

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dionatan Augusto Guimarães Cieslak

DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE EVENTOS E
DISTÚRBIOS EM UNIDADES GERADORAS E
USINAS UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY*

DISSERTAÇÃO

Pato Branco

2015

Dionatan Augusto Guimarães Cieslak

**DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE EVENTOS E
DISTÚRBIOS EM UNIDADES GERADORAS E
USINAS UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira

Pato Branco

2015

Aos meus pais Ildes e Geraldo.

*Nunca se protele o filosofar quando se é jovem, nem
canse o fazê-lo quando se é velho, pois que ninguém
é jamais pouco maduro nem demasiado maduro para
conquistar a saúde da alma.*

Epicuro

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e pelo refúgio, nos momentos mais difíceis havia NELE sempre um amparo.

Aos meus pais Ildes e Geraldo e ao meu irmão Jakson, pelo apoio incondicional em todos os passos dessa caminhada.

Ao professor Dr. Miguel Moreto pelos anos de orientação e amizade. Na figura de orientador, norteou meus passos sempre quando a dúvida era inevitável. Sempre permitindo conversas francas e extremamente produtivas. Além de tudo, sua postura, evidenciou que um bom convívio é determinante na carreira acadêmica.

A todos os demais professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Aos meus estimados colegas de pós-graduação, que ao decorrer desse dois anos se mostraram grandes amigos. Amigos esses que compartilharam as alegrias e as frustrações alheias de uma maneira empática. Pessoas que estavam sempre disponíveis para conversas engraçadas, lamentações e principalmente, reflexões sobre o universo acadêmico! Tais colegas permitiram a fundação da ilustre Sociedade do Café, entidade essa que era responsável pela renovação energética da população politequiana.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, bolsa essa que tornou possível a realização deste trabalho.

RESUMO

CIESLAK, Dionatan A. G. Diagnóstico Automático de Eventos e Distúrbios em Unidades Geradoras e Usinas Utilizando Lógica *Fuzzy*. 2015. 124 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2015.

A expansão contínua dos atuais sistemas elétricos de potência tem levado ao desenvolvimento de técnicas de monitoramento que visam subsidiar a análise, o controle e o planejamento dos sistemas. Dentre essas técnicas destacam-se os sistemas SCADA (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*), os sistemas de monitoramento de grandes áreas (do inglês, *Wide Area Measurement System*) e os sistemas de análise de oscilografias. Sistemas de análise oscilográfica se baseiam no estudo dos registros oscilográficos provenientes de dispositivos chamados de Registradores Digitais de Perturbação (RDP) que permitem a análise das grandezas elétricas (tensão, corrente), bem como dos sinais digitais dos equipamentos de proteção monitorados (atuação do dispositivo, por exemplo). O excesso de dados presente nos centros de operação e controle de usinas geradoras torna difícil a tarefa de análise dos especialistas em oscilografia, juntamente a esse fato, vê-se uma crescente na utilização de sistemas inteligentes aplicados no diagnóstico de distúrbios em sistemas elétricos de potência. Deste modo, visando auxiliar o trabalho dos especialistas, bem como reduzir o tempo em que as unidades geradoras ficam fora de operação devido a distúrbios, busca-se aqui a elaboração de um sistema de diagnóstico e classificação de distúrbios em plantas geradoras de energia elétrica baseado em lógica *fuzzy* capaz de diferenciar situações operacionais e de conhecimento dos operadores das situações de contingência bem como classificar a natureza dos distúrbios que causam o desligamento de uma unidade de geração de acordo com as informações obtidas dos registros oscilográficos de longa duração, além de integralizar os eventos em um aspecto multi-máquina.

Palavras-chave: Registros Oscilográficos, Diagnóstico de Falhas, Lógica *Fuzzy*, Classificação de Distúrbios..

ABSTRACT

CIESLAK, Dionatan A. G. A Fuzzy Approach for Automated Operational State Diagnosis and Disturbances Classification in Power Generating Units and Power Plants. 2015. 124 p. Master's Dissertation - Post-Graduate Program in Electrical Engineering, Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, PR, 2015.

The electric power systems are getting more complex and covering larger areas day by day. This fact has been contributing to the development of monitoring techniques that aim to help the analysis, control and planning of power systems. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, Wide Area Measurement Systems and disturbance record systems. Unlike SCADA and WAMS, disturbance record systems are mainly used for offline analysis in occurrences where a fault resulted in tripping of an apparatus such as a transmission line, transformer, generator and so on. The device responsible for recording the disturbances is called Digital Fault Recorder (DFR) and records, basically, electrical quantities as voltage and currents and also, records digital information from protection system devices. Generally, in power plants, all the DFRs data are centralized in the utility data centre and it results in an excess of data that complicates the task of analysis by the specialist engineers. This dissertation shows a new methodology for automated analysis of disturbances in power plants. A fuzzy reasoning system is proposed to deal with the data from the DFRs. The objective of the system is to help the engineer responsible for the analysis of the DFRs's information by means of a pre-classification of data. For that, the fuzzy system is responsible for generating unit operational state diagnosis and fault classification.

