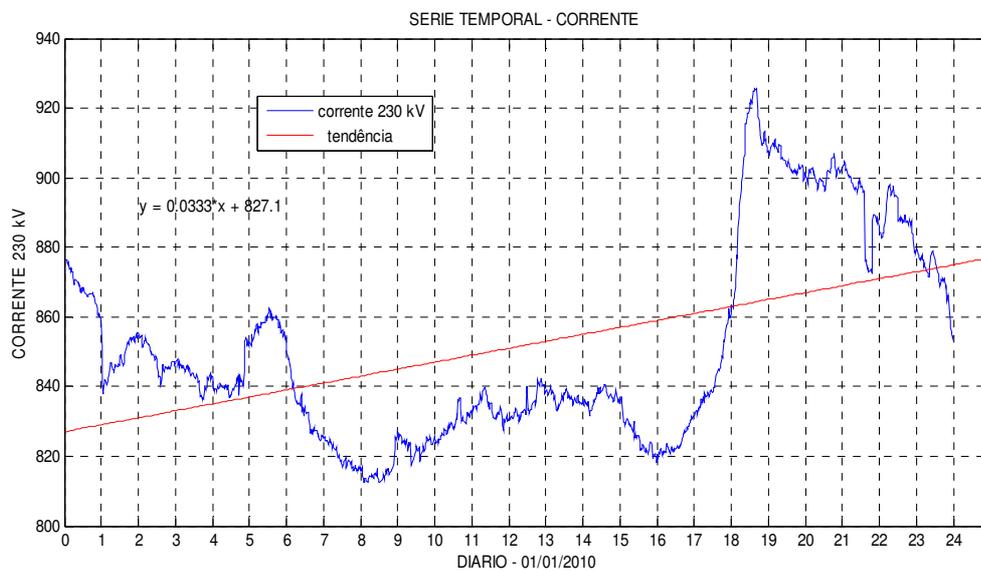
Ao analisar a inclinação da reta da Figura 5.20, pode-se inferir que a tendência da potência ativa durante o ano de 2009 foi positiva e de crescimento; positiva porque houve mais picos positivos em relação à média; de crescimento, porque a inclinação da reta é positiva. Porém, nada se pode afirmar sobre a previsão de valores futuros e nem explicar o significado dos valores da série (Por que houveram picos de potência?). Notar que o objetivo não é prever valores futuros da série e nem determinar o modelo de comportamento da mesma (sazonalidades, erros intrínsecos); o objetivo é determinar se há mais ou menos crescimento em relação à média em determinado período de tempo.

A seguir, apresenta-se o gráfico da potência reativa no mesmo período. A Figura 5.21 apresenta o gráfico da série mais a tendência linear de comportamento. Observa-se ao analisar esses gráficos que a tendência foi negativa e de decréscimo; negativa, pois a magnitude dos picos de potência reativa nos primeiros meses de 2009 (janeiro, março e abril) foram maiores do que os valores máximos nos outros meses do ano; de decréscimo porque a inclinação da reta de tendência é negativa.

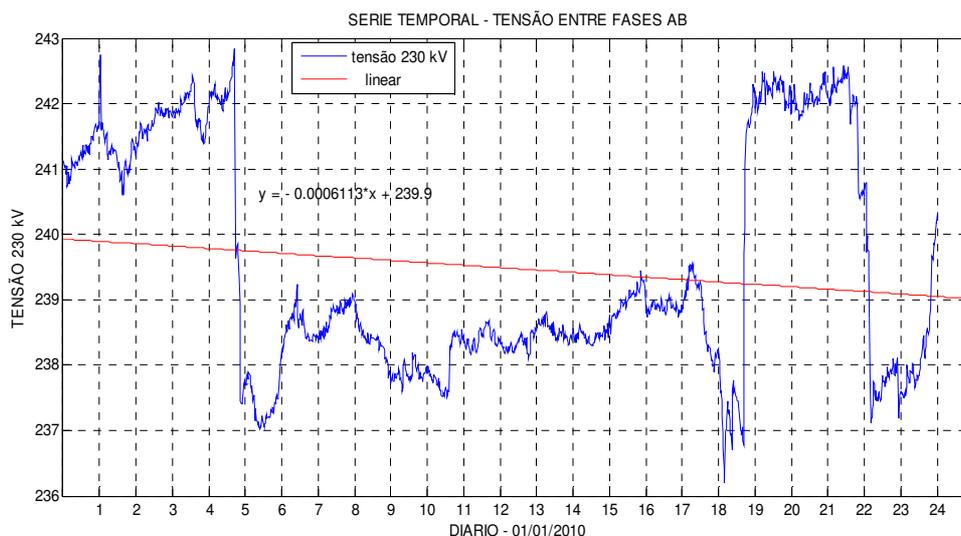


**Figura 5.21** – Potência reativa anual em 2009 e tendência.

As Figuras 5.22 e 5.23 exibem outros exemplos de séries. A saber: a corrente da fase A e tensão entre fases AB no dia 1 janeiro de 2009, respectivamente (precisão de 01 minuto).



**Figura 5.22** – Corrente fase A em 01/01/2010.



**Figura 5.23** – Tensão entre fases AB e tendência em 01/01/2010.

Além de informar se há crescimento e/ou decrescimento, é muito importante também prover aos especialistas em operação, informações sobre as *características de intensidade* da reta de tendência obtida. Essas características podem ser definidas como: *muito* ou *pouco crescentel/decrescente* e/ou *constante*, *sem/com* e/ou *muita/pouca irregularidade*. A seguir será apresentada a classificação *qualitativa* da tendência. Notar que a reta obtida via método da regressão linear será denominada de *reta de tendência*.

- *Classificação da tendência*

De acordo com a inclinação da reta de tendência, a *tendência de comportamento operacional* ou *tendência operacional* pode ser classificada, como:

- *[Pouco | Muito] Crescente;*
- *[Pouco | Muito] Decrescente;*
- *Constante [[Sem | Pouca | Muita] Irregularidade].*

Os termos entre colchetes são termos qualificadores (ou adjetivos) para a tendência operacional. São termos opcionais e trazem mais informações para a análise da curva em questão. Para determinar matematicamente a tendência e suas características (termos qualificadores) deve ser analisado o coeficiente angular  $m$  e o ângulo  $\theta$  que a reta da regressão faz com o eixo  $x$  (tempo). Os critérios utilizados nessa classificação são definidos a seguir:

A classificação da tendência operacional baseada no coeficiente angular  $m$  :

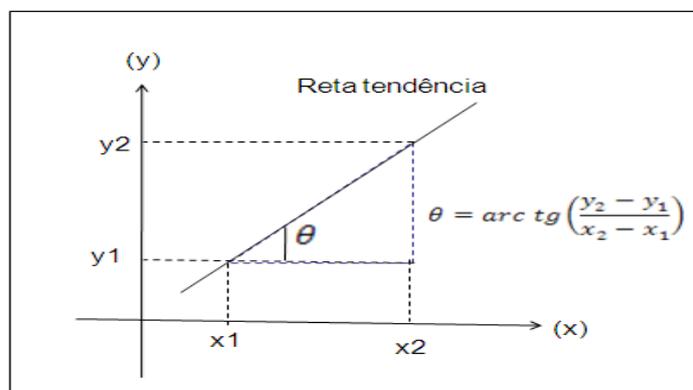
- *Crescente*, se  $m > 0$ ;
- *Decrescente*, se  $m < 0$ ;
- *Constante*, se  $m = 0$ .

A classificação da tendência operacional baseada no ângulo  $\theta$  :

- *Constante*, se  $-15^\circ < \theta < 15^\circ$ ;
- *Pouco Crescente*, se  $15^\circ < \theta < 40^\circ$ ;
- *Crescente*, se  $40^\circ < \theta < 65^\circ$ ;
- *Muito Crescente*, se  $65^\circ < \theta < 90^\circ$ ;
- *Pouco Decrescente*, se  $-40^\circ < \theta < -15^\circ$ ;
- *Decrescente*, se  $-65^\circ < \theta < -40^\circ$ ;
- *Muito Decrescente*, se  $-90^\circ < \theta < -65^\circ$ .

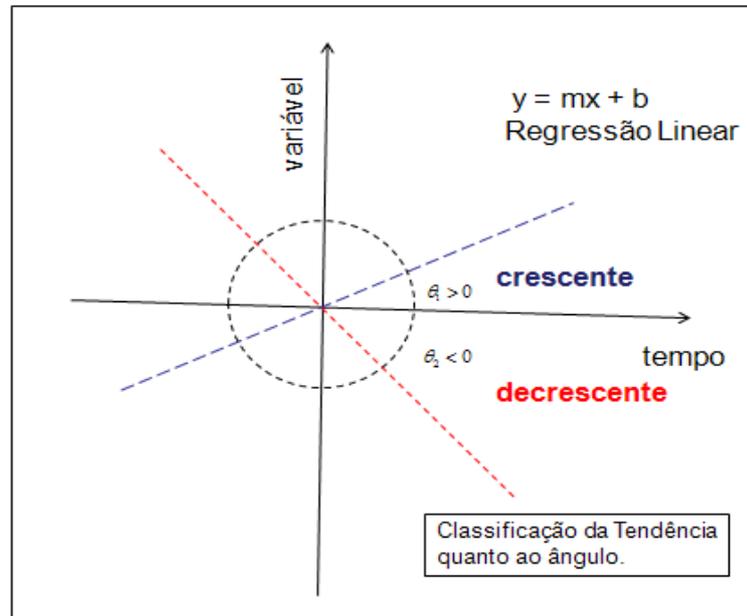
Os valores limites dos intervalos da lista acima foram definidos empiricamente e baseado em entrevistas com especialistas. Porém, os mesmos são parâmetros da metodologia e podem ser facilmente re-configurados. O ângulo  $\theta$  é determinado pela Equação 5.3 e a Figura 5.24 mostra a representação analítica da equação.

$$\theta = \text{arc tg} \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (5.3)$$

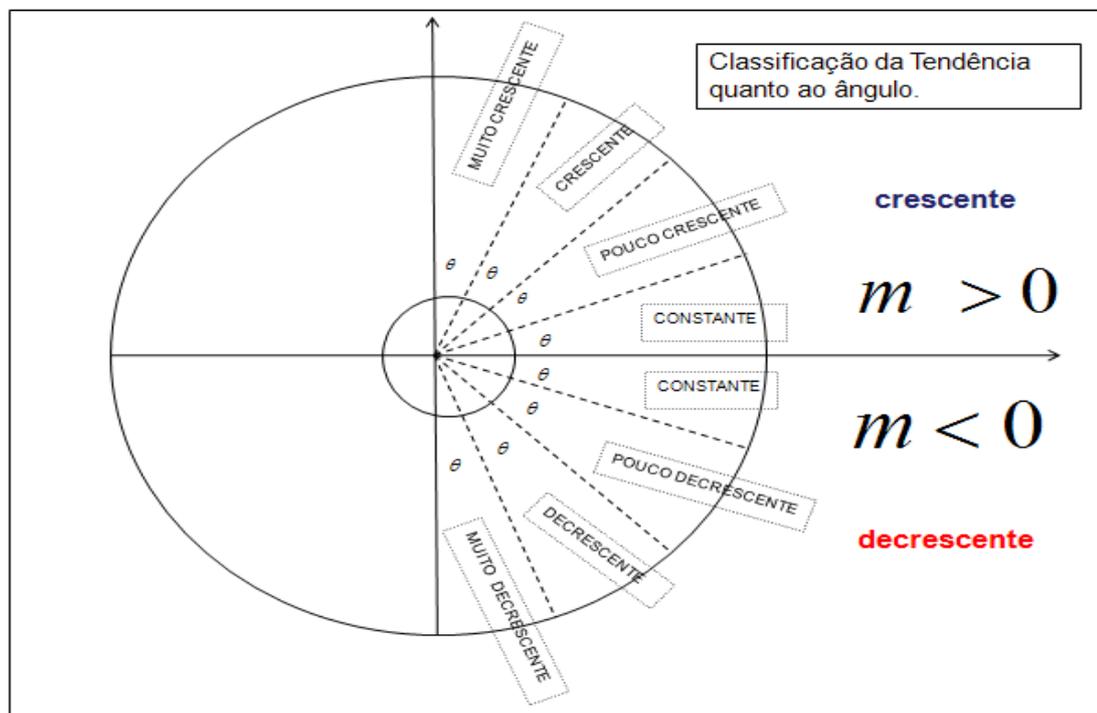


**Figura 5.24** – Definição da inclinação da reta de regressão linear.

As Figuras 5.25 e 5.26 esboçam como é realizada o cálculo e a classificação de tendências nas séries temporais resultantes dos blocos fuzzy.



**Figura 5.25** – Classificação da tendência quanto ao coeficiente angular.



**Figura 5.26** - Classificação da tendência quanto à inclinação da reta.

Outra informação que pode ser interessante durante uma análise da tendência é verificar a existência (ou não) de irregularidade acentuada quando o resultado da avaliação da tendência é dada como *constante*.

Para analisar o comportamento irregular dos dados pode-se fazer uso de uma medida de variabilidade estatística, pelo *desvio padrão* ( $s$ ) e pelo *coeficiente de variabilidade* ( $C_v$ ). Com o cálculo dessas medidas estatísticas é possível verificar o comportamento de variação dos dados e com isso, identificar de modo mais preciso se a série realmente apresenta um padrão constante ou se há presença de picos acima e abaixo da média que revelem graus de aleatoriedades na série em questão. As definições matemáticas do desvio padrão e do coeficiente de variabilidade são apresentadas nas Equações 5.4 e 5.5, respectivamente.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.4)$$

onde,  $x_i$  é o valor dos dados observados na posição  $i$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $\bar{x}$  é a média aritmética dos dados observados.

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (5.5)$$

Em estatística, o coeficiente de variação ( $C_v$ ) é uma medida de dispersão que se presta para a comparação de distribuições diferentes. É definido como sendo o quociente entre o desvio padrão  $S$  e a sua média  $\bar{x}$ . Para se determinar os valores dos desvios padrões que definem o grau de irregularidade pode-se observar os dados e, com isso, definir os limites para uma condição de variação considerada normal a partir da análise de um especialista. Como o coeficiente de variação é um valor entre 0.0 e 1.0 podemos definir o grau de variação de acordo com o valor do  $C_v$  do seguinte modo:

- Sem Irregularidade
  - $C_v = (0.0 \text{ até } 0.20)$ ;
- Pouca Irregularidade
  - $C_v = (0.21 \text{ até } 0.7)$ ;
- Muita Irregularidade
  - $C_v = (0.71 \text{ ou mais})$ .

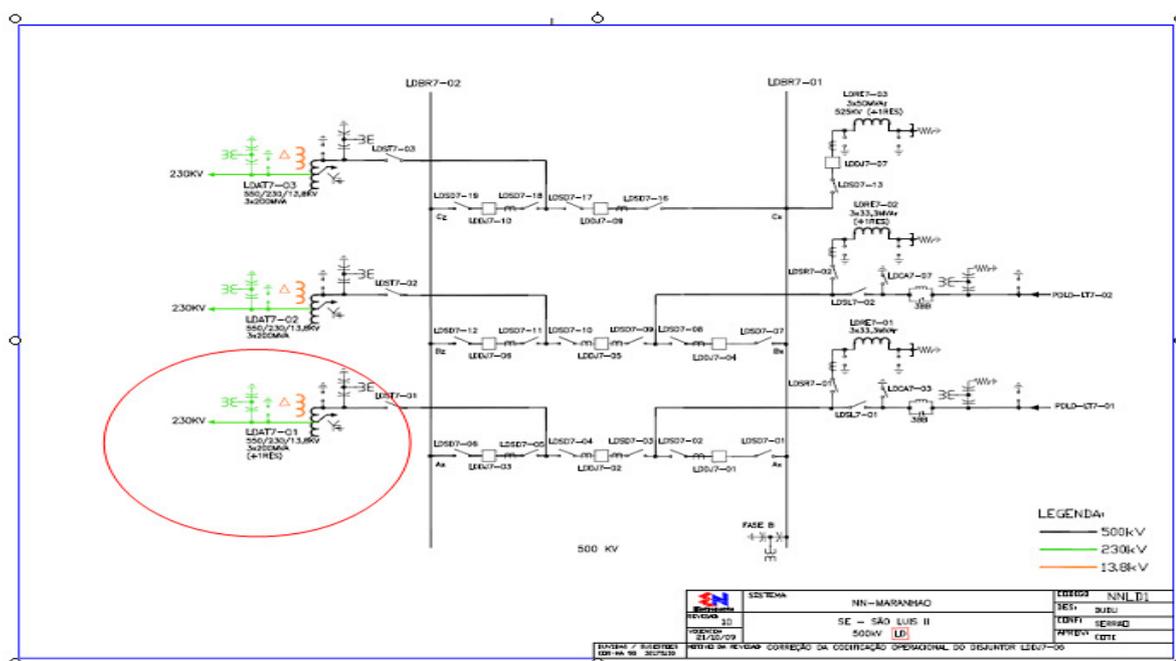
### 5.3 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se a metodologia proposta para efetuar um monitoramento do tipo *qualitativo* em transformadores de potência. Além disso, definiu-se uma proposta para realizar a análise de tendência operacional a partir da saída do bloco fuzzy operacional.

No próximo Capítulo serão apresentadas simulações com dados coletados de transformadores em operação atual utilizando a metodologia proposta, a fim de verificar-se a aplicabilidade e eficiência da proposta em um cenário real.

## 6 ESTUDO DE CASOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para efetuar simulações com a metodologia proposta no capítulo anterior, utilizou-se a base de dados histórica disponível no centro de operação de uma empresa nacional geradora e transmissora de energia elétrica, a ELETROBRÁS ELETRONORTE [5]. Extraíram-se inúmeras varreduras de medidas elétricas de interesse (corrente, tensão, potência, temperaturas) de um importante autotransformador de uma das maiores subestações dessa empresa (subestação de São Luís II) e simulou-se o monitoramento das suas condições operativas em vários períodos de análise. A Figura 6.1 exibe o diagrama unifilar onde o autotransformador — LDAT7-01 — está lotado.



**Figura 6.1** — Diagrama unifilar do lado de 500 kV da Subestação de São Luís II da CMA.

O estudo de caso foi realizado em três etapas: (i) aplicação da metodologia utilizando os dados históricos do autotransformador LDAT7-01 em variados períodos de análise (diário, mensal, anual) e com variadas precisões das varreduras (horária, diária, mensal) nos lados de transformação de 230 kV e 500 kV; (ii) testes de avaliação para averiguar a sensibilidade da metodologia proposta e sua real capacidade de mapear entradas (medidas elétricas) em estados operacionais; e por fim, (3) executar análise de tendência de comportamento sobre as saídas do bloco fuzzy operacional.

## 6.1 ETAPA DE PRÉ-PROCESSAMENTO

A etapa de pré-processamento de dados pode ser definida como uma tarefa computacional que garanta a consistência dos dados de entrada e que implemente filtros capazes de reduzir a variabilidade em séries temporais quando necessário. Antes de executar simulações de monitoramento e análise de tendências é necessário definir formalmente alternativas de métodos para executar o pré-processamento em todas as entradas dos blocos fuzzy das medidas do transformador.

### 6.1.1 LIMPEZA DOS DADOS

Os dados do mundo real tendem a ser incompletos, inconsistentes e com ruídos, contribuindo para a imprecisão desses dados (*inconsistência de dados*). Rotinas para limpeza em dados tentam preencher valores inexistentes (“buracos” na varredura de dados), retirada de ruído ao identificar valores fora do padrão, e corrigir as inconsistências presentes nos mesmos [70].

Os valores que serão utilizados na metodologia proposta são obtidos via uma complexa rede de supervisão composta de sensores digitais de aquisição inseridos em grandes campos eletromagnéticos, equipamentos de telecomunicações (roteadores, antenas de transmissão, fibras óticas), redes de computadores, entre outros. Defeitos em algum equipamento de núcleo de rede, erros em algum protocolo de comunicação ou até mesmo erros em dispositivos eletrônicos de armazenamento podem tornar os dados de entrada inconsistentes. A seguir, é apresentada uma lista de possíveis métodos para preencher valores inexistentes e/ou errados [71]:

- Usar uma constante global para preencher os valores que estão faltando (como o valor nominal da variável);
- Preencher os valores inexistentes com o valor médio obtido a partir dos dados presentes;
- Usar o valor mais provável para o valor faltante utilizando técnicas de previsão, tais como métodos estatísticos e/ou outros formalismos (árvores de decisão, redes bayesianas, regressão, redes neurais, entre outras).