Keywords: Digital Fault Recorder, Fuzzy Logic, Power Plants, Disturbances Classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Exemplo de um registro oscilográfico de curta duração.	25
Figura 2:	Exemplo de um registro oscilográfico de longa duração.	26
Figura 3:	Exemplo de um registro oscilográfico de medição contínua.	26
Figura 4:	Topologia de uma rede de oscilografia.	27
Figura 5:	Operação entre conjuntos: União e Intersecção.	40
Figura 6:	Operação entre conjuntos: Complemento e Diferença.	40
Figura 7:	Função de pertinência resultante do mapeamento de um conjunto clássico.	42
Figura 8:	Função de pertinência resultante do mapeamento de um conjunto <i>fuzzy</i>	44
Figura 9:	Operações básicas entre conjuntos <i>fuzzy</i>	47
Figura 10:	Caracterização de uma função de pertinência.	48
Figura 11:	Tipos de funções de pertinência.	50
Figura 12:	Método gráfico de Mamdani (Operador de inferência <i>máx-mín</i>). . .	58
Figura 13:	Método gráfico de Mamdani (Operador de inferência <i>máx-produto</i>). .	59
Figura 14:	Método gráfico de Sugeno.	60
Figura 15:	Método gráfico de Tsukamoto.	61
Figura 16:	Matriz relacional.	62
Figura 17:	Método do Centro de Gravidade - Exemplificação.	63
Figura 18:	Método do Máximo Valor - Exemplificação.	64
Figura 19:	Variações do Método do Máximo Valor.	66
Figura 20:	Metodologia do trabalho proposto.	71
Figura 21:	Fluxograma descrevendo a o sequenciamento lógico do algoritmo proposto para diagnóstico e classificação de distúrbios.	72

Figura 22:	Exemplo de sinal segmentado.	74
Figura 23:	Variáveis de entrada (Tensões pré e pós-distúrbio).	77
Figura 24:	Variáveis de entrada (Correntes pré e pós-distúrbio).	78
Figura 25:	Variável de entrada - ΔI	79
Figura 26:	Variável de saída - Estados operacionais da unidade.	81
Figura 27:	Variáveis de entrada (Variação de tensão e corrente durante o distúrbio).	85
Figura 28:	Variável de entrada (Fator de Tensão Negativa Desbalanceada).	88
Figura 29:	Variável de entrada - $I_{transitório}^{(1)}$	88
Figura 30:	Variável de entrada - $V_{transitório}^{(2)}$	89
Figura 31:	Variável de saída - Tipos de falta.	89
Figura 32:	Definição dos tempos da janela de segmentação.	92
Figura 33:	Variáveis de entrada (relação de estampas de tempo entre a janela de segmentação e atuação da proteção).	93
Figura 34:	Variável de saída - Resultado da correlação.	93
Figura 35:	Registro oscilográfico típico de uma energização plena da unidade.	97
Figura 36:	Demonstração do processo de inferência: Energização plena.	98
Figura 37:	Registro oscilográfico típico de uma desenergização plena da unidade.	99
Figura 38:	Demonstração do processo de inferência: Desenergização plena.	100
Figura 39:	Registro oscilográfico referente ao caso de incremento de carga na unidade.	100
Figura 40:	Demonstração do processo de inferência: Incremento de carga.	101
Figura 41:	Registro oscilográfico real referente ao desligamento forçado da uni- dade G_2	104
Figura 42:	Detalhe do registro oscilográfico: curto circuito no lado de alta do transformador elevador.	104
Figura 43:	Comportamento da unidade G_1 mediante o distúrbio.	107
Figura 44:	Comportamento da unidade G_3 mediante o distúrbio.	107
Figura 45:	Comportamento da unidade G_4 mediante o distúrbio.	108

Figura 46:	Registro oscilográfico simulado referente a uma falta bifásica aterrada na unidade.	109
Figura 47:	Detalhe do registro oscilográfico: falta bifásica aterrada na unidade.	111
Figura 48:	Registro oscilográfico simulado referente a uma falta trifásica unidade.	111
Figura 49:	Detalhe do registro oscilográfico: falta trifásica na unidade. . . .	112
Figura 50:	Diagrama unifilar da usina térmica.	122
Figura 51:	Diagrama de blocos do modelo simulado.	123

LISTA DE TABELAS

1	Isomorfismo entre Teoria dos Conjuntos Clássicos, Álgebra <i>Booleana</i> e Lógica Bivalente.	46
2	Principais estratégias de agregação global de conclusões.	57
3	Grandezas elétricas comumente monitoradas em unidades de geração de energia.	73
4	Conjunto de características extraídas do registro oscilográfico.	75
5	Variáveis de entrada do SIF I (não fuzzificadas).	76
6	Variáveis <i>fuzzy</i> de saída.	79
7	Mapa de regras do SIF I	83
8	Variáveis de entrada do SIF II (não fuzzificadas).	84
9	Mapa de regras do SIF II.	90
10	Mapa de regras do SIF responsável pela correção das informações dos dispositivos de proteção.	94
11	Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso de energização.	97
12	Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso de desenergização.	99
13	Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso de incremento de carga na unidade.	101
14	Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao curto circuito no transformador elevador.	105
15	Estampas temporais da segmentação do registro oscilográfico.	106
16	Instantes de transição da proteção diferencial do gerador G_2	106
17	Valores de RT_1 e RT_2 para a atuação da proteção de G_2	107
18	Estado operacional de G_1 , G_3 e G_4 mediante o distúrbio.	108

19	Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso da falta bifásica aterrada.	109
20	Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso da falta trifásica.	112

LISTA DE SIGLAS

AMR	<i>Augmented Reactive Model.</i>
CE-NETs	<i>Cause-Effect Networks.</i>
CG	Centro de Gravidade.
CGOI	Grupo Coordenador para Operação Interligada.
COMTRADE	<i>Common Format for Transient Data Exchange.</i>
CREG	Concentrador de Registros.
CUSUM	<i>Cumulative Sum.</i>
CWI	Instituto Nacional de Pesquisa para Matemática e Ciência da Computação da Holanda.
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis.</i>
DHT	Distorção Harmônica Total.
FF	Falta Bifásica.
FFF	Falta Trifásica.
FFT	Falta Bifásica Aterrada.
FT	Falta Monofásica.
GLP	<i>General Public License.</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
IA	Inteligência Artificial.
LMC	<i>Local Management Computer.</i>
LS-SVM	<i>Least Square-Support Vector Machine.</i>
MAS	<i>Multi-Agent System.</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PCOMs	Processadores de Comunicação.
PEDA	<i>Protection Engineering Diagnostic Agents.</i>
PSA	<i>Protection System Analysis.</i>
PSF	<i>Python Software Foundation.</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica.
RDP	Registrador Digital de Perturbação.