A presença de ruídos também pode ser tratada. Ruído é um erro aleatório ou variância nos dados obtidos. As principais técnicas para detectar ruídos são a regressão linear e a clusterização [70] [71].

Nos estudos de caso executados neste trabalho, valores inexistentes em qualquer período de tempo  $t$  foram preenchidos com o valor médio dos dados disponíveis. Para tratar o ruído, arbitrou-se que qualquer valor maior do que o dobro do valor nominal da medida em questão (valor máximo recomendado pelo especialista e/ou fabricante do equipamento para a medida) é considerado como *ruído* e deve ser substituído pelo o valor médio dos dados disponíveis.

Todas as varreduras de medidas utilizadas nos estudos de casos deste capítulo foram obtidas através de consultas para funções especificamente desenvolvidas com o objetivo de obter apenas as varreduras do LDAT07-01 e as estatísticas principais (máximo, média, mínimo), de acordo com o período e a precisão de interesse. Essas funções foram implementadas internamente no sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) POSTGRESQL (usando a linguagem *plpgsql*) [72] instalado no computador denominado de *base histórica* do CEOR/TM (Centro de Operação Regional do Tocantins/Maranhão da ELETROBRÁS ELETRONORTE).

Todas as simulações com os blocos fuzzy foram executadas via scripts no ambiente MATLAB® [73]. As varreduras usadas nas simulações tiveram que passar pelas etapas de pré-processamento e de exportação do formato das consultas devolvidas pela base histórica (resultados de comandos SQL - *selects*) para um formato de arquivo passível de ser lido pelo MATLAB® através da função *csvread*. Para tais tarefas, foi implementado um programa customizado na linguagem Visual Basic [74] da plataforma .NET [75].

## 6.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A seguir, é apresentada a aplicação da metodologia de monitoramento fuzzy de transformadores de potência, considerando-se monitoramentos diário, mensal e anual do autotransformador LDAT7-01, com precisões variadas e avaliando os valores máximos em cada intervalo da precisão.

## 6.2.1 MONITORAMENTO DIÁRIO

- *Monitorar LDAT7-01/230 kV – Data 05/01/2010 – Precisão de 01 Hora*

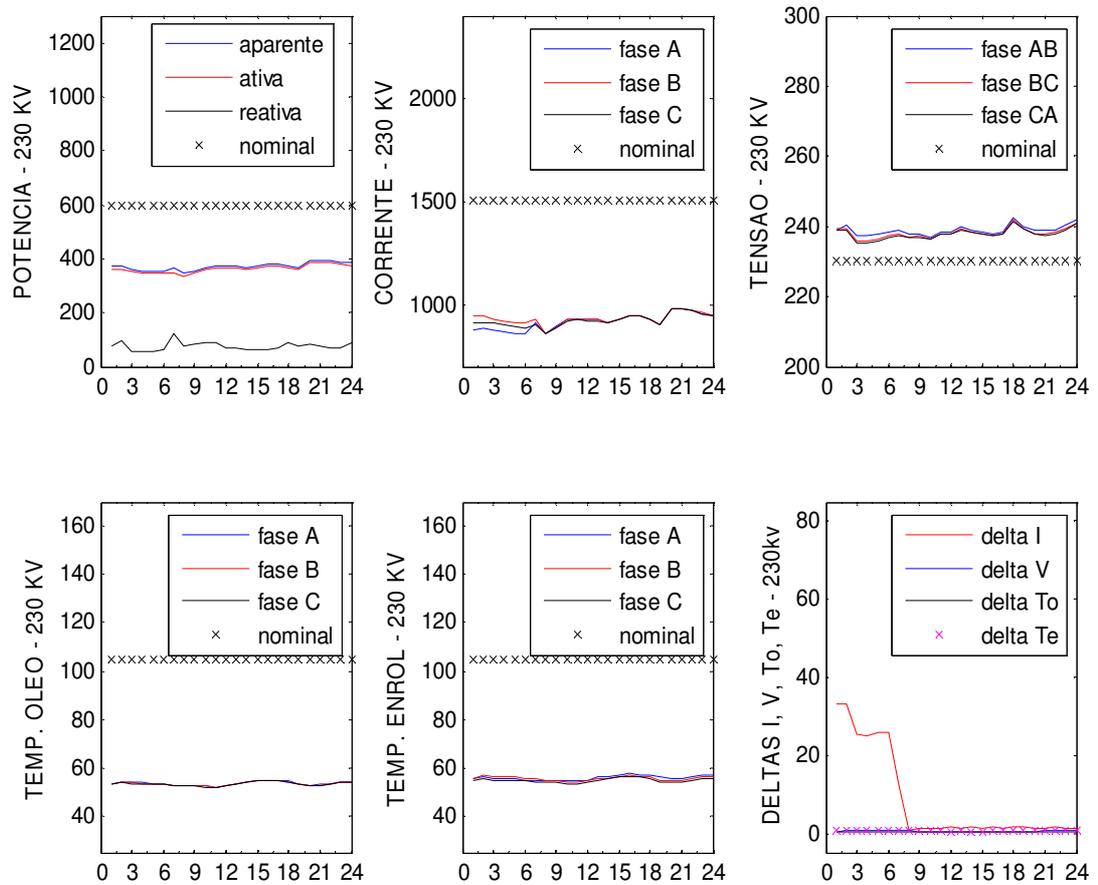
A Figura 6.2 apresenta os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do autotransformador LDAT7-01 no dia 05 de janeiro de 2010 no lado de 230 kV. A parte *a* exibe a varredura da potência ativa, reativa e potência aparente (esta última calculada). As partes *b*, *c*, *d* e *e* exibem as varreduras das fases *A*, *B* e *C* da corrente, tensão e temperaturas, respectivamente. A parte *f* exibe os valores dos desvios padrões extraídos das fases *A*, *B* e *C* da corrente (*delta I*), tensão (*delta V*) e temperaturas (*delta To* – temperaturas do óleo e *delta Te* – temperaturas dos enrolamentos).

O valor nominal para potência é de 600 MVA; para corrente no lado de 230 kV é 1506 A (Ampères); o valor nominal para tensão é 230 kV; e para todas as temperaturas o valor nominal é 105 °C.

As Tabelas 6.1 (corrente, potência, tensão), 6.2 (temperaturas do óleo e enrolamentos) e 6.3 (desvios padrões das medidas trifásicas) apresentam os valores máximos dessas medidas obtidos por hora.

Ao analisar os gráficos 6.2 e tabelas 6.1, 6.2, e 6.3, observa-se que nesse dia o transformador comportou-se estável onde nenhuma de suas medidas ultrapassou os valores nominais. A potência ativa durante todo o dia apresentou valores entre 50% e 60% do valor nominal (os valores pico foram obtidos no intervalo das 19 às 24 horas do dia). As correntes seguiram o mesmo comportamento da potência, onde o valor máximo foi obtido entre as 22 e 23 horas.

A tensão apresentou-se irregular e um pouco distante do nominal de 230 kV durante todo o dia. As temperaturas obtidas são bem modestas e bem abaixo do valor nominal (105 °C) e do valor de *trip* (115 °C). Os valores dos desvios padrões foram pequenos, mostrando que as fases dessas medidas ficaram bem sincronizadas; a exceção foi no intervalo entre 00 e 07 horas, onde o *delta I* apresentou valores elevados em relação aos outros deltas, cujos valores mostraram-se discretos (inferiores a 2.0). Os valores altos para o *delta I* foram obtidos devido às grandes diferenças nos valores da fase *A* e *B* nesse período.



**Figura 6.2** — Medidas monitoradas no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.

**Tabela 6.1** – Correntes, potências e tensões no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.

Intervalo (Hs)	I_FA_230	I_FB_230	I_FC_230	P. Ativa_230	P. Reativa_230	VAB_230	VBC_230	VCA_230
0-1	881,21	947,26	911,42	361,84	75,94	238,82	239,35	238,8
1-2	883,92	949,73	913,94	357,72	98,63	240,58	239,53	238,96
2-3	878,18	928,48	908,41	351,75	58,99	237,06	235,99	235,37
3-4	869,98	919,76	899,95	348,74	54,76	237,15	235,98	235,49
4-5	862,65	913,72	892,86	346,44	55,94	237,58	236,41	235,94
5-6	859,38	910,78	889,42	345,34	64,04	238,28	237,14	236,67
6-7	911,01	926,1	900,7	346,26	121,55	238,65	237,57	237,16
7-8	860,29	860,04	859,13	335,7	78,69	237,68	237,04	236,63
8-9	889,95	889,27	887,84	345,33	83,03	237,86	237,41	236,96
9-10	925,25	925,12	923,09	357,05	91,83	236,92	236,37	236,12
10-11	926,6	926,54	924,4	363,52	91	238,36	237,85	237,7
11-12	925,97	925,54	923,35	364	67,09	238,54	238,03	237,85
12-13	925,2	925,03	922,73	363,73	69,66	239,71	239,16	238,92
13-14	911,93	911,6	909,2	359,28	65,42	239,08	238,55	238,35
14-15	931,4	930,53	928,73	365,89	64,56	238,47	237,96	237,76
15-16	949,12	948,66	946,28	371,94	64,45	238,01	237,54	237,37
16-17	947,76	946,72	945,17	371,6	66,66	238,48	237,99	237,77
17-18	930,77	929,34	927,89	366,07	86,18	242,22	241,68	241,46
18-19	904,4	904,05	901,56	356,81	72,6	240,01	239,47	239,27
19-20	979,58	982,04	980,24	384,59	81,48	238,59	238,04	237,76
20-21	981,38	983,51	981,95	385,34	79,02	238,6	237,85	237,5
21-22	972,88	975,35	972,65	382,98	70,68	239,05	238,32	238,01
22-23	957,17	959,42	957,06	377,17	70,24	240,13	239,26	239,02
23-24	942,39	944,5	942,29	375,04	90,12	241,93	240,99	240,77

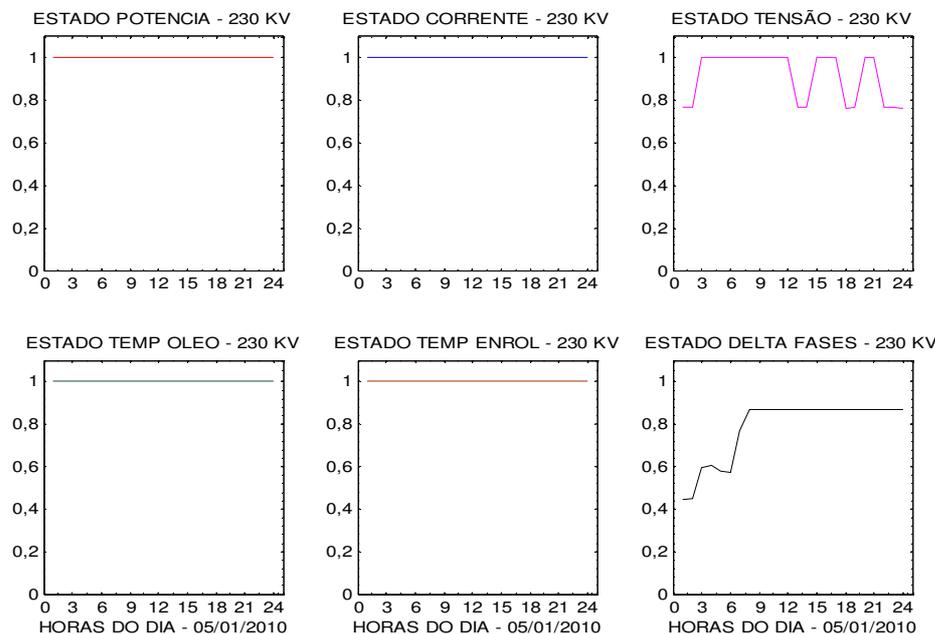
**Tabela 6.2** — Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.

Intervalo (Hs)	TE_FA_230	TE_FB_230	TE_FC_230	TO_FA	TO_FB	TO_FC
0-1	55,87	55,6	54,85	53,51	53,41	53,36
1-2	56,06	56,65	55,27	54,04	53,88	53,88
2-3	55,77	56,46	55,17	53,87	53,71	53,7
3-4	55,67	56,26	55,08	53,77	53,61	53,6
4-5	55,47	56,05	54,78	53,57	53,41	53,4
5-6	55,17	55,76	54,47	53,27	53,12	53,1
6-7	54,77	55,46	54,17	52,96	52,81	52,8
7-8	54,57	54,95	53,78	52,73	52,59	52,57
8-9	54,67	54,56	53,78	52,53	52,4	52,36
9-10	54,46	54,37	53,57	52,35	52,24	52,16
10-11	54,57	54,06	53,48	52,11	52,01	51,95
11-12	55,17	54,77	54,28	52,76	52,69	52,63
12-13	55,97	55,36	54,97	53,54	53,46	53,38
13-14	56,46	55,86	55,58	54,08	53,99	53,92
14-15	57,17	56,46	56,27	54,69	54,6	54,51
15-16	57,47	56,65	56,47	54,87	54,79	54,72
16-17	57,28	56,56	56,17	54,71	54,6	54,53
17-18	57,05	56,36	55,87	54,48	54,39	54,33
18-19	55,97	55,15	54,38	53,3	53,22	53,17
19-20	55,47	54,56	53,77	52,53	52,45	52,42
20-21	55,87	55,05	54,37	52,99	52,92	52,87
21-22	56,26	55,45	54,78	53,43	53,35	53,3
22-23	56,77	55,96	55,47	54	53,93	53,86
23-24	56,96	56,05	55,67	54,24	54,16	54,09

**Tabela 6.3** – *Delta Fases* no LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.

Intervalo (Hs)	Delta I 230	Delta V 230	Delta Te 230	Delta To 230
0-1	33,06	0,31	0,53	0,08
1-2	32,95	0,82	0,69	0,09
2-3	25,32	0,85	0,65	0,1
3-4	25,06	0,85	0,59	0,1
4-5	25,68	0,84	0,64	0,1
5-6	25,82	0,83	0,65	0,09
6-7	12,77	0,77	0,65	0,09
7-8	0,61	0,53	0,6	0,09
8-9	1,08	0,45	0,49	0,09
9-10	1,21	0,41	0,49	0,1
10-11	1,25	0,35	0,55	0,08
11-12	1,41	0,36	0,45	0,07
12-13	1,38	0,41	0,5	0,08
13-14	1,49	0,38	0,45	0,08
14-15	1,36	0,37	0,47	0,09
15-16	1,52	0,33	0,53	0,08
16-17	1,3	0,36	0,56	0,09
17-18	1,44	0,39	0,59	0,08
18-19	1,55	0,38	0,8	0,07
19-20	1,27	0,42	0,85	0,06
20-21	1,1	0,56	0,75	0,06
21-22	1,5	0,53	0,74	0,07
22-23	1,33	0,58	0,66	0,07
23-24	1,25	0,62	0,66	0,08

Na Figura 6.3 são apresentados os gráficos das saídas do bloco fuzzy das medidas.

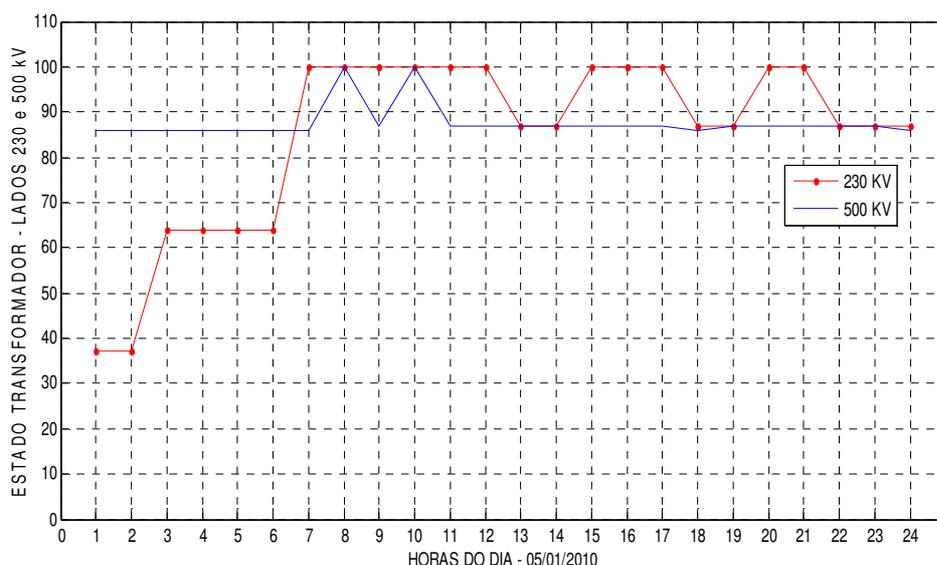


**Figura 6.3** — Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010.

Analisando os gráficos da Figura 6.3, observa-se que a potência, corrente e as temperaturas (partes *a*, *b*, *d* e *e* respectivamente) obtiveram notas máximas de qualidade (1.0), uma vez que as varreduras dessas medidas estão muito abaixo dos valores nominais (entre 40% e 60% menores); uma vez que os blocos fuzzy das medidas foram projetados para atribuir notas baixas (próximas de 0.0) para valores que estejam ao redor e/ou ultrapassando o nominal, valores muito abaixo desses limites recebem notas altas (próximas de 1.0).

A tensão também recebeu notas altas (entre 0.8 e 1.0), porque embora não fique estabilizada exatamente em 230 kV, a mesma variou pouco e dentro do intervalo de +10% e -10%. O pior desempenho nesse dia foi atribuído pelo bloco fuzzy delta fases, que apresentou notas abaixo de 0.4 (entre as regiões de *médio* e *ruim*).

Na Tabela 6.3 observa-se que entre as 00 e 07 horas do dia, foram encontrados valores do *delta I* (33, 32, 25, 25, 25, 25 e 12) bem superiores aos valores dos *deltas V*, *Te* e *To* (todos inferiores a 1.0 no mesmo período). O *delta I* apresentou valores altos nesse período, porque as fases da corrente ficaram muito dessincronizadas (vide Tabela 6.1). Por exemplo, entre 00 e 01 da manhã a fase *IFB* chegou a 947.26 (A) enquanto a fase *IFA* ficou apenas em 881.21. A partir das 07 horas, o sincronismo entre as fases recebeu nota máxima. Na Figura 6.4 é apresentado o gráfico da saída do bloco fuzzy operacional no lado de 230 kV e 500 kV.



**Figura 6.4** — Saída do bloco fuzzy operacional no LDAT7-01/230 kV/500 kV em 05/01/2010.

Analisando o resultado operacional final do dia 05/01/2010, vê-se claramente que as notas mais baixas operacionais foram influenciadas pelas notas baixas do *estado delta fases* e *estado tensão*. A nota operacional mais baixa foi encontrada na primeira hora do dia (abaixo dos 40 pontos, entre as regiões de *advertência* e *urgência*), justamente o período de mais alta dessincronização das fases da corrente e pior nota atribuída pelo bloco fuzzy delta fases.

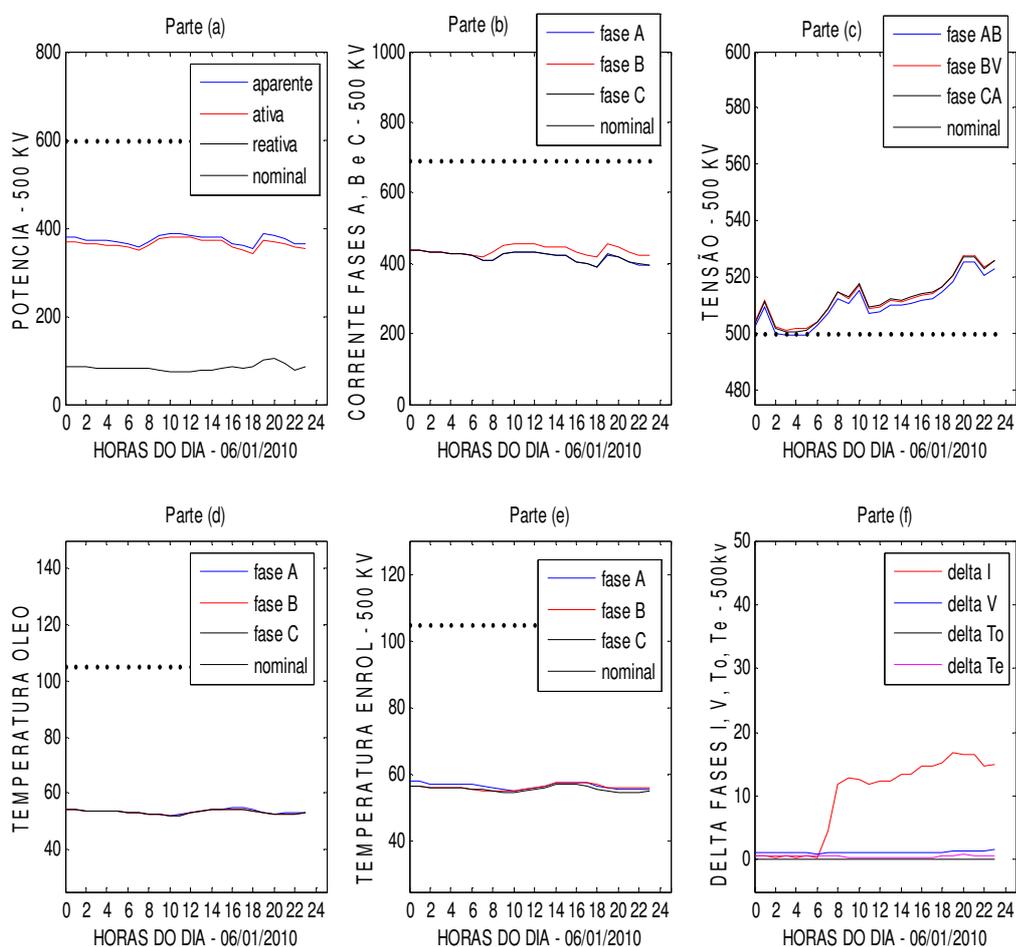
A partir das 07 horas, o lado de 230 kV consegue notas máximas com variações entre 80 e 100 pontos, em virtude da variação da nota da tensão no mesmo período. Para efeito de comparação, a Figura 6.4 também apresenta o resultado operacional do lado de 500 kV no mesmo dia; nesse lado observa-se uma operação entre as regiões *estável* e *ótima* durante todo o dia.

- Monitorar LDAT7-01/500 kV – Data 06/01/2010 – Precisão de 01 Hora

A Figura 6.5 apresenta os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do transformador LDAT7-01 no dia 06 de janeiro de 2010 no lado de 500 kV. A parte (a) exhibe a varredura da potência ativa, reativa e potência aparente (esta última calculada), as partes (b), (c), (d), e as varreduras das fases A, B e C da (corrente, tensão e temperaturas) e a parte (f) os valores dos desvios padrões extraídos das fases da corrente (*delta I*), tensão (*delta V*) e temperaturas (*delta To* – temperaturas do óleo e *delta Te* – temperaturas dos enrolamentos).

O valor nominal para potência é de 600 MVA; para corrente no lado de 500 kV é de 692 A (Ampères); o valor nominal para tensão é de 500 kV e para as temperaturas, o valor nominal é de 105° C. As Tabelas 6.4 (corrente, potência, tensão), 6.5 (temperaturas óleo e enrolamentos) e 6.6 (desvios padrões) apresentam os valores máximos dessas medidas obtidos por hora.

Ao analisar os gráficos e tabelas, observa-se que nesse dia o transformador comportou-se de forma estável (potência, corrente e temperaturas não ultrapassaram seus respectivos nominais). A tensão apresentou-se de forma irregular em torno do nominal de 500 kV e o delta fases da corrente apresentou valores elevados em relação aos outros deltas. Os gráficos das saídas do bloco fuzzy das medidas são apresentados na Figura 6.5.



**Figura 6.5** — Medidas monitoradas no LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.

**Tabela 6.4** – Correntes, potências e tensões no LDAT7-01 lado 500 kV em 06/01/2010.

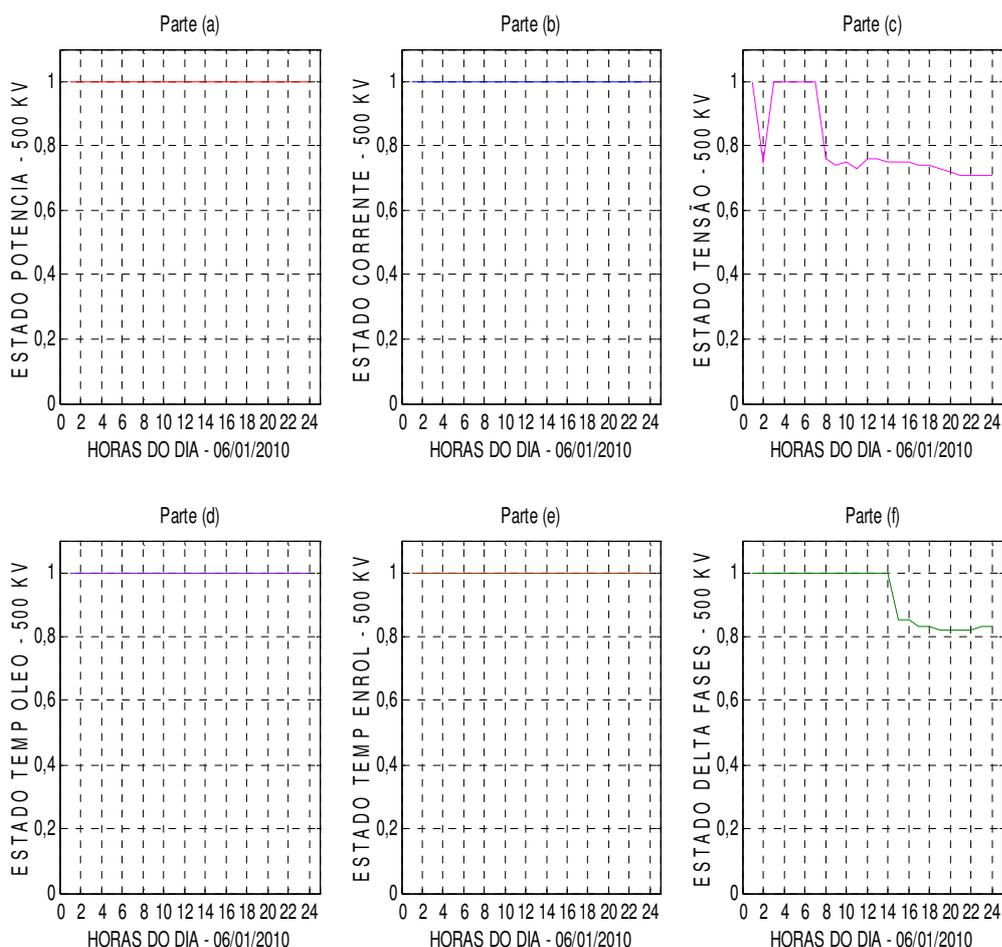
Intervalo (Hs)	I_FA_500	I_FB_500	I_FC_500	P. Ativa_500	P. Reativa_500	VAB_500	VBC_500	VCA_500
0-1	435,45	434,38	435,08	369,16	86,75	502,18	504,27	503,71
1-2	435,26	434,25	434,87	368,94	86,18	509,47	511,62	511,04
2-3	430,26	429,38	430,09	363,05	84,28	500,3	502,59	501,87
3-4	430,96	429,94	430,69	363,62	80,92	499,23	501,44	500,67
4-5	428,89	428,03	428,75	362,18	80,63	499,43	501,56	500,75
5-6	425,67	424,79	425,71	359,83	80,98	499,67	501,68	500,99
6-7	420,67	419,94	420,69	356,23	80,9	502,77	504,35	504,23
7-8	410	417,05	408,88	347,51	80,36	507,01	508,67	508,83
8-9	408,57	429,32	409,46	359,82	79,5	512,69	514,62	514,77
9-10	426,4	449,16	427,72	373,74	76,38	510,7	512,32	512,77
10-11	432,04	454,13	432,91	378,02	74,87	515,65	517,22	517,68
11-12	432,84	453,39	433,45	378,05	74,03	507,32	508,79	509,43
12-13	431,36	452,84	432	377,85	72,75	507,96	509,43	509,97
13-14	424,82	446,62	425,66	372,77	76,12	510,09	511,61	512,18
14-15	421,54	445,14	422,52	370,35	78,84	509,8	511,41	511,82
15-16	421,45	445,27	422,36	370,42	82,23	510,88	512,71	512,94
16-17	404,36	430,28	405,59	355,64	86,57	511,97	513,75	514
17-18	398,1	424,27	399,22	349,55	81,63	512,57	514,36	514,55
18-19	388,26	415,51	389,9	343,14	84,57	514,82	516,71	516,73
19-20	423,66	453,77	425,97	372,81	101	518,21	520,61	520,56
20-21	415,29	445,05	417,68	369,49	102,57	525,2	527,66	527,37
21-22	402,35	432,14	405,15	362,6	93,54	525,14	527,5	527,21
22-23	395,5	422,25	398,21	355,99	78,83	520,95	523,35	523,18
23-24	392,84	419,91	395,65	353,82	85,98	523,23	526,21	525,84

**Tabela 6.5** — Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.

Intervalo (Hs)	TE_FA_500	TE_FB_500	TE_FC_500	TO_FA	TO_FB	TO_FC
0-1	56,48	56,2	55,65	53,44	53,31	53,27
1-2	57,86	56,6	56,65	54,17	54,09	54,03
2-3	57,27	56,01	56,04	53,77	53,73	53,62
3-4	57,27	56,1	56,15	53,67	53,59	53,52
4-5	57,27	56,1	56,15	53,74	53,66	53,59
5-6	57,17	56,1	56,15	53,7	53,62	53,55
6-7	56,87	55,71	55,85	53,37	53,3	53,22
7-8	56,36	55,32	55,36	53,07	52,99	52,92
8-9	55,86	55,03	54,86	52,71	52,62	52,57
9-10	55,66	55,12	54,77	52,42	52,3	52,26
10-11	54,86	55,02	54,37	51,89	51,76	51,72
11-12	55,47	55,52	54,96	52,37	52,22	52,19
12-13	56,05	56,01	55,57	53,08	52,93	52,89
13-14	56,66	56,6	56,04	53,7	53,55	53,53
14-15	57,36	57,4	56,86	54,41	54,26	54,22
15-16	57,36	57,4	56,86	54,45	54,3	54,27
16-17	57,36	57,5	56,86	54,73	54,56	54,53
17-18	57,36	57,5	56,75	54,69	54,52	54,5
18-19	56,66	56,9	55,85	54,07	53,91	53,91
19-20	55,86	56,2	54,96	53,33	53,17	53,17
20-21	55,65	56	54,55	52,64	52,46	52,52
21-22	55,56	56,1	54,66	52,93	52,76	52,79
22-23	55,56	56,1	54,76	52,97	52,8	52,81
23-24	55,65	56,2	54,95	53,13	52,97	52,97

**Tabela 6.6** – Desvio padrão das medidas trifásicas no LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.

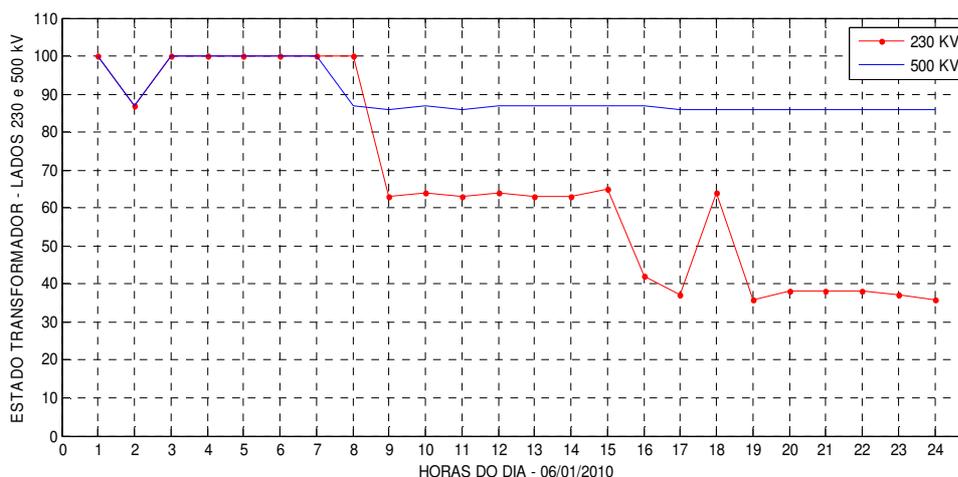
Intervalo (Hs)	Delta I 500	Delta V 500	Delta Te 500	Delta To 500
0-1	0,54	1,08	0,42	0,09
1-2	0,51	1,11	0,71	0,07
2-3	0,47	1,17	0,72	0,08
3-4	0,53	1,12	0,66	0,08
4-5	0,46	1,08	0,66	0,08
5-6	0,52	1,02	0,6	0,08
6-7	0,43	0,88	0,63	0,08
7-8	4,43	1,01	0,59	0,08
8-9	11,73	1,16	0,54	0,07
9-10	12,78	1,09	0,45	0,08
10-11	12,51	1,06	0,34	0,09
11-12	11,69	1,08	0,31	0,1
12-13	12,22	1,04	0,27	0,1
13-14	12,35	1,08	0,34	0,09
14-15	13,35	1,07	0,3	0,1
15-16	13,5	1,13	0,3	0,1
16-17	14,62	1,11	0,34	0,11
17-18	14,8	1,09	0,4	0,1
18-19	15,28	1,1	0,55	0,09
19-20	16,76	1,37	0,64	0,09
20-21	16,54	1,34	0,76	0,09
21-22	16,45	1,29	0,73	0,09
22-23	14,72	1,34	0,67	0,1
23-24	14,88	1,62	0,63	0,09



**Figura 6.6** — Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em 06/01/2010.

Analisando os gráficos das Figuras 6.5 e 6.6 observa-se novamente, que a potência, corrente e as temperaturas obtiveram notas máximas de qualidade (1.0), uma vez que as varreduras dessas medidas estão muito abaixo dos valores nominais. A tensão recebeu notas altas (entre 0.8 e 1.0), porém a partir das 11 horas (parte (c) da Figura 6.5) até o fim do dia, observa-se uma tendência crescente no valor da tensão e esse fenômeno é refletido no decréscimo (de 1.0 até valores próximos a 0.7) da qualidade da tensão, monitorada pelo bloco fuzzy da tensão (parte (c) da Figura 6.6).

A qualidade do *estado delta fases* cai (de 1.0 para 0.8) a partir das 15 horas, devido o aumento do *delta I* com valores de desvio padrão superiores a 13 (valores das fases da corrente muito diferentes).



**Figura 6.7** — Saída do bloco fuzzy operacional no LDAT7-01/230 kV/500 kV em 06/01/2010.

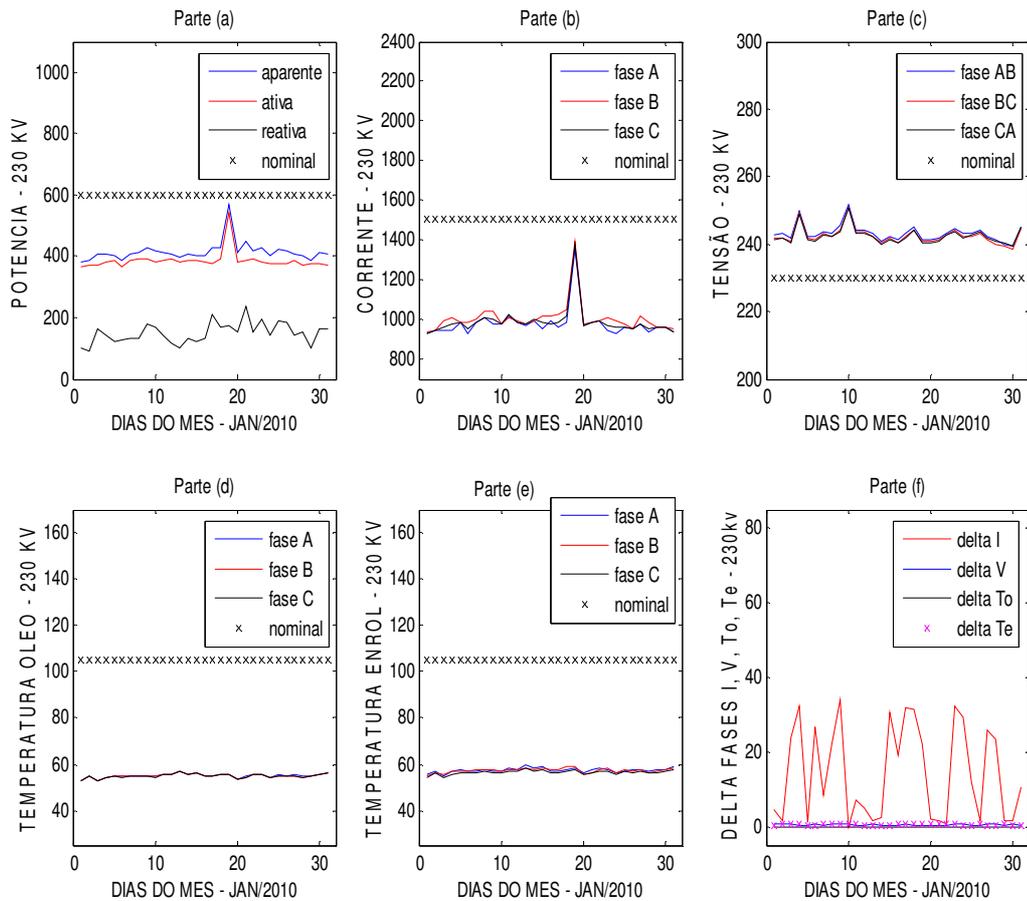
O resultado operacional do dia 06/01/2010 é apresentado na Figura 6.7. Observa-se que as notas mais baixas operacionais do dia foram influenciadas pelas notas baixas do *estado delta fases* e *estado tensão*. Observa-se ainda que a partir das 15 horas, a composição das quedas das notas da qualidade do *estado tensão* e *estado delta fases* fez com que a nota operacional do transformador fosse para abaixo dos 40 pontos até o fim do dia. Por outro lado, a composição da nota máxima (1.0) do *estado delta fases* entre 08 e 14 horas e notas inferiores a 0.8 do *estado da tensão* no mesmo período, resultou em notas do *estado operacional* estabilizado, em torno de 60 pontos.

Para efeito de comparação, a Figura 6.7 também apresenta o resultado operacional do lado de 500 kV. No lado de 500 kV observa-se uma operação entre as regiões *estável* e *ótima* durante todo o dia, entretanto, o lado de 230 kV apresentou um comportamento operacional pior, chegando a operar nas regiões de *advertência* e *urgência* (entre as notas 30 e 50).

## 6.2.2 MONITORAMENTO MENSAL

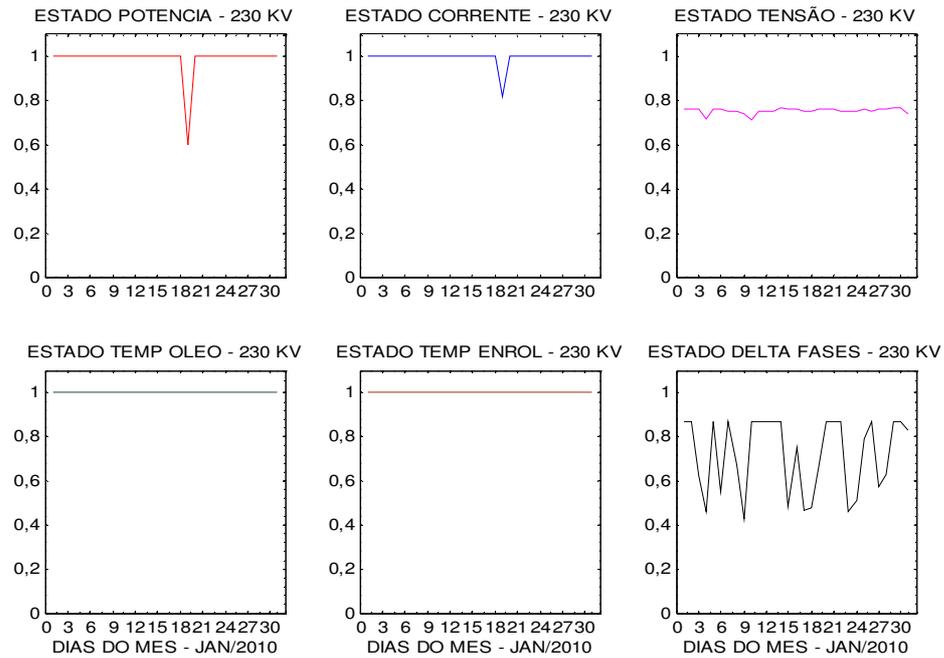
- Monitorar LDAT7-01/230 kV – Mês de JANEIRO/2010 – Precisão de 01 Dia

A Figura 6.8 apresenta os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do autotransformador LDAT7-01 durante todo o mês de janeiro de 2010 no lado de 230 kV com precisão diária (31 pontos por varredura).