RNA	Rede Neural Artificial.
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition.</i>
SE	Sistema Especialista.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
SIF	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> .
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SOE	Sequência de Eventos.
SVM	<i>Support Vector Machine.</i>
TC	Transformadores de Corrente.
TP	Transformador de Potencial.
TW	Transformada <i>Wavelet</i> .
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta.
WAMS	<i>Wide Area Measurement Systems.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

- χ Função Característica de um Conjunto Clássico.
- μ Função de Pertinência de um Conjunto *Fuzzy*.
- ψ Fator de Tensão Negativa Desbalanceada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo	22
1.1.1	Objetivo Geral	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
1.2	Organização do Trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Registros Oscilográficos	23
2.1.1	Redes de Oscilografia	27
2.2	Aplicação dos Registros Oscilográficos em Sistemas de Análise e Diagnóstico	28
2.2.1	Sistemas de Análise e Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência	28
2.2.2	Sistemas de Análise e Diagnóstico de Eventos que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica	32
2.2.3	Sistemas de Análise e Diagnóstico do Estado dos Sistemas de Proteção	34
3	LÓGICA FUZZY	37
3.1	O Problema das Incertezas	37
3.2	Lógica Clássica - Uma Revisão	39
3.2.1	Conjuntos Clássicos - Conceitos Fundamentais	39
3.2.1.1	Operações com Conjuntos Clássicos	39
3.2.1.2	Propriedades dos Conjuntos Clássicos	41
3.2.1.3	Mapeamento dos Conjuntos Clássicos em Funções	42
3.3	Lógica <i>Fuzzy</i> - Fundamentos	43
3.3.1	Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i>	45
3.3.2	Propriedades dos Conjuntos <i>Fuzzy</i>	47

3.3.3	Funções de Pertinência	47
3.3.3.1	Tipos de Funções de Pertinência	49
3.3.4	Fuzzificação	52
3.3.5	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	52
3.3.5.1	Operadores de Implcação	53
3.3.5.2	Tratamento das Regras e Métodos Gráficos de Inferência	55
3.3.5.3	Matriz de Correlação	61
3.3.6	Defuzzificação	62
3.3.6.1	Principais Métodos de Defuzzificação	62
3.4	Aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> em Sistemas Inteligentes voltados aos SEPs	66
4	METODOLOGIA PROPOSTA	69
4.1	Aquisição dos Sinais - Registros de Longa Duração	71
4.2	Processamento dos Sinais - Método de Segmentação e Extração de Características	73
4.3	Diagnóstico e Classificação - Abordagem <i>Fuzzy</i>	74
4.3.1	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> I - Diagnóstico do Distúrbio	75
4.3.1.1	SIF I - Fuzzificação	76
4.3.1.2	SIF I - Máquina de Inferência	82
4.3.2	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> II - Classificação de Eventos	83
4.3.2.1	SIF II - Fuzzificação	84
4.3.2.2	SIF II - Máquina de Inferência	89
4.4	Integralização de Eventos e Correlação de Informações dos Dispositivos de Proteção - Abordagem <i>Fuzzy</i>	90
4.4.1	Fuzzificação	91
4.4.2	Máquina de Inferência	94
5	RESULTADOS	95
5.1	Implementação da Metodologia	95
5.2	Resultados do SIF I - Diagnóstico do Distúrbio	96
5.2.1	Estudo de caso: Energização plena de uma unidade	96
5.2.2	Estudo de caso: Desenergização plena de uma unidade	98
5.2.3	Estudo de caso: Incremento de carga na unidade	100
5.3	Resultados do SIF II - Classificação de Eventos	103

5.3.1	Estudo de caso: Desligamento forçado oriundo de um evento real	103
5.3.2	Estudo de caso: Falta bifásica aterrada	108
5.3.3	Estudo de caso: Falta trifásica	110
6	CONCLUSÕES	114
7	TRABALHOS FUTUROS	116
	REFERÊNCIAS	121
	ANEXO A - DIAGRAMA UNIFILAR DA PLANTA DE GERAÇÃO	
	AVALIADA	122
	ANEXO B - SISTEMA IMPLEMENTADO PARA SIMULAÇÕES	123

1 INTRODUÇÃO

A primeira rede elétrica catalogada foi desenvolvida por Thomas Edison, em meados de 1822, e consistia em um sistema radial de corrente contínua de aproximadamente 1,5 km que tinha como objetivo suprir algumas poucas cargas de iluminação na cidade de Nova Iorque. Deu-se aí então o primeiro passo para a evolução dos sistemas elétricos que conhecemos hoje (KUNDUR, 1994).

Durante alguns anos, várias companhias de iluminação foram se desenvolvendo com base nos conceitos fundamentados por Edison, entretanto, devido a excessiva perda de potência só era possível o fornecimento de energia para pequenas distâncias. Os sistemas elétricos voltaram a evoluir no final do século XIX, com a invenção do transformador (atribuído a William Stanley, 1885), com a participação de George Westinghouse nos sistemas de transmissão em corrente contínua (1885) e com a invenção do motor de indução (por intermédio de Nikola Tesla, 1888). Fatos esses que levaram à substituição dos sistemas de corrente contínua por sistemas de corrente alternada (STEVENSON, 1986; SAADAT, 1999). Dava-se aí então, o início dos sistemas elétricos como conhecemos hoje.