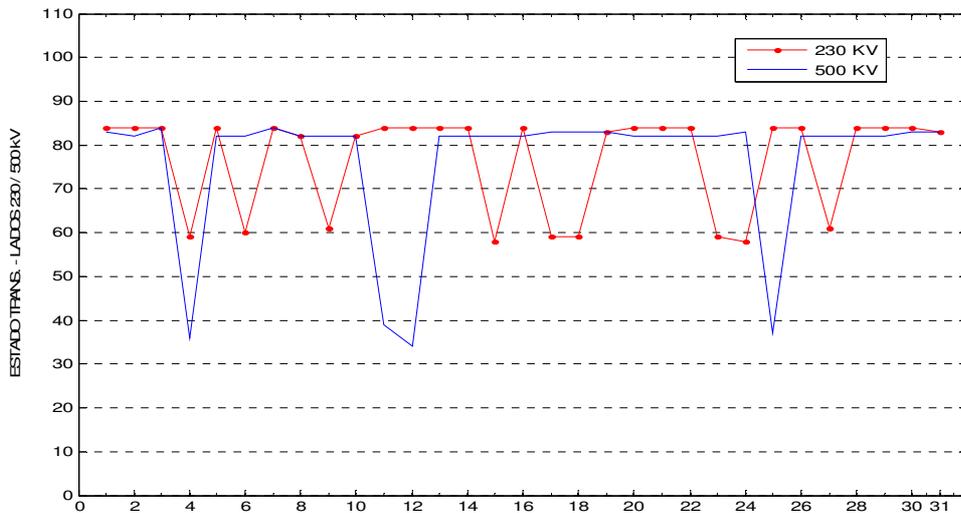


**Figura 6.8** — Medidas monitoradas no LDAT7-01/230 kV em janeiro de 2010.

Os gráficos das saídas do bloco fuzzy das medidas são apresentados na Figura 6.9. Nas partes (a) e (b) que representam o *estado potência* e *estado corrente*, é possível visualizar claramente um declínio da nota de qualidade inferida por seus respectivos blocos fuzzy em resposta aos valores picos apresentados por essas medidas no dia 19/01/2010. O resultado operacional do LDAT7-01 do lado de 230 kV durante todo o mês de janeiro de 2010 é apresentado na Figura 6.10.



**Figura 6.9** — Saídas dos blocos fuzzy das medidas do LDAT7-01/230 kV em janeiro/2010.



**Figura 6.10** – Saída do bloco fuzzy operacional do LDAT7-01/230/500kV em janeiro/2010.

Pela análise do comportamento operacional exibido na Figura 6.10, verifica-se que a operação do equipamento ficou trafegando entre os pares de regiões *estável/advertência* (valores entre 50 e 100 pontos) e *advertência/urgência* (valores entre 30 e 70) em ambos os lados da transformação. Os picos negativos estão diretamente associados às notas baixas para o *estado delta fases* durante o mês.

As Tabelas 6.7 (corrente, potência, tensão), 6.8 (temperaturas óleo e enrolamentos) e 6.9 (desvios padrões) apresentam os valores máximos obtidos em cada dia do mês.

**Tabela 6.7** – Corrente, potência, tensão no LDAT7-01/230 kV em janeiro/2010.

Dias/JAN	I FA_230	I FB_230	I FC_230	P. Ativa_230	P. Reativa_230	VAB_230	VBC_230	VCA_230
01	925,53	934,02	926,48	365,86	98,89	242,84	241,7	241,28
02	945,55	948,17	945,95	372,85	92,51	242,98	241,98	241,6
03	942,41	988,82	957,41	371,4	162,27	241,84	240,84	240,31
04	945,26	1009,68	976,1	379,75	144,04	249,67	249,23	248,88
05	981,38	983,51	981,95	385,34	121,55	242,22	241,68	241,46
06	930,18	983,53	955,8	365,15	126,19	242,22	241,09	240,57
07	985,96	1000,15	984,58	387,15	129,86	243,68	242,93	242,64
08	1007,12	1044,3	1005,54	393,81	131,2	243,31	242,39	242,2
09	973,49	1041,61	1003,94	389,28	181,11	245,3	244,21	243,64
10	975,07	975,13	975,24	383,67	167,62	251,75	250,93	250,52
11	1016,9	1007,54	1021,4	387,42	142,43	244,29	243,75	243,35
12	987,12	996,27	987,73	389,32	118,26	244,3	243,48	243,31
13	972,29	975,14	974	383,57	102,32	243,16	242,29	242,03
14	994,05	996,43	999,38	387,76	132,81	240,97	240,27	240,04
15	955,2	1016,74	986,05	385,01	121,31	242,25	241,59	241,45
16	993,15	1016,62	979,22	380,7	131,55	241,16	240,42	240,18
17	963,75	1025,38	980,74	374,64	208,73	243,01	242,09	241,71
18	984,29	1046,78	1013,51	393,23	170,58	244,92	244,18	243,92
19	1353,05	1397,21	1375,31	541,45	174,27	241,24	240,64	240,4
20	968,74	972,88	970,83	381,53	151,41	241,22	240,63	240,45
21	984,59	983,64	981,6	384,46	233,76	241,65	241,14	240,82
22	994,95	996,23	994,49	389,57	152,63	243,32	242,64	242,47
23	942,45	1006,67	972,59	379,00	193,58	244,68	244,06	243,52
24	931,83	990,31	962,92	373,94	142,14	243,15	242,14	241,91
25	958,12	979,51	960,7	378,12	189,9	243	242,26	242,72
26	952,46	955,5	954,13	377,02	183,03	244,17	243,28	243,7
27	975,25	1020,17	975,61	384,09	143,1	242,34	241,21	241,9
28	937,88	983,95	953,08	372,79	154,14	241,05	239,87	240,65
29	958	960,38	957,88	375,40	99,47	240,09	239,36	240,15
30	957,38	960,91	958,76	376,02	165,71	239,62	238,57	239,44
31	935,03	955,17	938,7	371,12	161,71	245,28	244,41	245,01

**Tabela 6.8** – Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/230 kV em janeiro/2010.

Dias/JAN	TE_FA_500	TE_FB_500	TE_FC_500	TO_FA	TO_FB	TO_FC
01	55,36	54,77	54,38	52,94	52,86	52,79
02	57,17	56,36	56,07	54,91	54,82	54,76
03	54,86	55,25	53,97	52,68	52,51	52,49
04	56,67	56,75	55,67	54,15	54,06	53,98
05	57,47	56,65	56,47	54,87	54,79	54,72
06	56,67	57,06	56,07	54,73	54,56	54,53
07	56,96	57,56	56,27	54,81	54,65	54,63
08	57,47	57,86	56,67	55,17	55,02	55
09	57,28	57,75	56,46	55,07	54,92	54,92
10	57,28	56,95	56,06	54,68	54,6	54,53
11	58,37	57,86	57,18	55,64	55,55	55,49
12	57,87	57,96	57,07	55,43	55,3	55,25
13	59,37	58,65	58,47	56,85	56,76	56,68
14	58,07	57,45	57,28	55,52	55,43	55,34
15	58,77	58,16	57,88	56,19	56,12	56,04
16	57,28	57,86	56,37	55,11	54,93	54,91
17	57,17	57,96	56,37	55,08	54,89	54,9
18	57,87	58,75	57,18	55,92	55,74	55,74
19	58,67	58,85	57,77	55,88	55,71	55,71
20	56,56	55,75	55,47	53,84	53,76	53,69
21	57,37	56,46	56,06	54,61	54,53	54,46
22	58,37	57,55	57,17	55,57	55,49	55,42
23	57,87	58,35	56,97	55,71	55,54	55,54
24	56,36	56,15	55,48	54,25	54,15	54,09
25	57,28	57,86	56,78	55,27	55,12	55,09
26	57,66	56,95	56,57	55,21	55,13	55,05
27	57,66	57,56	56,68	55,24	55,16	55,09
28	56,87	56,46	55,98	54,59	54,48	54,4
29	57,47	56,75	56,37	54,77	54,7	54,63
30	57,87	57,96	57,28	55,78	55,63	55,59
31	58,97	58,16	57,98	56,58	56,5	56,43

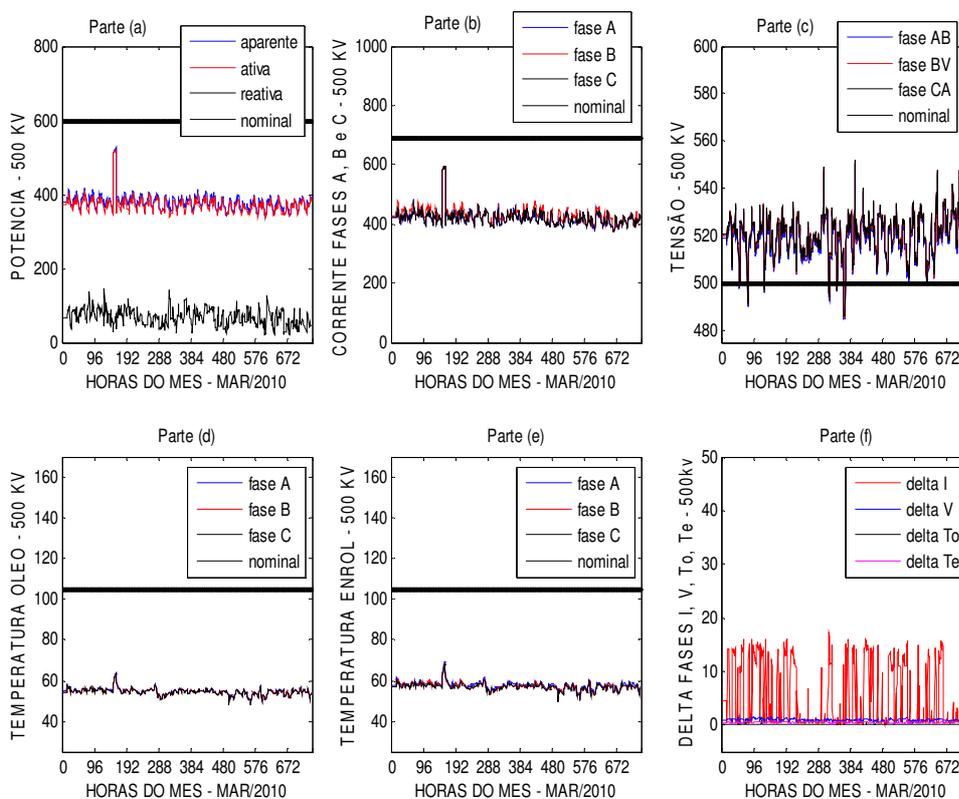
**Tabela 6.9** – *Delta Fases* das medidas trifásicas no LDAT7-01/230 kV em janeiro/2010.

Dias/JAN	Delta I 230	Delta V 230	Delta Te 230	Delta To 230
01	4,65	0,81	0,49	0,08
02	1,41	0,71	0,57	0,08
03	23,68	0,78	0,66	0,10
04	32,22	0,40	0,60	0,09
05	1,10	0,39	0,53	0,08
06	26,68	0,84	0,5	0,11
07	8,62	0,54	0,65	0,10
08	21,94	0,59	0,61	0,09
09	34,12	0,84	0,65	0,09
10	0,09	0,63	0,63	0,08
11	7,07	0,47	0,60	0,08
12	5,12	0,53	0,49	0,09
13	1,43	0,59	0,48	0,09
14	2,67	0,48	0,42	0,09
15	30,77	0,43	0,46	0,08
16	18,9	0,51	0,75	0,11
17	31,83	0,67	0,80	0,11
18	31,27	0,52	0,79	0,10
19	22,08	0,43	0,58	0,10
20	2,07	0,4	0,57	0,08
21	1,53	0,42	0,67	0,08
22	0,90	0,45	0,61	0,08
23	32,13	0,58	0,70	0,10
24	29,26	0,66	0,46	0,08
25	11,68	0,37	0,54	0,10
26	1,52	0,45	0,55	0,08
27	25,83	0,57	0,54	0,08
28	23,47	0,60	0,45	0,10
29	1,41	0,44	0,56	0,07
30	1,78	0,56	0,37	0,10
31	10,73	0,45	0,53	0,08

Nessa análise mensal, observa-se o mesmo comportamento encontrado nas observações do dia 05 e 06 de janeiro (vide subseção anterior: Monitoramento Diário), com medidas abaixo dos limites nominais (temperaturas 55% abaixo da temperatura de *trip*), tensão irregular e delta fases com valores relativamente altos. A exceção a esse comportamento foi encontrada no dia 19, onde os valores de corrente e potência atingiram um pico muito acentuado, chegando perto do limite nominal dessas medidas (corrente da fase B chegou ao valor 1397.21 (A) e a potência a 541.45 MW).

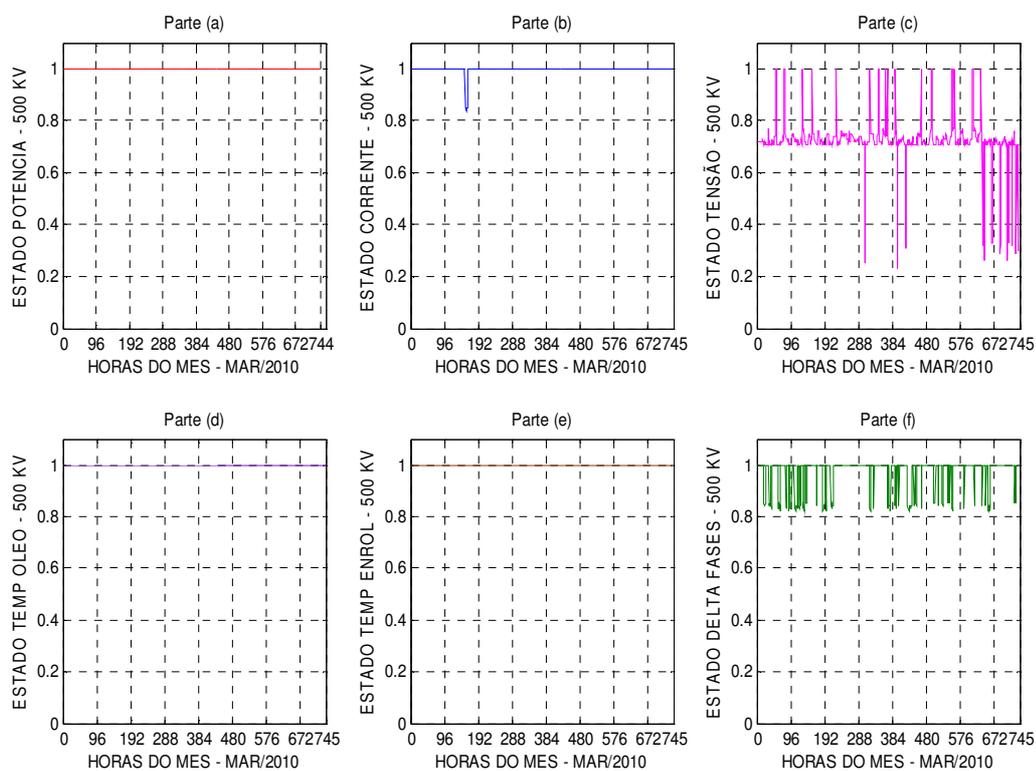
- *Monitorar LDAT7-01/500 kV – Mês de MARÇO/2010 – Precisão de 01 Hora*

A Figura 6.11 apresenta os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do transformador LDAT7-01 durante todo o mês de março de 2010 no lado de 500 kV com precisão horária, resultando em curvas com 744 pontos. Devido à quantidade excessiva de valores, as tabelas com os valores pontuais dessas curvas foram omitidas por economia de espaço.

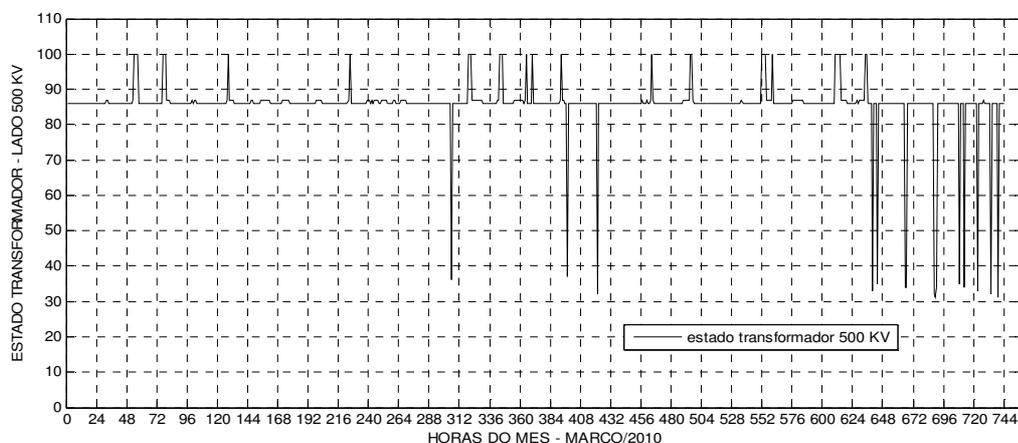


**Figura 6.11** – Medidas monitoradas no LDAT7-01/500 kV em março/2010.

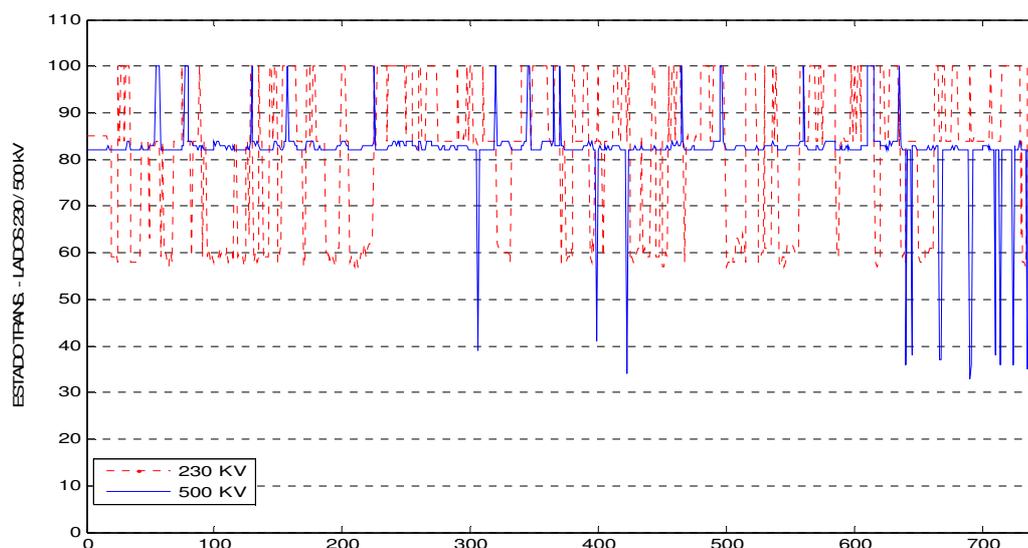
Os gráficos das saídas do bloco fuzzy das medidas são apresentados na Figura 6.12. O resultado operacional do LDAT7-01 no lado de 500 kV durante o mês de março de 2010 é apresentado na Figura 6.13 e em ambos os lados de transformação na Figura 6.14.



**Figura 6.12** – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em março/2010.



**Figura 6.13** – Saída do bloco fuzzy operacional LDAT7-01/500 kV em março/2010



**Figura 6.14** – Saída do bloco fuzzy operacional LDAT7-01/230 kV/500 kV em março/2010.

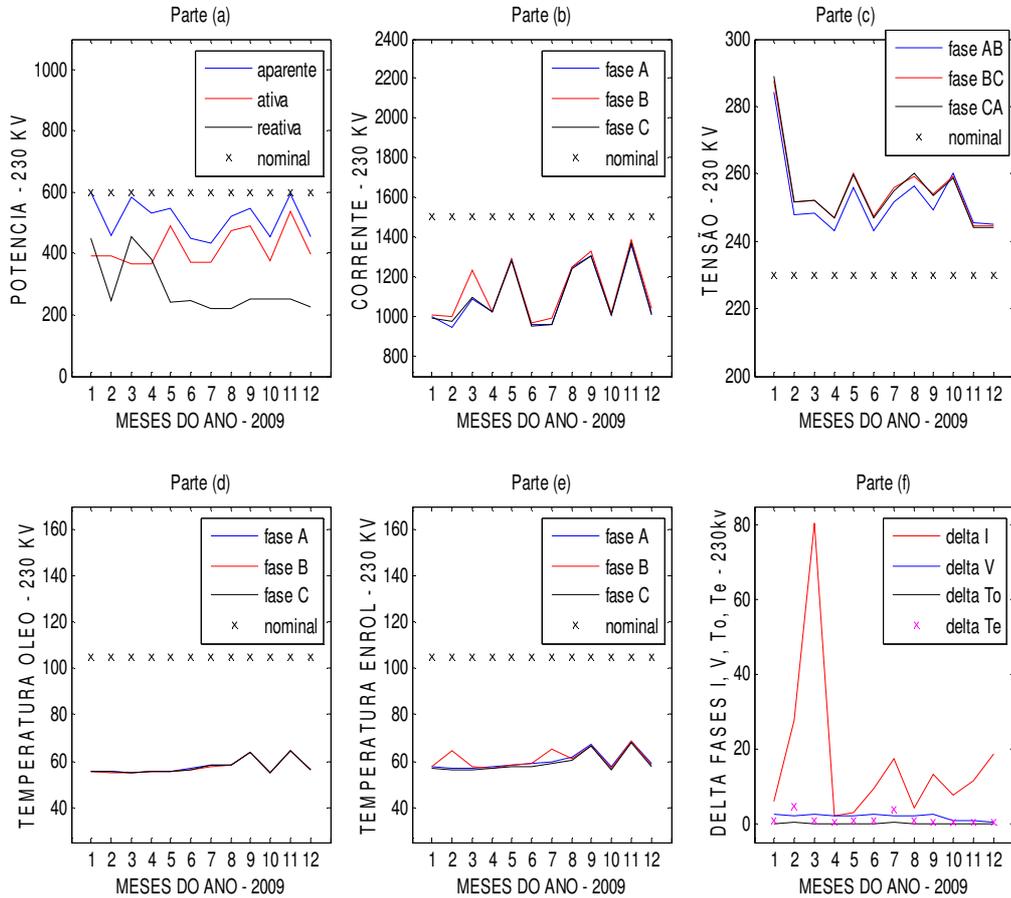
Ao analisar o comportamento operacional do lado 500 kV no mês de março de 2010, observa-se que na maior parte do mês o equipamento operou de forma satisfatória (entre as regiões *estável/ótimo*), com exceções às notas baixas obtidas no meio do mês (três picos negativos – entre 30 e 40 pontos – regiões de *advertência/urgência*), bem como no fim (vários picos negativos) do referido mês – situação relacionada diretamente com as notas baixas que o bloco fuzzy tensão atribuiu ao *estado tensão* no mesmo período.

### 6.2.3 MONITORAMENTO ANUAL

- *Monitorar LDAT7-01/230 kV – Ano de 2009 – Precisão de 01 Mês*

A Figura 6.15 apresenta os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do autotransformador LDAT7-01 durante todo o ano de 2009, onde cada ponto representa o valor máximo em cada mês do ano (curvas com 12 pontos – precisão mensal). Nesses gráficos, pode-se inferir informações importantes, tais como: valores de temperatura acima dos 56°C (até 68,48°C em novembro); valores de potência próximo do nominal do equipamento (572,26 MW em novembro); *delta I* com valor superior a 80 em março; valores de tensão muito acima do nominal, caracterizando estado de sobre-tensão (janeiro de 2009) e picos de corrente rumo ao nominal em quase metade dos pontos.

È exibido, nesta mesma figura ( Figura 6.15), o comportamento de ambos os lados de transformação com fins de comparação de desempenho. O gráfico evidencia um desempenho ruim no lado de 230 kV durante boa parte do mês.



**Figura 6.15** — Medidas monitoradas no LDAT7-01/230 kV em 2009.

As Tabelas 6.10 (corrente, potência, tensão), 6.11 (temperaturas óleo e enrolamentos) e 6.12 (desvios padrões) apresentam os valores máximos dessas medidas obtidos em cada mês de 2009.

**Tabela 6.10** – Correntes, potências, tensões no LDAT7-01/230 kV em 2009.

Meses/2009	I FA 230	I FB 230	I FC 230	P. Ativa 230	P. Reativa 230	VAB 230	VBC 230	VCA 230
JAN/01	999,74	1006,32	994,49	392,67	449,62	284,02	287,73	288,73
FEV/02	946,29	1001,61	975,63	390,45	245,94	248,04	251,55	251,81
MAR/03	1092,76	1233,97	1096,78	366,55	456,43	248,2	252,2	252,21
ABR/04	1022,05	1022,31	1025,52	368,31	382,39	243,22	247,02	247,07
MAI/05	1290,74	1289,55	1285,01	488,77	242,31	256,02	260,07	259,63
JUN/06	957,29	972,49	955,96	373,49	246,00	243,13	247,32	247,03
JUL/07	962,45	992,43	962,79	372,10	222,86	251,68	255,99	254,76
AGO/08	1251,24	1250,69	1243,44	472,38	219,68	256,21	259,14	260,03
SET/098	1306,08	1328,36	1305,49	488,27	252,08	249,5	253,84	253,65
OUT/10	1006,27	1019,40	1005,66	377,85	253,53	260,23	259,4	258,52
NOV/11	1364,81	1385,95	1368,52	537,26	251,42	245,5	244,44	244,06
DEZ/12	1012,87	1041,65	1007,19	396,41	226,56	245,00	244,42	244,12

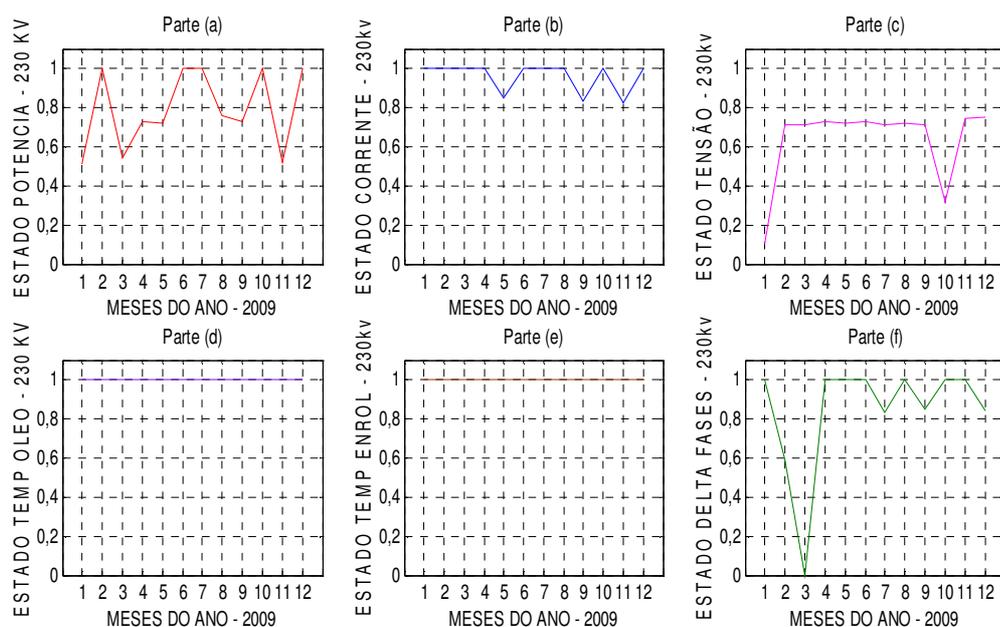
**Tabela 6.11** – Temperaturas nos enrolamentos e óleo no LDAT7-01/230 kV em 2009.

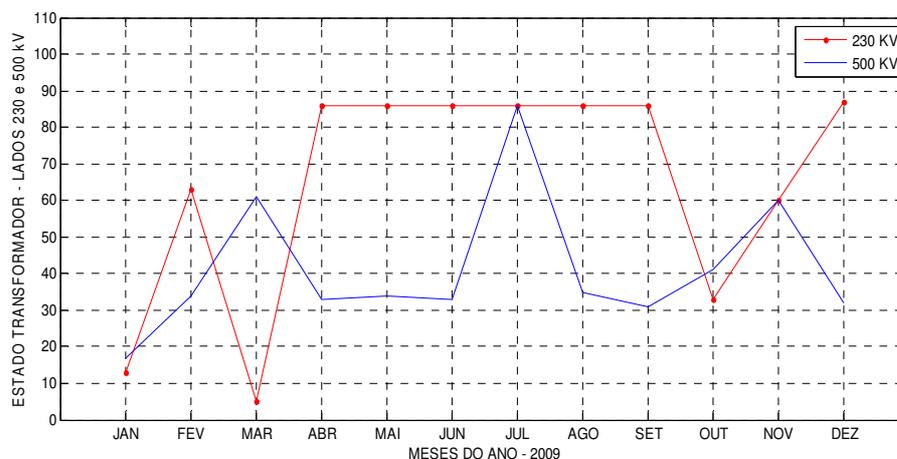
Meses/2009	TE FA 230	TE FB 230	TE FC 230	TO FA	TO FB	TO FV
JAN/01	57,66	57,86	56,77	55,51	55,36	55,33
FEV/02	56,66	64,22	55,96	55,47	54,61	55,32
MAR/03	56,96	57,35	56,27	54,95	54,83	54,79
ABR/04	57,66	57,27	56,68	55,41	55,31	55,25
MAI/05	58,67	58,36	57,58	55,68	55,5	55,5
JUN/06	58,77	59,06	57,88	56,62	56,48	56,45
JUL/07	59,87	65,48	58,96	58,45	57,93	58,27
AGO/08	61,78	61,37	60,18	58,48	58,38	58,34
SET/098	67,49	66,85	66,57	63,77	63,67	63,58
OUT/10	57,48	56,75	56,58	54,95	54,86	54,79
NOV/11	68,59	68,48	67,99	64,81	64,69	64,64
DEZ/12	58,77	58,16	57,88	56,32	56,22	56,15

**Tabela 6.12** — Desvio padrão das medidas trifásicas no LDAT7-01/230 kV em 2009.

Meses/2009	Delta I 230	Delta V 230	Delta Te 230	Delta To 230
JAN/01	5,93	2,48	0,58	0,10
FEV/02	27,68	2,11	4,58	0,46
MAR/03	80,39	2,31	0,55	0,08
ABR/04	1,93	2,21	0,49	0,08
MAI/05	3,02	2,22	0,56	0,10
JUN/06	9,18	2,34	0,61	0,09
JUL/07	17,21	2,22	3,53	0,26
AGO/08	4,35	2,00	0,83	0,07
SET/098	13,04	2,45	0,47	0,10
OUT/10	7,76	0,86	0,48	0,08
NOV/11	11,29	0,75	0,32	0,09
DEZ/12	18,48	0,45	0,46	0,09

Os gráficos das saídas do bloco fuzzy nesse período são apresentados na Figura 6.16. O resultado operacional do LDAT7-01 do lado de 230 kV durante 2009 é apresentado na Figura 6.17 (ambos os lados de transformação: 230 e 500 kV).

**Figura 6.16** — Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em 2009.

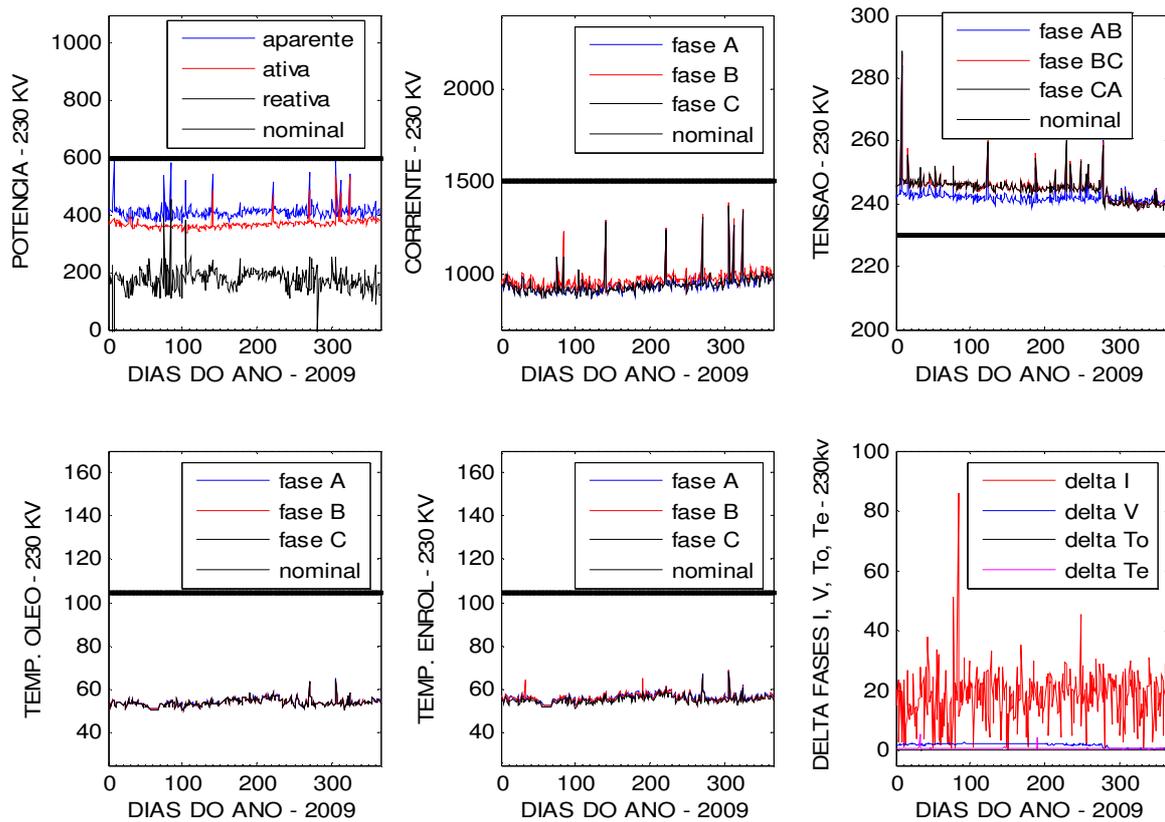


**Figura 6.17** — Saída do bloco fuzzy operacional do LDAT7-01/230kV/500 kV em 2009.

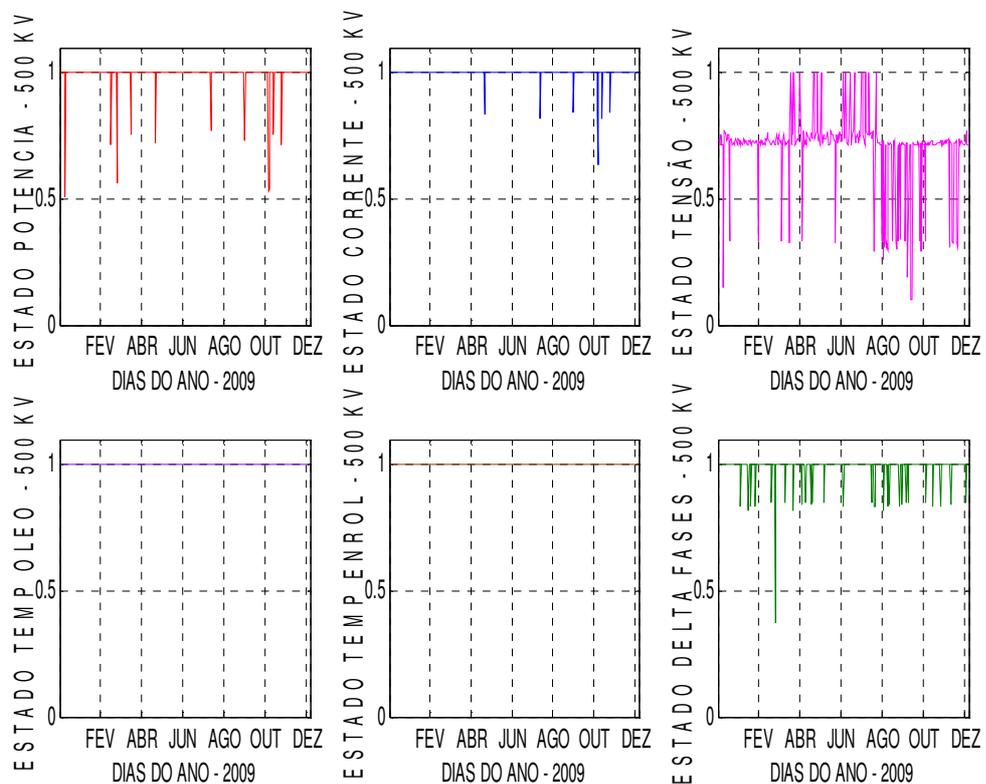
Os piores desempenhos operacionais no lado de 230 kV em 2009 foram encontrados em janeiro, março e outubro. Isso é justificado, uma vez que em janeiro e outubro os valores de tensão alcançaram valores muito altos (em torno de 284 kV em janeiro/2009 e 260 kV em outubro/2009) e como resultado obtiveram notas de qualidade baixas (0.1 e 0.36, respectivamente). Em março, a nota baixa foi obtida devido à nota zero atribuída pelo bloco fuzzy delta fases (valor de 80.39 para o  $\Delta I$ ), uma vez que os valores máximos obtidos nas fases A, B e C foram, respectivamente, 1092.76, 1233.33 e 1096.78).

- *Monitorar LDAT7-01/500 kV – Ano de 2009 – Precisão de 01 Dia*

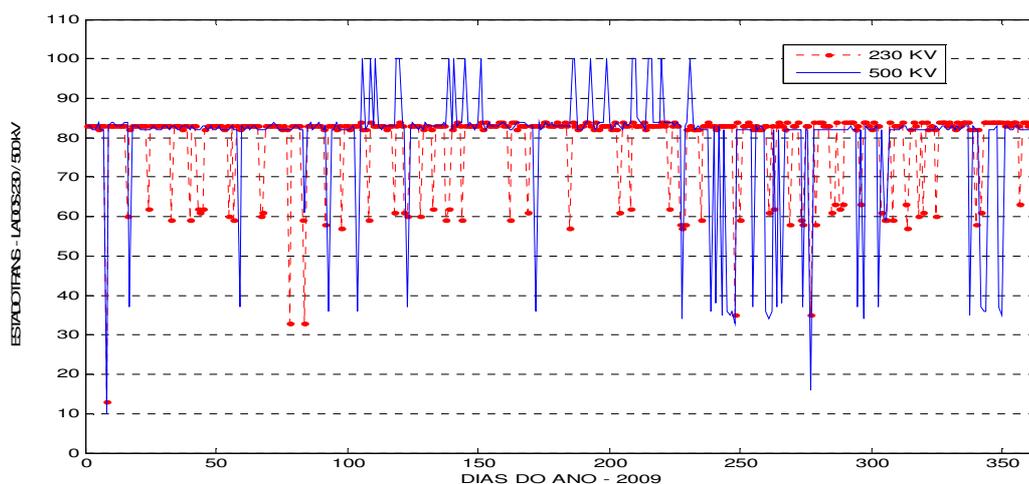
A Figura 6.18 apresenta os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do autotransformador LDAT7-01 no lado de 500 kV durante todo o ano de 2009, com precisão diária. Os gráficos das saídas do bloco fuzzy nesse período são apresentados na Figura 6.19 e o resultado operacional na Figura 6.20.



**Figura 6.18** – Medidas monitoradas no LDAT7-01/500 kV em 2009.



**Figura 6.19** – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/500 kV em 2009.



**Figura 6.20** — Saída do bloco fuzzy operacional LDAT7-01/230 kV/500 kV em 2009.

#### 6.2.4 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Nesta seção, a metodologia proposta para monitoramento *qualitativo* de transformadores de potência é avaliada quanto à sua real capacidade de indicar cenários perigosos para esses equipamentos e a sensibilidade para detectar mudanças suaves e contínuas entre as regiões de operação.