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é subdividido em três grandes partes: **geração, transmissão e distribuição**. Atualmente, os SEPs compreendem vastas extensões territoriais, o que torna difícil (devido as interconexões de elementos e interações dinâmicas entre os mesmos), e extremamente importante a garantia de sua confiabilidade. Toda essa preocupação se justifica quando tentamos imaginar a sociedade atual sem acesso à energia elétrica, tarefa minimamente impossível. Sendo assim, a busca pela ótima operação do sistema elétrico se faz, dia após dia, mais relevante, uma vez que tem-se a consciência de que os sistemas elétricos evoluem continuamente e se tornam cada vez mais complexos.

Ainda em relação ao SEPs, é impossível imaginar um sistema elétrico desenvolvido de modo a operar sem nenhuma falha, sendo assim, existe a necessidade da coexistência do sistema com esses distúrbios. Estritamente falando, denomina-se falha qualquer estado anormal de funcionamento de um sistema. Do ponto de vista da engenharia de proteção de sistemas elétricos, essas falhas (ou distúrbios) são comumente denomina-

das **faltas**. Sendo assim, o mais importante (do ponto de vista da proteção de sistemas elétricos) é a prevenção e a mitigação das consequências dessas faltas (STEVENSON, 1986; PAITHANKAR; BHIDE, 2003).

Do ponto de vista prático, a falta em um SEP pode ocasionar uma série de eventos evolutivos, tais como: redução da margem de estabilidade do sistema, dano em equipamentos que compõem o sistema de proteção, desligamento de grandes áreas do sistema, dentre outros (STEVENSON, 1986).

O aumento constante no tamanho dos SEPs e por consequência, na sua complexidade, ocasionou no desenvolvimento de técnicas de monitoramento dos SEPs, tais como: sistemas supervisórios de controle e aquisição de sinais, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), sistemas de medição de grandes áreas, do inglês *Wide Area Measurement Systems* (WAMS) e sistemas de registro de distúrbios. Diferentemente dos sistemas SCADA e WAMS, os sistemas baseados em registros de distúrbios (também chamados de oscilografias) são mais empregados em análises *offline*¹ (MORETO *et al.*, 2014). Na análise *offline* é possível verificar, além da causa da falha, se os equipamentos de proteção se comportaram de maneira adequada (ROLIM *et al.*, 2004).

Registros oscilográficos consistem na representação da forma de onda das grandezas elétricas, mostrando assim seus comportamentos em um intervalo temporal. O equipamento responsável pelo registro dessas formas de onda é o Registrador Digital de Perturbações (RDP). Geralmente, as grandezas apresentadas pelos registros oscilográficos são: tensão, corrente e frequência. Entretanto, informações acerca dos dispositivos de proteção (estado lógico operacional dos equipamentos) também são registrados, auxiliando assim a análise da ocorrência.

Falando mais precisamente da geração, as plantas, ou unidades de geração são compostas fundamentalmente por geradores. Esses geradores, são componentes fundamentais para o suprimento da demanda de energia requerida pelo restante do sistema elétrico. Sendo assim, as condições de operação desses geradores devem respeitar seus limites operacionais e quando isso não for possível, certas medidas devem ser tomadas para garantir a integridade desses elementos, por exemplo, o desligamento da máquina em uma situação de contingência. Devido a complexidade, tanto mecânica quanto elétrica desses geradores, os custos e os longos períodos necessários para uma eventual manutenção dessas máquinas motivam a implantação de sistemas de proteção, controle e monitoramento,

¹a análise *offline* consiste no estudo dos efeitos dos distúrbios após ocorrência, ou seja, não é uma análise em tempo real.

garantindo assim uma maior confiabilidade do fornecimento da energia gerada por essas unidades (MORETO, 2011).

Como dito, o papel fundamental dos RDPs é o de registrar eventuais distúrbios que afetam as grandezas elétricas no sistema elétrico. Sendo assim, mediante qualquer anomalia no sistema, um registro é gerado. O papel de análise desses registros é designado a um especialista, que deve possuir relevante conhecimento sobre operação e proteção de geradores. Usualmente, em unidades geradoras, os dados oriundos dos diversos RDPs instalados na planta são concentrados em um centro de informação onde poucas pessoas possuem os requisitos necessários para realizar a tarefa de análise (engenheiros analistas). Como consequência, esses especialistas são geralmente sobrecarregados devido à grande quantidade de informação registrada e emitida pelos RDPs. Sendo assim, a tarefa de análise oscilográfica vem se tornando um verdadeiro desafio para esses engenheiros analistas, levando em conta que é necessária uma priorização de determinados eventos, uma vez que não há tempo hábil para realizar a análise de todos os registros oscilográficos gerados (MORETO *et al.*, 2009; MORETO; ROLIM, 2010; MORETO, 2011).

No cenário nacional, o sistema elétrico de potência é denominado Sistema Interligado Nacional (SIN) e é operado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que tem como papel fundamental normatizar requisitos mínimos para que agentes de geração possam fazer parte do SIN. Sendo assim, para toda e qualquer ocorrência que cause impacto no SIN, o agente de geração deve reportar ao ONS uma série de informações relativas à ocorrência, tais como: causa, equipamentos envolvidos, procedimentos efetuados, dentre outras. Geralmente, essas informações são emitidas por meio de relatórios de ocorrência. (MORETO, 2011).

Ao avaliar o papel fundamental do especialista em análise oscilográfica percebe-se que, de fato é uma tarefa laboriosa a análise de registros oscilográficos e elaboração de relatórios de ocorrência. Não obstante, o excesso de informações diárias dentro de uma planta de geração torna a tarefa ainda mais difícil.