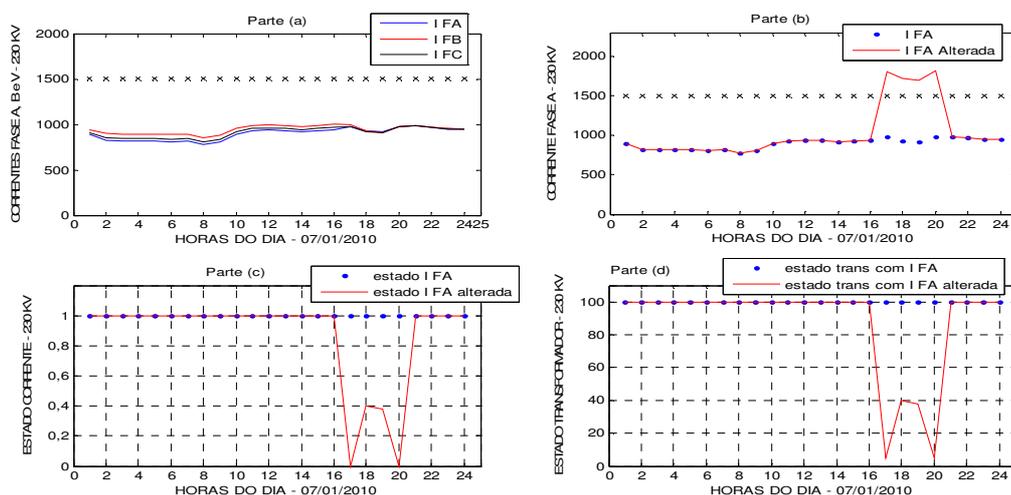
O método proposto para testar a eficácia da metodologia consiste em alterar determinada medida para valores que explorem os seus limites operacionais (nominal) e verificar o reflexo (se existir) no estado qualitativo da medida em questão obtido via seu respectivo bloco fuzzy.

A avaliação é feita com testes de alteração na corrente, tensão, potência, delta fases e temperatura do óleo. Apenas a fase A é alterada nas medidas trifásicas e a nota qualitativa das outras medidas é fixada em 1.0 (nota máxima) para que a influência das outras medidas seja minimizada no cálculo do *estado operacional* do transformador. As alterações a serem realizadas não apresentam relação direta (*a priori*) com fenômenos que possam ocorrer durante a operação do sistema; objetiva apenas verificar a sensibilidade do modelo no monitoramento.

- *Alteração na Corrente*

A Figura 6.21 apresenta na parte (a) as varreduras das fases da corrente no lado de 230 kV no dia 07/01/2010, onde cada ponto reflete o valor máximo a cada hora. Neste teste, aumentou-se o valor da corrente da fase A (I FA) em 85% do valor original entre 16 e 20 horas. Ao aplicar esse aumento (um degrau positivo no sinal) verifica-se que a corrente alterada ultrapassa o valor nominal (1506 A), chegando a mais de 1800 A. Esse aumento é imediatamente refletido no seu estado operacional (parte (c)) que apresenta notas entre 0.0 e 0.4, obtido de regiões *ruim* e *péssima*, respectivamente.

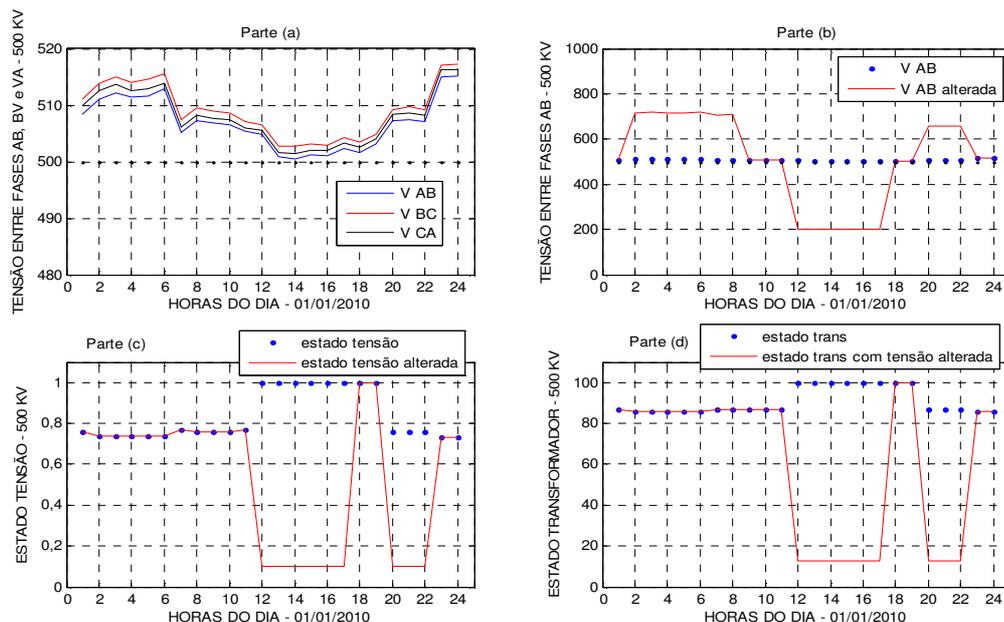
A mudança brusca na corrente faz o transformador operar nos estados de *urgência* e *emergência*, retornando à região ótima depois das 21 horas.



**Figura 6.21** — Avaliação da metodologia proposta de alteração da corrente.

- *Alteração na Tensão*

A Figura 6.22 apresenta na parte (a) as varreduras das fases da tensão entre fases no lado de 500 kV no dia 01/01/2010, onde cada ponto reflete o valor máximo a cada hora. Neste teste, fizeram-se três alterações nos valores da tensão entre fases *AB*. Primeiro, aplicou-se um aumento de 40% entre 02 e 08 horas da manhã (degrau positivo), fazendo com que os valores originais da tensão chegassem a valores acima de 700 kV. Em seguida, diminuiu-se a tensão em 60% entre 12 e 17 horas e, por fim, entre 20 e 23 horas da noite, aplicou um aumento de 30% no valor da tensão.

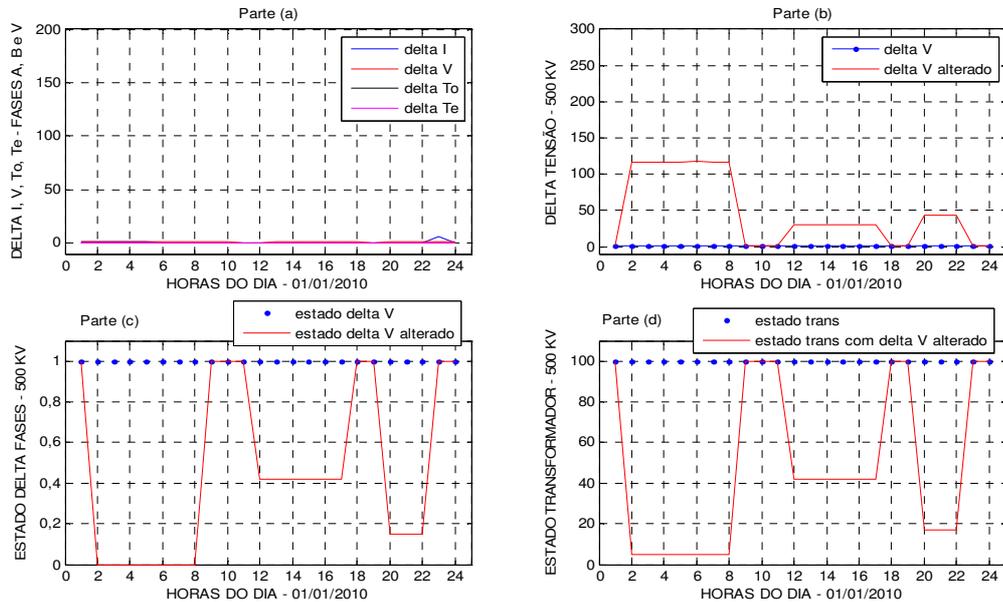


**Figura 6.22** — Avaliação da metodologia proposta de alteração da tensão.

A tensão é uma medida que não pode ser retirada do seu nominal, sob pena de prejuízo do funcionamento de outros equipamentos. Sub-tensões e sobre-tensões levam a medida a regiões operativas *péssimas* e o transformador para a *emergência*. As partes (c) e (d) mostram que nos períodos em que a tensão foi alterada, as notas do *estado tensão* e do *estado operacional* caíram para notas muito baixas levando o equipamento à *emergência*.

- *Alteração do Delta Fases*

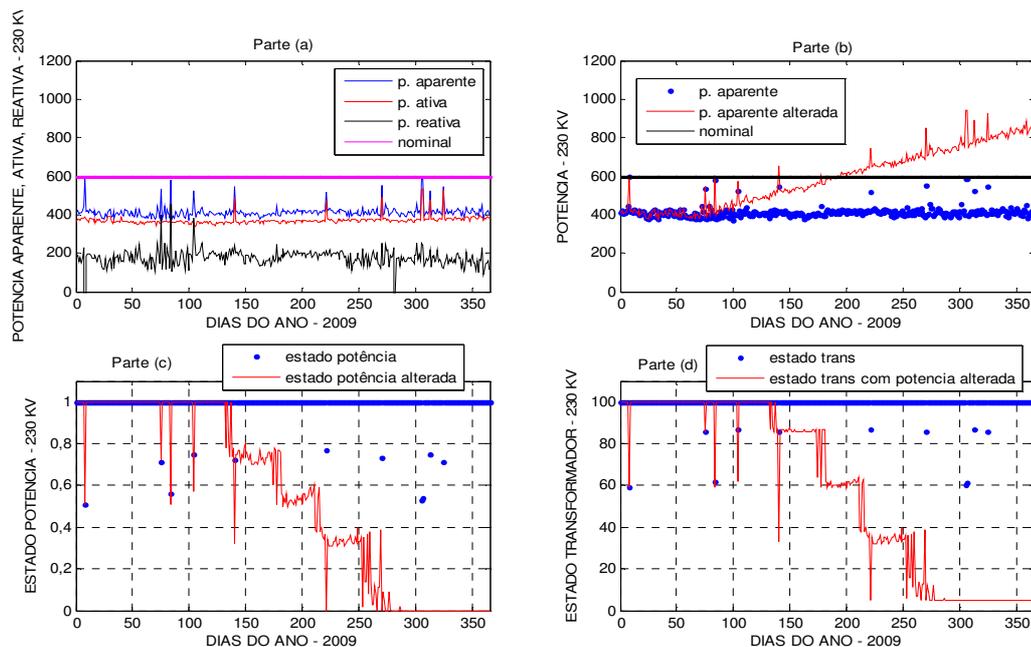
Ao aumentar acentuadamente o valor de uma das fases da tensão *AB*, gera-se um aumento no desvio padrão (*delta V*) e que conseqüentemente impacta no resultado do estado tensão. A Figura 6.23 exhibe o impacto no *delta fases tensão* devido às alterações na tensão feitas no teste anterior. A parte (a) mostra os valores dos delta obtidos das medidas normais e a parte (b) mostra os valores de delta depois que a tensão foi alterada. A parte (c) e (d) mostra que quando houve um aumento elevado nos valores do *delta V* (superior a 100 entre 02 e 08 horas da manhã, por exemplo), o estado *delta fases* foi para 0.0 (menor nota possível) e o estado do transformador foi para *emergência* (nota inferior a 10 pontos).



**Figura 6.23** — Avaliação da metodologia proposta de alteração do *delta fases*.

- *Alteração na Potência Ativa*

Neste teste, obteve-se a varredura da potência do LDAT7-07 de todo o ano de 2009 com precisão diária (valores máximos por dia). Em seguida, aplicou-se um incremento diário de 1.5 MW na potência ativa a partir de 10 de março de 2009 até 31 de dezembro de 2009. Essa alteração linear na potência objetiva simular um aumento linear da demanda (carga). A Figura 6.24 exibe a aplicação deste teste de avaliação.



**Figura 6.24** — Avaliação da metodologia proposta de alteração da potência.

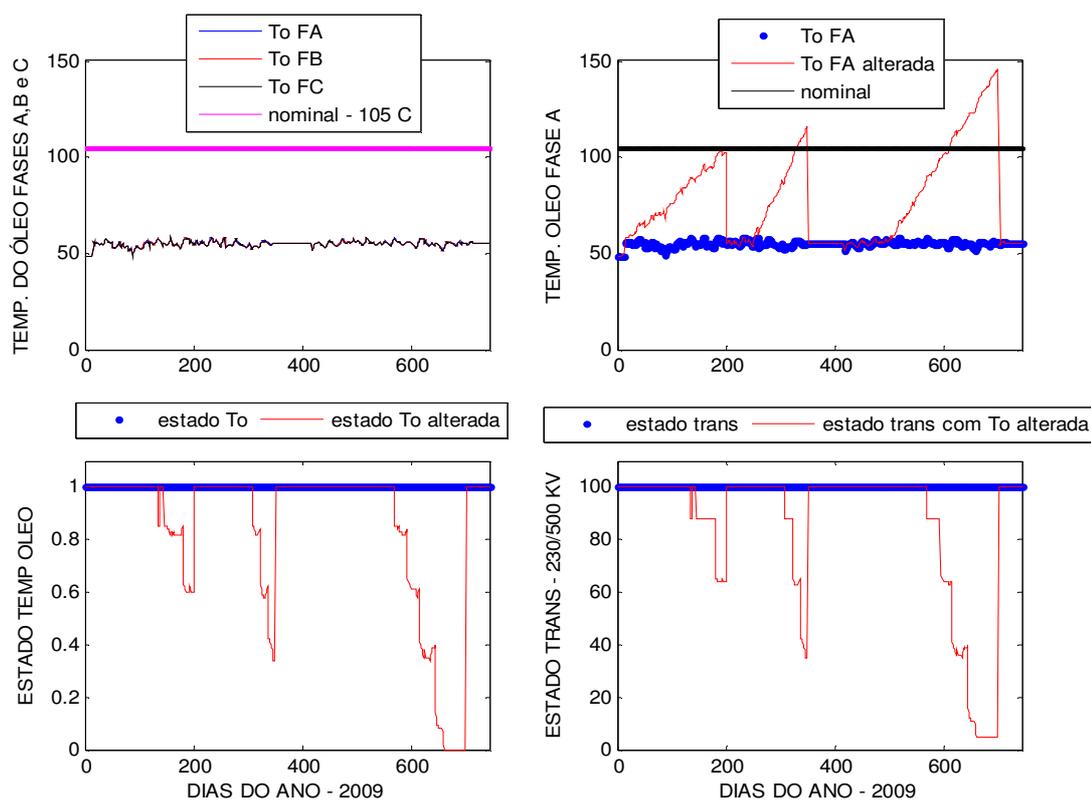
Nota-se que, à medida que a potência ativa cresce linearmente rumo ao valor nominal, a nota da potência tende a cair quase na mesma proporção. Quando a potência encontra o valor nominal no final de maio, o valor da nota já tinha caído de 1.0 para valores em torno de 0.5 (valor de *advertência*). De junho a dezembro, a potência continua crescendo 1.5 MW todos os dias, fazendo com que em meados de outubro a potência chegue a valores superiores a 800 MW, a nota de qualidade chegue a 0.0 e o estado do transformador chegue ao estado de *emergência*.

- *Alteração na Temperatura do Óleo*

Neste teste, obteve-se a varredura da temperatura do óleo do LDAT7-07 de todo o mês de junho de 2010 com precisão horária (valores máximos por hora – total de 720 horas). Aplicou-se um incremento diário de 0.25 °C na temperatura do óleo por um intervalo de 190 horas ininterruptas, começando com a décima hora. Em seguida, aplicou-se um incremento 0.60 °C a cada hora entre as horas 250 e 350 e, por fim, um incremento de 0.45 °C entre as horas 500 e 700. A Figura 6.25 exhibe a aplicação deste teste de avaliação.

Na primeira alteração (entre as horas 10 e 200) observa-se um aumento crescente rumo ao nominal, porém, a temperatura nominal (105 °C) não é ultrapassada. Como resultado, a

nota do *estado temp enrol* fica em torno de 0.6 (entre *estável* e *advertência*). Na segunda aplicação a temperatura ultrapassa o nominal e segue rumo ao valor de trip; a nota de qualidade cai para 0.4 (entre as regiões de *advertência* e *urgência*). Na alteração final a temperatura cresce linearmente até quase 150 °C, a nota de qualidade cai para 0.0 e o transformador fica na *emergência*.



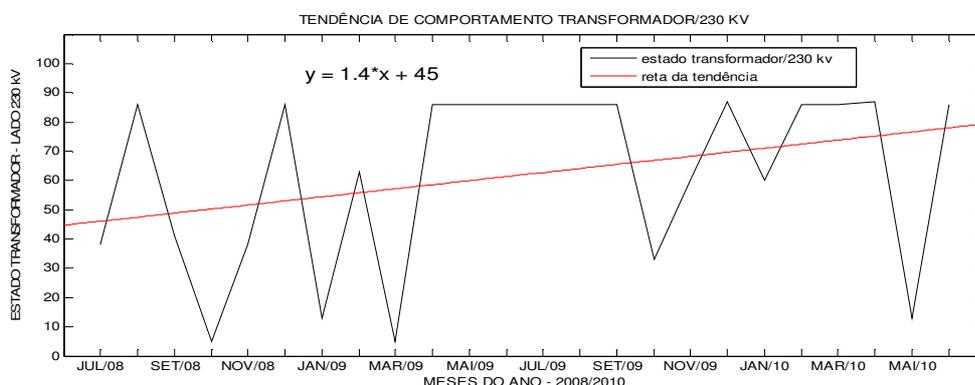
**Figura 6.25** — Avaliação da metodologia proposta de alteração da temperatura do óleo.

Ao analisar todos os resultados dos testes de alteração das medidas monitoradas e as respectivas respostas do modelo, observa-se que a metodologia proposta é sensível tanto às mudanças bruscas quanto às mudanças pequenas e contínuas e que o mesmo consegue mapear corretamente as transições entre estados operacionais.

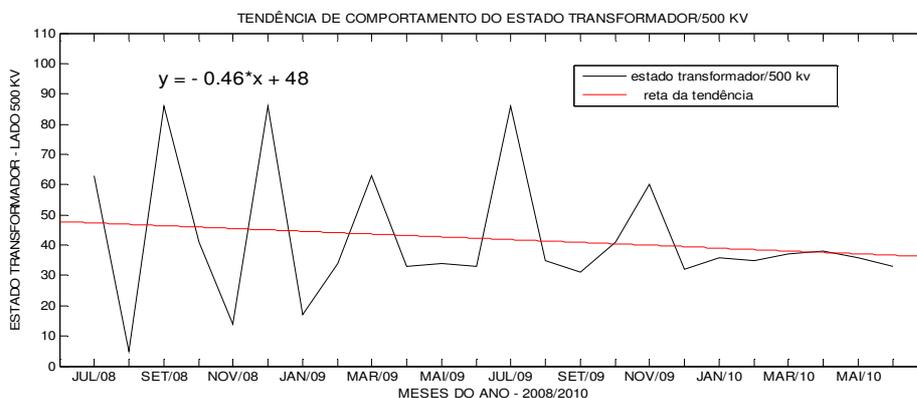
## 6.2.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Para realizar a análise de tendência, obtiveram-se os valores máximos por mês das medidas monitoradas no período de junho de 2008 (início do funcionamento da base histórica da empresa) a junho de 2010. Esses dados formam uma curva de 24 pontos no período de 02 anos consecutivos.

Ao analisar varreduras das medidas do equipamento com horizontes de análise maiores (acima de 01 ano) e com pontos mais representativos (máximos por dia ou mês) é a forma mais adequada para efetuar uma análise da tendência e/ou comportamento operacional do transformador de potência com a metodologia proposta. As Figuras 6.26 e 6.27 apresentam os gráficos com as varreduras resultantes do bloco fuzzy operacional dos lados de 230 e 500 kV, respectivamente. Em ambos os gráficos também são exibidos os gráficos da reta de tendência obtida via regressão linear e suas respectivas equações da reta. As características principais das retas de tendência estão resumidas na Tabela 6.13.



**Figura 6.26** — Tendência do estado operacional do LDAT7-01/230 kV (2008/2010).



**Figura 6.27** — Tendência do estado operacional do LDAT7-01/500 kV (2008/2010).

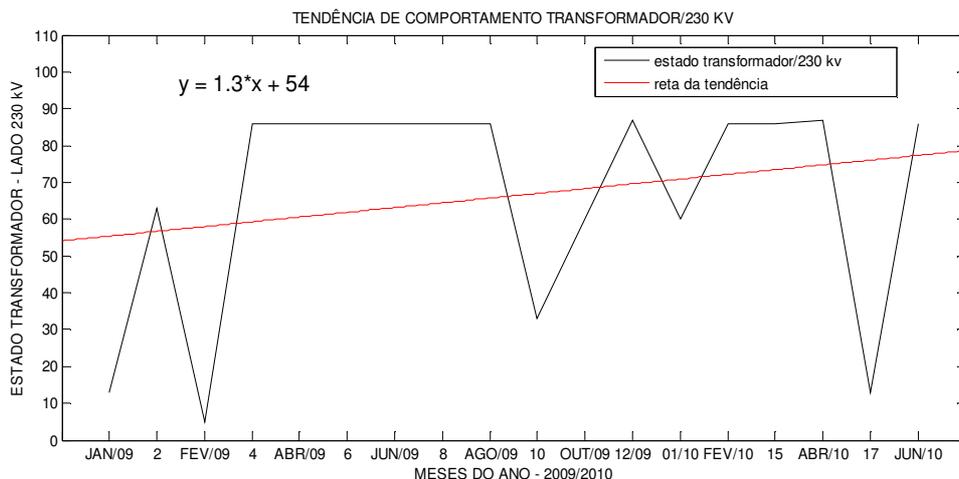
**Tabela 6.13** — Análise de tendência do estado operacional do LDAT7-01 (2008/2010).