Frente a esses aspectos, vários estudos vêm sendo desenvolvidos visando automatizar o processo de análise de oscilografias. A maioria desses estudos se baseia na elaboração de sistemas de pré-análise, ou seja, algoritmos que, baseados em alguma estrutura pré-determinada desempenham um papel de primeira análise do distúrbio, auxiliando assim o trabalho do engenheiro analista. Fundamentalmente, sistemas automáticos de pré-análise têm como objetivos ranquear as ocorrências, ou seja, elencar os distúrbios

de acordo com a sua relevância em relação ao SIN. Sendo assim, permite ao engenheiro analista uma redução de análises irrelevantes, como por exemplo, situações rotineiras da unidade de geração. Podendo assim, direcionar a análise principalmente em ocorrências que podem gerar impacto relevante ao SIN.

Segundo Rolim *et al.* (2004) a utilização de técnicas de inteligência artificial (IA) na tarefa de diagnóstico de falta se faz necessária devido à ausência de formulação analítica eficaz para solução do problema. Dentre as diversas metodologias de resolução se destacam os sistemas especialistas, redes neurais, lógica difusa (*fuzzy*), máquinas de vetores de suporte (do inglês, *Support Vector Machine* (SVM)), sistemas híbridos (neuro-*fuzzy*, por exemplo) e os algoritmos genéticos. Entretanto, outras metodologias também são encontradas na literatura.

No trabalho desenvolvido por Qian *et al.* (2004) é proposto um sistema de informação de faltas onde se busca coletar informações da proteção e também dos RDPs, melhorando assim a análise de faltas no sistema. As informações relevantes para o diagnóstico de faltas são divididas em 3 categorias: ação dos disjuntores, ação da proteção e dos dispositivos automáticos e informação dos RDPs. Permitindo assim uma análise melhorada mediante distúrbios no sistema.

Já Zin e Karim (2007) desenvolvem um método de análise de oscilografias aplicado na proteção de sistemas elétricos. Basicamente, o algoritmo calcula os tempos de resposta da proteção e os compara com os parâmetros definidos (configurados). Por fim, o algoritmo gera um relatório de que auxilia os engenheiros a analisar o evento.

Com base nesses aspectos e levando em conta uma certa carência literária de trabalhos que têm como foco a análise de distúrbios nas unidades de geração (por exemplo, Tcheou (2005) menciona que a análise de perturbações é mais utilizada pelos agentes de transmissão), e considerando a importância que os sistemas de geração tem, do ponto de vista do SIN, o presente trabalho tem como objetivo a elaboração de uma metodologia que permita integrar os conceitos de sistemas inteligentes de diagnósticos de faltas em SEPs, mais precisamente, em unidades de geração de energia elétrica.

1.1 **Objetivo**

1.1.1 **Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema inteligente para diagnosticar e classificar faltas em unidades de geração de energia elétrica levando em conta os dados dos RDPs, baseado nos conceitos de inteligência artificial (lógica *fuzzy*, integrando assim um diagnóstico de grandezas elétricas e informações de atuação dos sistemas de proteção.

1.1.2 **Objetivos Específicos**

Estudo das informações adquiridas via RDPs (analógicas e digitais) e definição de quais informações adquiridas são mais propícias para o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico automático;

Estudo das técnicas de inteligência artificial utilizadas em sistemas de diagnóstico e verificação de quais podem ser utilizadas conforme os dados disponíveis e informações extraídas dos registros;

Implementação de um sistema de diagnóstico e classificação de faltas em unidades de geração de energia elétricas que una a análise das grandezas elétricas na planta de geração bem como as informações das atuações dos sistemas de proteção.

1.2 **Organização do Trabalho**

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte acerca das metodologias de análise e classificação de distúrbios em sistemas elétricos. Uma fundamentação da metodologia utilizada para elaboração do sistema é apresentada no capítulo 3. A metodologia proposta para o problema de análise automática de eventos e distúrbios é apresentada no capítulo 4. Na sequência, no capítulo 5 são expostos os resultados obtidos com o desenvolvimento desse trabalho. Por fim, o capítulo 6 conclui o trabalho, apresentando uma visão geral do que fora desenvolvido e a efetiva contribuição do trabalho além de guiar o leitor para possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos relevantes para a compreensão dos métodos de análise de distúrbios, bem como características, aplicações e fundamentações de sistemas de diagnóstico e análise já existentes.

2.1 Registros Oscilográficos

No âmbito dos SEPs, define-se como registro oscilográfico (ou oscilografia) o registro de grandezas elétricas, tais como: tensão, corrente e frequência, em um determinado intervalo temporal. O equipamento responsável por esse registro é conhecido como Registrador Digital de Perturbações (RDP).

Um RDP é um equipamento de aquisição digital de sinais desenvolvido para ser empregado, especificamente, em sistemas elétricos de potência. Normalmente, um RDP possui canais analógicos e canais digitais (geralmente há mais canais digitais em relação aos analógicos). Os canais analógicos têm como função monitorar as grandezas elétricas acima citadas. Já os canais digitais monitoram os estados lógicos dos equipamentos de proteção e controle (que são ligados via contatos auxiliares nas entradas digitais dos RDPs).

Em meados da década de 50, surgiram as primeiras oscilografias de falhas em sistemas elétricos, essas mesmas, eram adquiridas por meio de equipamentos eletromecânicos a tinta (similares aos sismógrafos analógicos). A partir dos anos 70, surgiram os oscilógrafos analógicos, que utilizavam papel fotográfico como material de registro. Somente a partir dos anos 80, que surgiram os primeiros registradores digitais de perturbação (RDP), relacionados à explosão tecnológica em relação a *hardwares* e *softwares*.

Sistemas de registro de distúrbio são baseados em registros oscilográficos de grandezas elétricas. No âmbito nacional, sabe-se que em meados dos anos 70, o já extinto Grupo Coordenador para Operação Interligada (CGOI) era o responsável pela análise integrada de perturbações no sistema elétrico de potência brasileiro. Antes disso, os distúrbios ocorridos no sistema elétrico eram tratados de maneira empírica, principalmente

pelo fato de ausência de conhecimento no assunto e também pela falta de experiência na análise de perturbações. Com o passar dos anos e através de análises sistemáticas das perturbações, gerou-se subsídio para aquisição de conhecimento e consolidação das técnicas de análise e diagnóstico, levando assim, os agentes responsáveis pelas análise a um aperfeiçoamento profissional (TCHEOU, 2005).

Atualmente, o papel de análise de ocorrências cabe a cada agente de geração, entretanto, o órgão que regulamenta todas as normativas acerca dos requisitos mínimos de instalação dos dispositivos de registro de distúrbios, bem como, avalia os distúrbios relevantes ao SIN é o ONS (MORETO, 2011).

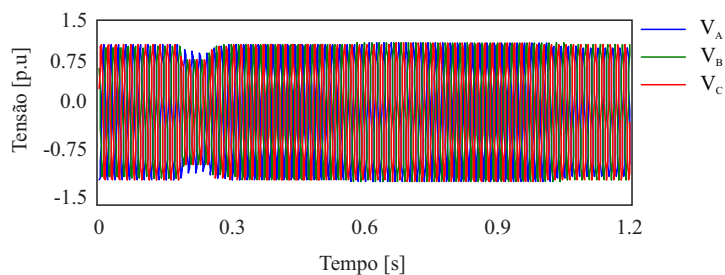
A função do ONS é de justamente regulamentar e normatizar a operação dos sistemas elétricos dentro do território nacional, que impactam diretamente no SIN. Por exemplo, o ONS define que todas as unidades de geração que compõem o SIN devem ter sistemas para registro de perturbações que, obrigatoriamente, devem supervisionar correntes trifásicas, tensões trifásicas e, no caso de geradores aterrados por baixa impedância - corrente de neutro, e para geradores aterrados por alta impedância, tensão de neutro. Além do mais, todos os registros devem ser disponibilizados, quando solicitados, para o ONS (ONS, 2009).

As definições impostas pelo ONS fazem com que a quantidade de informações armazenadas pelos RDPs seja relativamente elevada e pelo fato de que a capacidade de memória dos RDPs é limitada, não se faz possível o armazenamento ininterrupto das grandezas monitoradas. Sendo assim, os RDPs dispõem de memórias cíclicas com capacidade limitada que, ao passo que novas amostras são obtidas, as mais antigas são descartadas. O conteúdo dessa memória cíclica é então gravado na memória de registros dos RDPs cada vez que ocorrer um *trigger* (indicando assim a ocorrência de um distúrbio).

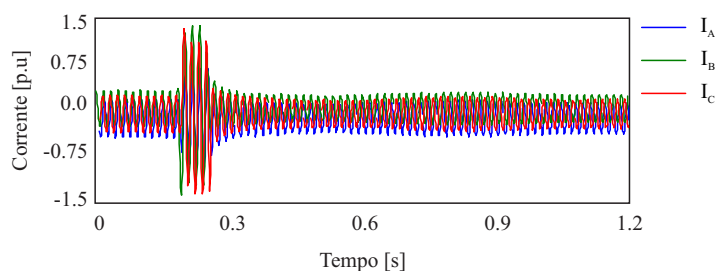
Em relação ao *trigger*, diversas são as maneiras que o ocasionam: o **Disparo por limiar** acontece quando algumas das grandezas monitoradas (tensão, por exemplo) atinge determinado valor pré-determinado. O **Disparo por variação** ocorre quando se detecta a diferença entre os valores das grandezas monitoradas em dois períodos consecutivos. O **Disparo por desequilíbrio** é obtido quando se detecta desequilíbrio entre as grandezas monitoradas (correntes trifásicas, por exemplo). O **Disparo sequencial** é obtido por intermédio do disparo de um segundo RDP, ou seja, é proveniente de casos onde mais de um RDP está presente na mesma instalação. O **Disparo por sinal digital** é proveniente da mudança de estado de alguma de suas entradas digitais (que usualmente

estão conectadas a contatos auxiliares dos equipamentos de proteção). E por fim, o **Disparo manual**, onde o registro das grandezas monitoradas é obtido por intermédio da ação manual do operador (MORETO, 2011).

Fundamentalmente, um RDP conta com três formas de registro oscilográfico, são elas: o **Registro de Curta Duração**, ou também chamado de registro de forma de onda, que apresenta tempo de registro na ordem alguns segundos e permite uma análise bastante precisa dos tempos de atuação dos equipamentos de proteção e outros dispositivos de controle, esse tipo de registro é geralmente obtido por intermédio de faltas que são rapidamente extintas (por ação do sistema de proteção, por exemplo). O **Registro de Longa Duração**, ou registro fasorial, que apresenta tempo de registro na ordem de minutos, permitindo assim o cálculo de fluxos de potência, bem como auxilia na análise de estabilidade do sistema de potência e na visualização de oscilações de baixa frequência, esse tipo de registro geralmente está relacionado aos distúrbios que afetam a estabilidade do sistema elétrico (flutuações de potência, variações de frequência e variações anormais de tensão, por exemplo). Por fim, o **Registro de Medição Contínua**, que armazena valores de módulo e ângulo calculados em intervalos médios de 1 minuto e têm como principal função auxiliar nos estudos de qualidade da energia elétrica (QEE), esse registros são geralmente gerados automaticamente e permitem uma visão panorâmica das grandezas elétricas ao longo de um dia, por exemplo, (DAVILA, 2010; MORETO, 2011).