LADO	Coefficiente Angular	Ângulo formado com o eixo X	Coefficiente de Variação	Tendência	Adjetivo da Tendência	Conclusão da Análise de Tendência
230 kV	1.386	54.18	0.49	Crescente	Muito	Muito Crescente
500 kV	-0.462	-24.80	0.51	Decrescente	-	Pouco Decrescente

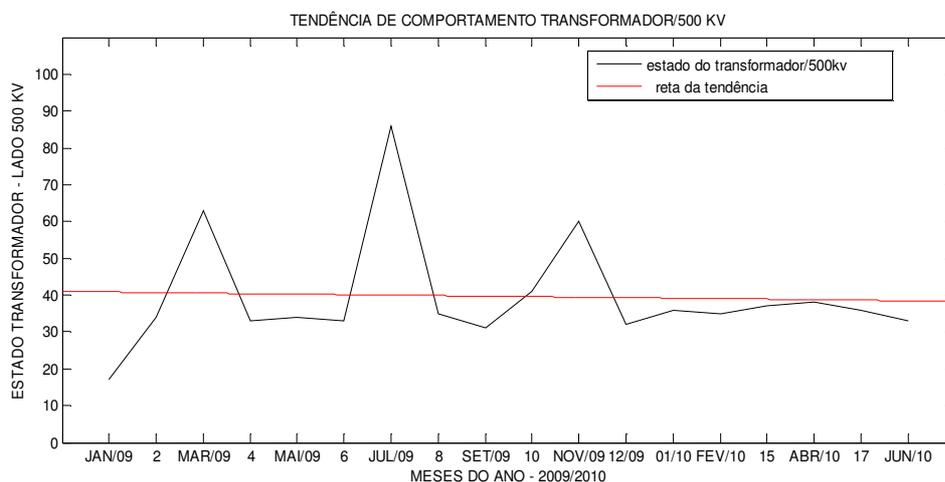
Observa-se que o lado de 230 kV do LDAT7-01 apresentou uma tendência de comportamento operativo positivo ou pelo menos de recuperação ao longo dos dois últimos anos. A tendência resultante foi influenciada pelas péssimas notas obtidas em outubro de 2008 e março de 2009 (quase na metade da análise) e por notas melhores obtidas na metade seguinte (abril de 2009 a junho de 2010, com exceção à nota baixa obtida em maio de 2010). A caracterização como *muito crescente* foi feita de acordo com o valor de 54.18°; a explicação para esse valor que é as piores notas foram encontradas na primeira metade da análise enquanto que a maior parte das melhores notas está na segunda metade, causando um contexto de *antes e depois*. Mesmo a nota ruim obtida via os valores máximos das medidas em maio de 2010 não foi suficiente para diminuir a tendência de crescimento. Outra conclusão poderia ser obtida pela alteração dos parâmetros de classificação de tendências proposto nesta metodologia ou pela mudança na janela de observação.

Um resultado diferente foi obtido no lado de 500 kV, onde a tendência foi caracterizada como *pouco decrescente*. Nos últimos 06 meses (primeiro semestre de 2010), o lado de 500 kV recebe notas baixas (em torno de 40) enquanto que no primeiro quarto da janela de observação obteve notas próximas de 90. Tal cenário sugere que no passado o transformador funcionou de maneira melhor do que atualmente. O adjetivo *pouco* foi determinado porque houve picos de notas negativas no início da análise (agosto/2008, novembro/2008, janeiro/2009), porém em menor número dos picos positivos (setembro/2008, dezembro/2008, março/2009, julho/2009, novembro/2009).

A seguir, nas Figuras 6.28 e 6.29, são apresentados os gráficos com as varreduras resultantes do bloco fuzzy operacional nos lados de 230 e 500 kV, respectivamente, com uma janela de observação menor (18 meses) do que a observação anterior (24 meses). As características principais das *retas de tendência* estão resumidas na Tabela 6.14.



**Figura 6.28** — Tendência do estado operacional do LDAT7-01/230 kV (2009/2010).



**Figura 6.29** — Tendência do estado operacional do LDAT7-01/500 kV (2009/2010).

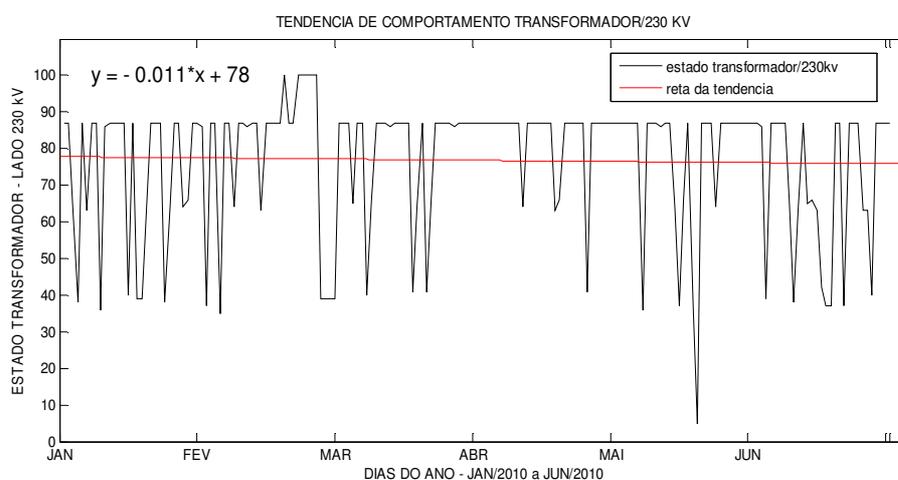
**Tabela 6.14** — Análise de tendência do estado operacional LDAT7-01 (2009/2010).

LADO	Coefficiente Angular	Ângulo formado com o eixo X	Coefficiente de Variação	Tendência	Adjetivo da Tendência	Conclusão da Análise de Tendência
230 kV	1.289	52.195	0.44	Crescente	–	Crescente
500 kV	-0.1383	-7.8733	0.3883	Decrescente	–	Constante com Pouca Irregularidade

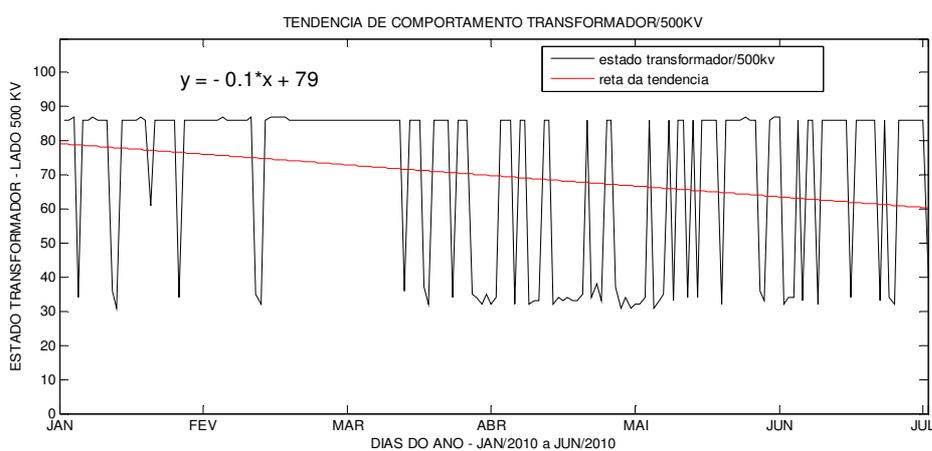
No lado de 230 kV, a tendência foi caracterizada como *crescente*. A diminuição da janela de observação retirou os picos de notas negativas encontradas no segundo semestre de 2008 reduzindo o efeito *antes* (ruim) e *depois* (bom), porém não suficiente para caracterizar a tendência negativa ao comparar o início da observação com o final.

No lado de 500 kV, o resultado foi *tendência constante com pouca irregularidade*, isso porque o ângulo  $\Theta$  formado com o eixo  $x$  ( $7^\circ$  negativos) foi menor do que  $10^\circ$  (ângulo limite entre constância e decrescimento). O adjetivo *pouca* resulta do valor do coeficiente de variação (0.44) que está entre 0.35 e 0.65.

As Figuras 6.30 e 6.31 apresentam os gráficos com as varreduras resultantes do bloco fuzzy operacional dos lados de 230 e 500 kV, respectivamente, com uma janela de observação do primeiro semestre de 2010 com precisão de 01 dia. As características principais das *retas de tendência* estão resumidas na Tabela 6.15.



**Figura 6.30** — Tendência do estado operacional do LDAT7-01/230 kV no 1º Semestre de 2010.



**Figura 6.31** — Tendência do estado operacional do LDAT7-01/500 kV no 1º Semestre de 2010.

**Tabela 6.15** — Análise de tendências do estado operacional LDAT7-01 no 1º Semestre de 2010.

LADO	Coeficiente Angular	Ângulo formado com o eixo X	Coeficiente de Variação	Tendência	Adjetivo da Tendência	Conclusão da Análise de Tendência
230 kV	-0.01027	-0.6143	0.2438	Constante	-	Constante
500 kV	0.1042	-5.95	0.3490	Constante	-	Constante com Pouca Irregularidade

## 6.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios em todos os casos de testes realizados na seção anterior, uma vez que foi capaz de mapear dados brutos em informações de desempenho operativo, além de caracterizar de forma adequada a tendência principal de comportamento operacional. Entretanto, a mesma possui algumas limitações que podem reduzir a sua eficácia quanto ao objetivo principal de monitorar transformadores de potência qualitativamente em cenários reais. A seguir, essas limitações são apresentadas e alternativas às mesmas são propostas.

### 6.3.1 NÚMERO DE MEDIDAS

A metodologia apresentada trabalha com apenas cinco medidas analógicas e uma calculada. Definitivamente este é um número pequeno de medidas para realizar o mapeamento em estados operacionais adequadamente.

Existem outras variáveis que podem ser utilizadas tais como a frequência, número de comutações de TAP, níveis de gases no óleo, nível de umidade, temperatura ambiente, fator de potência, medidas calculadas que envolvam o tempo, entre outras. Como uma boa parte dos equipamentos nas instalações está chegando ao fim de sua vida útil, nem todos possuem supervisão instalada de todas essas variáveis, o que foi um dos motivos por não serem utilizadas nesse trabalho (não queríamos utilizar dados gerados aleatoriamente).

Em todo caso, a proposta pode ser estendida com a adição de novas medidas para modelagens operacionais, seguindo os seguintes passos:

- 1) Criar um bloco fuzzy específico para medida a ser monitorada que retorne uma nota qualitativa entre 0.0 e 1.0;
  - a) Definir as entradas fuzzy do bloco;
  - b) Definir as saídas fuzzy do bloco;
  - c) Definir a base de conhecimento do bloco com as regras operacionais;
  - d) Definir os parâmetros fuzzy.
- 2) A saída do bloco fuzzy da medida deve ser uma das entradas do bloco fuzzy operacional e deve ser definidas regras que efetuem o mapeamento do impacto dos valores da medida em regiões operacionais.

### 6.3.2 DIAGNÓSTICO DE FALHAS

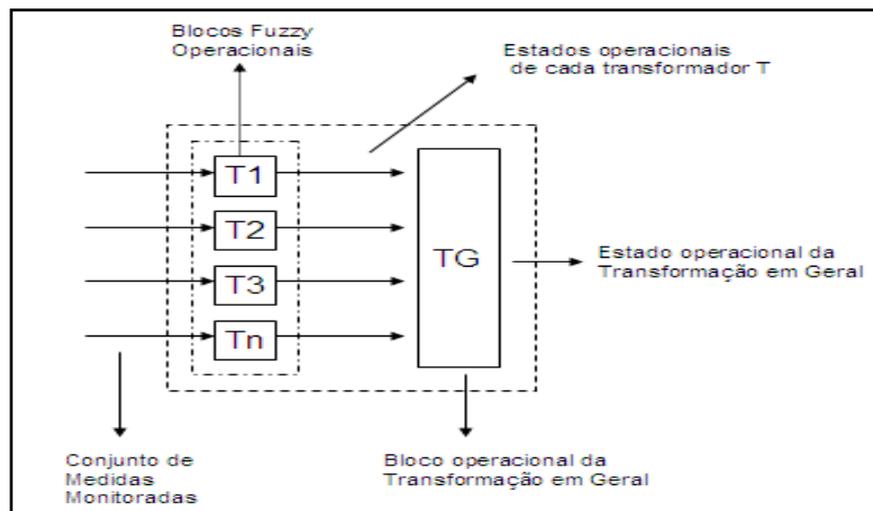
A metodologia não trabalha com o monitoramento de faltas incipientes. Seria necessário acoplar blocos de diagnósticos de variadas categorias de faltas (vide Capítulo 04) capaz de detectar vários níveis de faltas incipientes e mapeá-las em estados operacionais. Trabalhos futuros podem trabalhar nesse tipo de extensão com a metodologia proposta.

## 6.4 GENERALIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A metodologia apresentada pode ser generalizada para grupos de transformadores, para outras funções elétricas e para toda uma instalação elétrica. A seguir, será apresentada uma proposta de generalização.

### 6.4.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA $N$ TRANSFORMADORES

Na seção 6.2 foram apresentados estudos de casos com dados reais de medidas de um transformador (LDAT7-01). O diagrama unifilar mostrado na Figura 6.1 mostra que ele funciona em conjunto com dois outros transformadores (LDAT7-02 e LDAT7-03). Pode ser interessante obter uma nota que reflita o estado operacional do conjunto de transformadores, além dos desempenhos individuais. A Figura 6.32 mostra como seria a generalização para um conjunto de transformadores em uma subestação.



**Figura 6.32** — Generalização da metodologia para monitoramento de  $N$  transformadores.

Na Figura acima, cada retângulo representa um bloco fuzzy operacional completo (já englobando os blocos fuzzy das medidas) que efetua o mapeamento das medidas monitoradas em uma nota qualitativa entre 0.0 e 100 refletindo o *estado operacional* (ou status).  $T1$  representa o transformador 01 da subestação,  $T2$  o segundo transformador e  $Tn$  o  $n$ ésimo transformador em funcionamento (a ordem de numeração pode ser definida de forma aleatória ou baseada em outros critérios, tais como tempo de operação ou importância operativa).

As saídas de cada um dos blocos fuzzy podem ser enviadas *em conjunto* para outro bloco  $TG$  (bloco operacional da transformação em geral) que de acordo com o desempenho dos equipamentos no período de análise em questão (on-line, diário, semanal, mensal, semestral, anual), gera uma nota geral de desempenho da *função de transformação* na instalação em questão.

Esse bloco  $TG$  pode ser outro bloco fuzzy como os definidos no Capítulo 05, bem como pode ser definido em termos analíticos. A Equação (6.1) apresenta uma proposta não-fuzzy para realizar o cálculo dentro do bloco  $TG$ .

$$T_G = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_n T_n \quad (6.1)$$

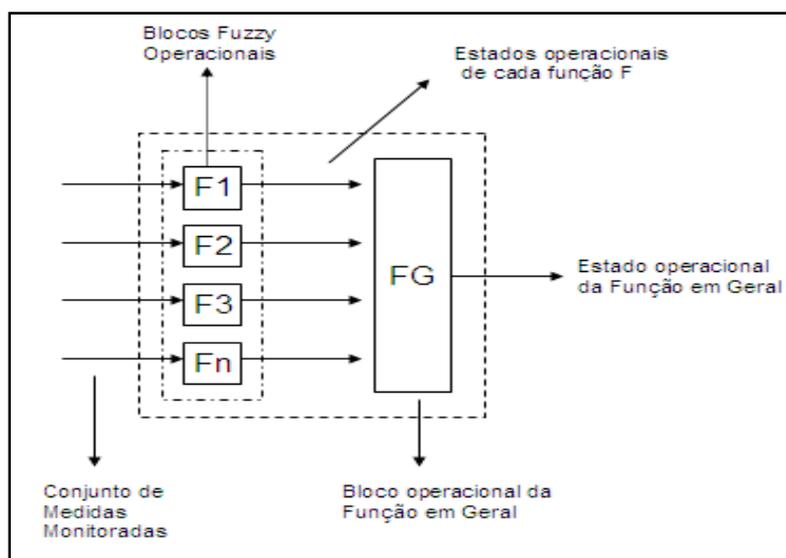
onde  $n$  é o número de transformadores na subestação (ou pelo menos os transformados requisitados para modelagem operacional);  $T_n$  é o  $n$ ésimo equipamento modelado;  $\alpha_n$  é um valor peso entre 0.0 e 1.0 que vai refletir a importância operativa de cada equipamento;  $TG$  será um número entre 0.0 e 100 e irá refletir o desempenho da transformação em geral.

A Equação (6.1) trata a qualidade da transformação em geral como uma combinação linear dos desempenhos operacionais dos seus equipamentos individuais. Lembrar que a Equação (6.2) deve ser obedecida para que o resultado da (6.1) seja válido.

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n} = 1 \quad (6.2)$$

#### 6.4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA OUTRAS FUNÇÕES ELÉTRICAS

Existem outras funções elétricas importantes nas subestações e que atualmente têm impactado nas concessionárias quanto à aplicação de multas da parcela variável (PV) decorrentes de indisponibilidades (vide seção 2.2). As medidas monitoradas no bloco fuzzy operacional (correntes, tensões, potência, temperaturas) também são comuns a outros tipos de equipamentos (reatores barras de energia, compensadores [síncronos/estáticos], linhas de transmissão). Dessa forma, o funcionamento desses equipamentos pode ser modelado da mesma forma que transformadores (descrito no Capítulo 05) e equipamentos pertencentes à mesma família podem ser monitorados em conjunto, como descrito na subseção anterior. A Figura 6.33 mostra como seria a generalização para uma função elétrica qualquer.

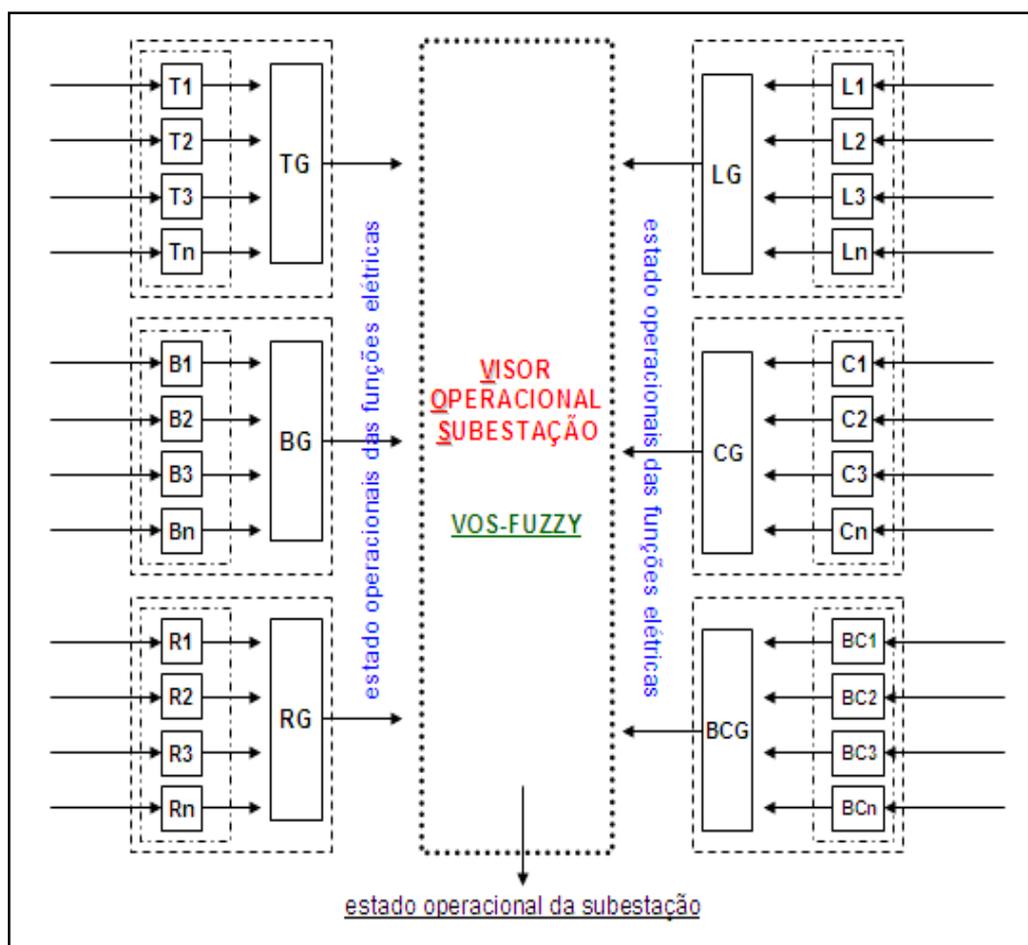


**Figura 6.33** — Generalização da metodologia proposta para monitoramento qualitativo de funções elétricas.

onde  $F$  pode ser qualquer função elétrica, tais como reatores, barras de energia, compensadores (síncronos, estáticos), linhas de transmissão, entre outros equipamentos.

### 6.4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA $N$ FUNÇÕES ELÉTRICAS

Ao generalizar o monitoramento fuzzy operacional de todas as funções elétricas, pode-se obter notas qualitativas entre 0.0 e 100 em qualquer período de análise para toda a subestação, refletindo o desempenho operacional da instalação e acompanha-se o comportamento e evolução da operação ao longo do tempo. A Figura 6.34 mostra como seria essa generalização para uma instalação.



**Figura 6.34** — Generalização da metodologia proposta para monitoramento qualitativo de uma subestação de energia completa.

onde  $T$ ,  $B$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $BC$  são os exemplos de funções elétricas a serem modeladas, a saber: os transformadores, barras de energia, reatores, linhas de transmissão, compensadores e banco de capacitores, respectivamente.

A Equação 6.1 apresenta uma proposta não fuzzy para cálculo do estado operacional de uma subestação dentro do bloco *VOS-FUZZY* (Visor Operacional Fuzzy da Subestação).

$$VOS = \alpha_1 T_G + \alpha_2 B_G + \alpha_3 R_G + \alpha_4 L_G + \alpha_5 C_G + \alpha_6 BC_G \quad (6.3)$$

onde *VOS* será um número entre 0.0 e 100 e irá refletir o desempenho operacional da instalação em geral.

A Equação 6.3 trata a qualidade da *operação em geral* na instalação como uma combinação linear dos desempenhos operacionais de suas funções elétricas principais. Vale lembrar que a soma dos pesos em (6.3) dividida pelo número de funções modeladas deve ser exatamente igual a 1.0 (vide Equação 6.2).

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para subsidiar o monitoramento qualitativo de transformadores de potência em sistemas de energia de qualquer porte.

A mesma está baseada no desenvolvimento de sistemas de inferência fuzzy do tipo Mandani que recebem valores das medidas monitoradas em campo, tais como corrente, tensão, temperatura do óleo, temperatura dos enrolamentos, sincronismos das fases e retornam notas qualitativas entre 0.0 e 1.0. Essas mesmas notas tornam-se entradas para outro sistema de inferência fuzzy, denominado de *bloco fuzzy operacional*, que mapeia essas entradas para uma das cinco regiões operacionais definidas, a saber: *emergência*, *urgência*, *advertência*, *estável* e *estado ótimo*.

Propõem-se também uma ferramenta capaz de inferir tendência de comportamento das saídas dos blocos fuzzy (principalmente a saída do bloco fuzzy operacional), através de ferramentas estatísticas tais como a regressão linear, desvio padrão, coeficiente de variabilidade e classificações quanto à intensidade de crescimento. Dessa forma, tenta-se fornecer aos especialistas uma descrição de quais regiões operativas o transformador tem trabalhado e qual a tendência de evolução desse comportamento no período de análise em questão.

A metodologia foi testada com dados referentes às varreduras das variáveis elétricas monitoradas de um autotransformador atualmente em funcionamento de uma grande empresa geradora e transmissora de energia. Foram realizados inúmeros testes de monitoramento nos lados de 230 kV e 500 kV, com variados períodos de testes – diário, mensal, anual e com variadas precisões nas varreduras das curvas das medidas – 01 hora, 01 dia, 01 mês.

O objetivo principal do trabalho foi atingido com a constatação de que a metodologia proposta para implementar o monitoramento qualitativo de transformadores foi capaz de efetuar corretamente o mapeamento dos valores das medidas supervisionadas em *estados operativos* esperados e de caracterizar adequadamente a *tendência operativa* em qualquer período de análise. Além disso, a metodologia proposta pode ser estendida para várias unidades transformadoras, para qualquer outra função elétrica e até para uma rede completa de interesse, permitindo subsidiar a operação e dar indicativos de necessidades de reforços futuros no sistema.

Em resumo, algumas das contribuições deixadas por este trabalho são:

- Uma proposta para monitoramento *qualitativo* de transformadores de potência em sistemas de potência;
- Uma proposta para monitoramento *qualitativo* de qualquer função elétrica de interesse e de qualquer porte;
- Uma proposta de monitoramento *qualitativo* para toda uma instalação/subestação;
- Uma proposta para análise de tendências operativas em períodos de médio e longo prazo – um segmento pouco lembrado durante o planejamento e ampliação de subestações de energia.

Como horizontes para futuros trabalhos propõem-se:

- Busca de perfis de sazonalidade nas saídas do bloco fuzzy operacional e dos blocos fuzzy das medidas;
- Acrescentar técnicas inteligentes para previsão de valores futuros baseados nos dados históricos;
- Acrescentar módulos de diagnósticos de falhas para mapear faltas incipientes em estados operativos adequados às mesmas;
- Generalizar a metodologia proposta para uma subestação completa e avaliá-lo com uma base de dados histórica;
- Desenvolver um sistema de monitoramento qualitativo de subestações baseada na metodologia proposta e generalizada.

Faz-se necessário, por fim, ressaltar a necessidade de uma maior integração entre os centros de pesquisa e os centros de operação das empresas de energia. Não obstante já não serem poucos os projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), é necessário ainda um maior direcionamento a temas importantes do processo, como monitoramento qualitativo, diagnóstico de falhas, dentre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIMA, Sanderson; REIS, Laurinda Lucia N. ; OLIVEIRA, Juliana Carvalho ; COELHO, L. S. ; ALMEIDA, Otacilio da Mota . Redes neurais aplicadas ao diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência imersos em óleos. In: VII Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 2005, Natal, RN. vol. 1. pp. 1-6.
- [2] ANELL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Disponível em [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 01 de julho de 2010.
- [3] ONS – Operador Nacional do Sistema, Disponível em <http://www.ons.org.br>. Acesso em: 01 de julho de 2010.
- [4] ANEEL, "Resolução Normativa 166/2000", Fev. 2000, pp. 1-16, Disponível em [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 05 de julho de 2010.
- [5] ELETROBRAS ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, Disponível em <http://www.eln.gov.br>. Acesso em: 05 de julho 2010.
- [6] Projeto NBR 7274 (1999). Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço, Projeto de Revisão da NBR 7274/ 1982.
- [7] SERGI-Société Générale d'Etudes et de Réalisations Industrielles (2008). Transformer Protector. V Workspot on Power Transformer, 15-18 abril, Belém-PA.
- [8] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, <http://www.cepel.br/>, Disponível em 10/07/2010. Acesso em: 10 de julho de 2010.
- [9] SAGE – Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia, Disponível em <http://www.sage.cepel.br/>. Acesso em: 10 de julho de 2010.
- [10] ABNT - Transformadores de Potência. NBR, 5356/93.
- [11] ZADEH, L. A.; Fuzzy Sets; Information and control, v.8, p. 338-353, 1965.
- [12] ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Trans. On Systems Man & Cybernetics, v.3, p. 28-44, 1973.

- [13] MAMDANI, E. H.; ASSILLAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, v.7, p. 1-13, 1975.
- [14] SUGENO, M.; KANG, G. T. Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 18, p. 329-346, 1986.
- [15] GOMIDE, F., *et al.* Conceitos Fundamentais da Teoria dos Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. Proc. IFSA CONGRESS, 6. TUTORIALS, p. 1-38, São Paulo, Brasil, 1995.
- [16] REZENDE, S. O., *et al.* Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações. Editora Manole, 2003.
- [17] AGUIAR, H., JUNIOR O; *et al.* Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab, Editora Thompson, 2007.
- [18] SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. Controle e Modelagem Fuzzy. Editora Edgard Blucher Ltda, 1999.
- [19] ROSNER M., WEENEN J. HAO X., Benefit of Comprehensive and Interactive on-line Monitoring and Expert Systems for Power Transformers. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.
- [20] ZIRBES, R.; (2003). Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamento de Papel Impregnado com Óleo Mineral. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [21] OOMMEN, T. V.; (1991) On line moisture sensing in transformer. Electrical Electronics Insulation Conference., Boston, Outubro.
- [22] GUPTA, B. K. (1998). Direct Determination of Moisture in Solid Oil-Paper Insulation. presented at IEEE Intern. Sympos. Electr. Insulat., Arlington, Virginia, USA, pp. 583-586.
- [23] NEIMANIS, R.; LENNHOLM, L.; ERIKSSON, R. (1999). Determination of Moisture Content in Impregnated Paper Using Near Infrared Spectroscopy. IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, pp. 162-165.

- [24] FARGON Engenharia e Industria LTDA. Disponível em: <http://www.fargon.com.br/info3.htm>. Acesso em: 5 janeiro de 2008.
- [25] EMSLEY, A. M. E STEVENS, G. C. (1994). Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers. IEE Proc. Sci. Measur. Techn.. Vol. 141, pp. 324-334.
- [26] IEEE Std C57.104-1991 (1991). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [27] HAUPERT, T. J. and JAKOB, F. (1988). Review of the Operating Principles and Practice of Dissolved Gas Analysis. Philadelphia: ASTM.
- [28] MORAIS, D. R.; (2004), Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.
- [29] ZIRBES, R., ROLIM, J. G., ZÄURN, H. H.; (2005) Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamento de Papel Impregnado com Óleo Mineral. Revista Controle e Automação., Vol.16, no 3, 2005, Julho, Agosto e Setembro.
- [30] IEC Publication 605 (1999). Mineral oil-impregnated electrical equipment in service Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis, March 1999.
- [31] DUVAL, M. e DE PABLO, A. (2001). Interpretation of Gas-In-Oil Analysis using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, No. 2, pp. 31-41.
- [32] DUVAL, M. (1989). Dissolved Gas Analysis: It can save your transformer, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 5, No. 6, pp. 22-27
- [33] LAPWORTH, J. (2002). A Novel Approach Scoring System for Integrating Dissolved Gas Analysis Results into a Life Management System, IEEE Intern. Symp. Electr. Insul., pp. 137-144.
- [34] MILASCHI, M; (1984). Manutenção De Transformadores em Líquido Isolante. Editora Edgard Blucher LTDA.

- [35] MORAIS, R. M. e ENGELSTEIN, E. (1990). Thermal Ageing of Oil-paper Insulation, IEEE 10th Intern. Conf. Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, ICDL, pp. 495-499.
- [36] PAHLAVANPOUR, B.; MARTINS, M. A.; DE PABLO, A. (2002). Experimental Investigation into the Thermal-ageing of Kraft Paper and Mineral Insulating Oil, IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul., Boston, MA, USA, pp. 341-345.
- [37] HILL, D. J. T. ; LE, T. T.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K. (1996). A Study of Degradation in a Power Transformer-Part 3: Degradation Products of Cellulose Paper Insulation, Polymer Degradation and Stability, Vol. 51, pp. 211-218.
- [38] HILL, D. J. T.; LE, T. T.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K. (1995). A Study of Degradation of Cellulosic Insulation Materials in a Power Transformer Part 1: Molecular Weight Study of Cellulose Insulation Paper, Polymer Degradation and Stability, Vol. 48, pp. 79-87.
- [39] ALI, M.; ELEY, C.; EMSLEY, A. M.; HEYWOOD, R.; XIAO, X. (1996). Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers. IEEE Electr. Insul. Mag.. Vol. 12, No. 3, pp. 28-34.
- [40] SHROFF, D. H. e STANNETT, A. W. (1985). A Review of Paper Ageing in Power Transformers, IEE Proc., part C, Vol. Vol. 132, pp. 312-319.
- [41] UNSWORTH, J. e MITCHELL, F. (1990). Degradation of Electrical Insulating Paper Monitored with High Performance Liquid Chromatography, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, pp. 737-746.
- [42] IEC 61198 Mineral Insulating Oils (1993). Methods for the Determination of 2-Furfural and Related Compounds.
- [43] LIMA, S. L.; (2008). Diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando a teoria da extensão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Maranhão, curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, São Luís.
- [44] TINGFANG Y.; XIN Y; (2010); Study of transformer fault diagnosis by Fuzzy C-Means method; 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR); Vol. 2; pp. 306 – 308.

- [45] PENG, L.; FANG-CHENG, LU, F.-C.; LI N.-Y.; HUANG, H.-P.; XIE, Q. (2009); Study on fault diagnosis for power transformer based on cloud matter element analysis principle and DGA; IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2009); pp. 24-248.
- [46] NEMETH, B.; LABONCZ, S.; KISS, I.; (2009); Condition monitoring of power transformers using DGA and Fuzzy logic; IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2009); pp. 373– 376.
- [47] GUO-WEI C.; CHAO P; YAN-TAO W.; DE-YOU Y.; (2009); A new method based on fuzzy TOPSIS for transformer dissolved gas analysis; International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN '09); pp.1-6.
- [48] ZHIGUO, T.; CAIXIONG, W.; CHENGRONG, L.; DIANQUAN, Z.; RUNGUANG, X; (2008). Pulse interferences elimination and classification of on-line UHF PD signals for power transformer; International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2008); pp. 937 – 940.
- [49] SINGH, A.; VERMA, P. (2008); A review of intelligent diagnostic methods for condition assessment of insulation system in power transformers; International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2008); pp. 1354 – 1357.
- [50] HU, W.-P.; WANG, X.-W.; YIN, X.-G. (2008); Study on fault diagnosis for transformer based on adaptive fuzzy inference system; China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2008); pp. 1 – 4.
- [51] SURYA, K. M.; REDDY, R. B.; SINGH, B.P (2005); Transformer fault diagnosis using fuzzy logic and neural network; Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '05); pp. 486 – 489.
- [52] MEI, D.; MIN, H.; (2005). A fuzzy information optimization processing technique for monitoring the transformer in neural network on-line; IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2005); pp. 273 – 275.
- [53] SU, H.; LI, Q.; (2005); Fuzzy neural classifier for fault diagnosis of transformer based on rough sets theory; Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2005); Vol. 3; pp. 2223 – 2227.

- [54] SHOURESHI, R.; NORICK, T.; PERMANA, V.; WORK, J. (2004); Advanced sensor and diagnostic technologies for development of intelligent substations; IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1; pp. 727 – 746.
- [55] HUANG, Y.-C. (2003); Condition assessment of power transformers using genetic-based neural networks; IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology; Vol. 150, Issue 1; pp. 19 – 24.
- [56] DONG, M.; YAN, Z.; TANIGUCHI, Y. (2003); Synthetic analysis technique of oil-impregnated; Proceedings of the 7th International Conference on Insulation Properties and Applications of Dielectric Materials; Vol.1; pp. 455 – 458.
- [57] RASTGOUFARD, P.; PETRY, F.; THUMM, B.; MONTGOMERY, M. (2002); Application of fuzzy logic pattern recognition in load tap changer transformer maintenance; Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS); pp. 389 – 394.
- [58] HUANG, Y.-C.; HUANG, C.-M.; (2002); Evolving wavelet networks for power transformer condition monitoring; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, Issue: 2; pp. 412 – 416.
- [59] ZHOU, Z.-H.; CHEN, Z.-Q.; CHEN, S.-F.; (2001); Condition monitoring of power transformers with neural networks; International Conferences on Info-tech and Info-net (Proceedings. ICII 2001); Vol. 3; pp. 468 – 472.
- [60] DENGHUA M.; (2000); A new fuzzy information optimization processing technique for monitoring the transformer; Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, pp. 192 – 195.
- [61] ROIZMAN, O.; DAVVDOV, V. (2000); Neuro-fuzzy algorithms for power transformers; International Conference on Diagnostics Power System Technology; Vol. 1; pp. 253 – 258.
- [62] WARD, B.H.; LINDGREN, S. (2000); A survey of developments in insulation monitoring of power transformers; IEEE International Symposium on Electrical Insulation; pp. 141 – 147.

- [63] SU, Q. (2000); A fuzzy logic tool for transformer fault diagnosis; International Conference on Power System Technology; Vol. 1; pp. 265 – 268.
- [64] SU, Q.; MI, C.; LAI, L.L.; AUSTIN, P. (2000). A fuzzy dissolved gas analysis method for the diagnosis of multiple incipient faults in a transformer; IEEE Transactions on Power Systems; Vol. 15; Issue 2; pp. 593 – 598.
- [65] SU, Q.; LAI, L.L.; AUSTIN, P. (2000). A fuzzy dissolved gas analysis method for the diagnosis of multiple incipient faults in a transformer; International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM-00); Vol. 2; pp. 344 – 348.
- [66] ROIZMAN, O.; DAVVDOV, V. (1999); Neuro-fuzzy computing for large power transformers monitoring and diagnostics; 18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS); pp. 248 – 252.
- [67] KUMBHAT, M.; AMMAR, H.H.; CHOUDHRY, M.A. (1992); The application of fuzzy logic to the design of online monitoring systems; Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems; Vol. 2; pp. 1036-1039.
- [68] MORETTIN, P. A. e TOLOI, C. M. C. Análise de Séries Temporais. 2. Ed. São Paul: Edgard Blucher, 2006, 538p.
- [69] ATTAWAY, S.; MATLAB – A Pratical Introduction To Programming and Problem Solving Elsevier, 2009.
- [70] HAN, J.; KAMBER, M.; Data Mining – Concepts and Techniques. Editora Morgam Kaufmann, 2008.
- [71] GOLDSCHMIDT, R. e PASSOS, E. Data Mining: Um guia prático, Elsevier – Campus, Rio de Janeiro, 2005.
- [72] POSTGRESQL, Disponível em <http://www.postgresql.org>. Acesso em: 01 de agosto de 2010.
- [73] MATLAB®, Disponível em <http://www.mathworks.com/products/matlab>. Acesso em: 01 de agosto de 2010.
- [74] VB.NET, Disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Visual\\_Basic\\_.NET](http://pt.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic_.NET). Acesso em: 01 de agosto de 2010.

[75] FRAMEWORK. NET, Disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_.NET](http://pt.wikipedia.org/wiki/Microsoft_.NET). Acesso em: 01 de agosto de 2010.

[76] LIMA, Shigeaki Leite de; Saavedra, Osvaldo R. ; Silva, A. C. da ; SOUZA, Andre Nunes de . RNB Aplicada ao Reconhecimento de Padrões de Falhas em Imagens Térmicas de Equipamentos de Subestações. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2010, 2010, Belém. Anais do III SBSE 2010. Belém : UFPA, 2010. Vol. 1. pp. 01-15.

[77] LIMA, Shigeaki Leite de ; Saavedra, Osvaldo R. ; SOUZA, Andre Nunes de ; ROSA FILHO, Raimundo Nonato . Diagnostic of Incipient Failures in Power Transformers using the Extension Theory. In: Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2009, Belém. Anais do XI SEPOPE. RJ : CIGRE BRASIL, 2009. v. 1. p. 1-8.

[78] LIMA, Shigeaki Leite de ; C. O. Ramos ; Saavedra, Osvaldo R. ; SOUZA, Andre Nunes de; ZAGO, Maria Goretti . Sistema especialista integrando aspectos físico-químicos e gasosos para o diagnóstico da vida útil de transformadores de potência da ELETRONORTE-MA para identificação de falhas em fase incipiente. In: 8th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, 2009, Ubatuba. Anais do VIII CLAGTEE. Guaratingetá : UNESP, 2009. v. 1. p. 637.

[79] TEODORO, F. H.; FREITAS, A. A. C. de TEODORO, F. H.; FREITAS, A. A. C. de. Desenvolvimento de inferência nebulosa para detecção e diagnóstico de falhas em transformadores de potência. I CEAP, 2004. UTFPR, Campus Cornélio Procópio.