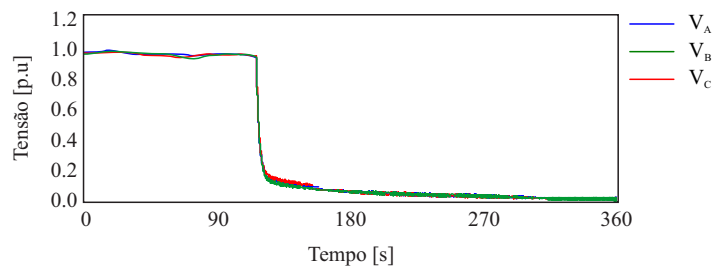


(a) Registro de forma de onda do módulo tensão.

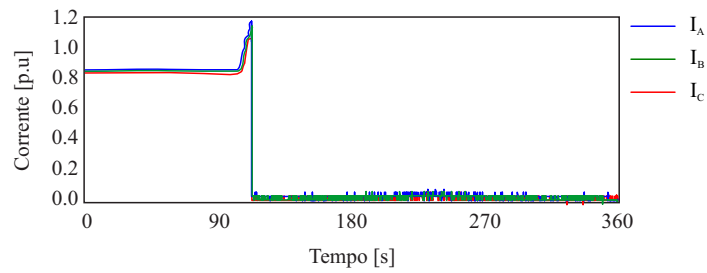


(b) Registro de forma de onda do módulo corrente.

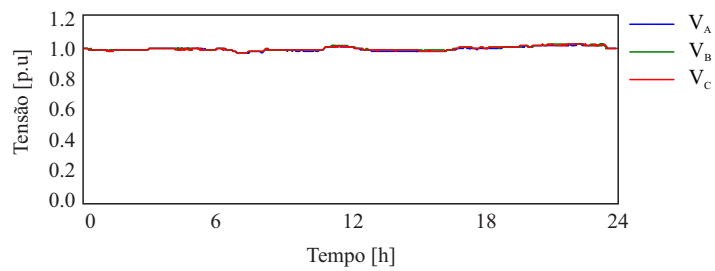
Figura 1: Exemplo de um registro oscilográfico de curta duração.



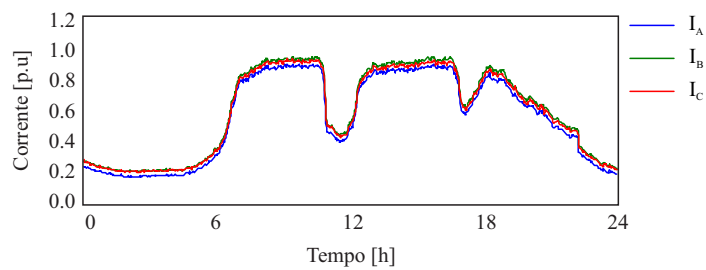
(a) Registro fasorial do módulo da tensão.



(b) Registro fasorial do módulo da corrente.

Figura 2: Exemplo de um registro oscilográfico de longa duração.

(a) Registro contínuo do módulo da tensão.



(b) Registro contínuo do módulo da corrente.

Figura 3: Exemplo de um registro oscilográfico de medição contínua.

A Figura 1 representa um registro de curta duração, enquanto a Figura 2 e 3 representam um registro de longa duração e de medição contínua, respectivamente.

2.1.1 Redes de Oscilografia

Como supracitado, as instalações que contam com RDPs levam a uma grande quantidade de informações, que devem ser devidamente geridas a fim de dar subsídio ao trabalho de análise mediante os engenheiros analistas. Atualmente, os fabricantes de tais dispositivos fornecem soluções completas para a integração de vários RDPs e também, de dispositivos de proteção. Possibilitando assim um acesso eficaz e, principalmente, remoto dos dados. Tais sistemas recebem o nome de redes de oscilografia. Uma topologia típica baseada no sistema GERCOM-II da Reason S.A pode ser observada na Figura 4. Vale lembrar que tal topologia não é genérica, podendo haver diversas outras topologias que compõem uma rede de oscilografias.

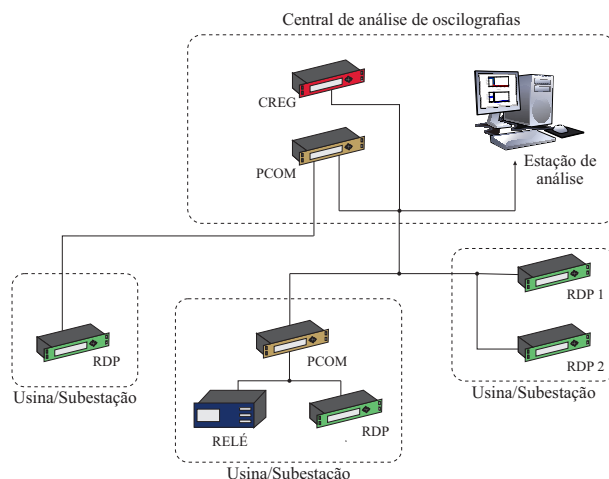


Figura 4: Topologia de uma rede de oscilografia.

Fonte: Adaptado de (REASON TECNOLOGIA S.A, 2005).

Os registros de oscilografias podem também, ser obtidos através da função de oscilografia presente em muitos relés digitais. Tais relés, bem como os RDPs, podem ser conectados a Processadores de Comunicação (PCOMs), os quais, são responsáveis pela busca de novos registros nos RDPs (efetuando uma varredura periódica). Pode acontecer de que os equipamentos que fornecem os registros oscilográficos sejam de diferentes procedências, caso isso ocorra, o PCOM também é responsável pela adaptação dos protocolos de comunicação e formatos de arquivos de cada fabricante. A comunicação dos dados pode ser efetuada de diversos meios (rede *ethernet* ou cabo serial, por exemplo). Nos PCOMs os arquivos de oscilografia também são convertidos para o formato padrão IEEE *Common Format for Transient Data Exchange*¹ (COMTRADE) que é o padrão

¹contido em (IEEE, 1999).

adotado pelo ONS para troca de arquivos de oscilografia.

Por fim, o Concentrador de Registros (CREG) é responsável por armazenar e disponibilizar os arquivos de oscilografia, bem como gerenciá-las em um banco de dados. É no CREG que os registros coletados pelo PCOM são armazenados.

A metodologia proposta nessa dissertação foi elaborada tendo em vista sua implementação em estações de análise de oscilografias (como apresentada na Figura 4), localizada no centro de operação da empresa de geração.

2.2 Aplicação dos Registros Oscilográficos em Sistemas de Análise e Diagnóstico

O advento dos registros oscilográficos permitiu um relevante desenvolvimento nas áreas de análise e diagnóstico de distúrbios em sistemas elétricos, uma vez que dispõe de inúmeras informações que são primordiais à análise do comportamento do sistema elétrico. Em função disso, diversas são as metodologias desenvolvidas nas últimas três décadas que se baseiam nas informações oriundas dos RDPs para auxiliar a análise dos SEPs como um todo. Juntamente à esse fato, o avanço do campo da computação permitiu a otimização e criação de novas técnicas computacionais aplicadas com finalidade de análise e diagnóstico em sistemas elétricos. Na sequência, serão apresentadas algumas das técnicas de análise que têm como informação principal o dado oriundo dos RDPs, é possível, ao final desse capítulo, um vislumbre geral da importância desses sistemas ao contínuo funcionamento dos sistemas elétricos de potência.

2.2.1 Sistemas de Análise e Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência

O fato dos registros oscilográficos terem se tornado digitais impulsionou fortemente o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de oscilografias. Paralelamente, o desenvolvimento das tecnologias de informação e processamento de sinais permitiu a concepção de diversas técnicas computacionais que auxiliam a tarefa de diagnóstico oscilográfico.

Como dito, a análise oscilográfica permite verificar a causa do distúrbio, bem como avaliar o comportamento da proteção na presença de tal contingência (ROLIM *et al.*, 2004). Sendo assim, a busca por mecanismos de análise automática em SEPs vem sendo

desenvolvida fortemente nas últimas três décadas. Por exemplo, Kezunovic *et al.* (1993) propõe um sistema inteligente para diagnóstico de faltas em linhas de transmissão baseado em registros oscilográficos. Dados de tensão, corrente e frequência são as variáveis de entrada de um Sistema Especialista (SE) que, com base na comparação das variáveis de entrada com limiares pré-definidos gera um parecer acerca do distúrbio. O autor ainda define que uma das principais dificuldades acerca do diagnóstico automático é a de distinguir os dados oriundos dos RDPs, ou seja, diferenciar as faltas dos demais eventos que também geram disparo ² dos RDPs.

Uma metodologia para detecção de faltas em redes de transmissão baseada em autômatos é desenvolvida por Chantler *et al.* (2000). No trabalho, os autores utilizam a análise de Fourier para estimar a magnitude e a fase da tensão e da corrente. Essas informações são utilizadas para o cálculo da impedância da linha (que serve como parâmetro para o diagnóstico). Além do mais, são utilizados os tempos de atuação da proteção como informações adicionais para o diagnóstico. Por meio de um autômato do tipo (*Augmented Reactive Model*) (AMR) uma série de regras de análise são aplicadas nas informações extraídas dos RDPs (além de tensão e corrente, tempo de disparo da proteção). Fundamentalmente o sistema opera em três etapas: inicialmente é feita uma análise local (geralmente na subestação mais próxima à falta) no RDP da linha defeituosa. Após essa etapa é feita uma sincronização dos tempos de todos os RDPs com base no tempo de início do curto-circuito). Finalmente, é efetuada uma análise global que tem como objetivo efetuar a identificação de eventos simultâneos, como por exemplo, o impacto da falta nas demais áreas adjacentes.

Já Youssef (2004b) propõe um sistema *fuzzy* para classificação de faltas em sistemas elétricos de potência baseado nas informações das componentes simétricas das correntes trifásicas. Inicialmente, o sistema remove as componentes de alta frequência nos sinais de corrente (oriundas da ocorrência da falta) por intermédio da Transformada *Wavelet* (TW). Feito isso, são calculadas as componentes simétricas das correntes trifásicas. O emprego das componentes de sequência no algoritmo de classificação se evidencia, pois, a modelagem *fuzzy* das funções de pertinência é dada com base em coeficientes definidos através dos valores da fase das correntes trifásicas, bem como na razão entre a componente de sequência zero e a componente de sequência positiva. Esses coeficientes compõem as variáveis de entrada do sistema *fuzzy*. As faltas são classificadas de acordo com a sua natureza, isto é, faltas monofásicas-terra, bifásicas e bifásicas-terra.

²do inglês, *trigger*.

Um sistema para auxílio à proteção de sistemas elétricos de potência baseado em sistemas multi-agentes (do inglês, *Multi-Agent System* (MAS)) é proposto por McArthur e Davidson (2006). O sistema utiliza como informações essenciais os dados de uma sistema SCADA e as informações oriundas dos RDPs (registros oscilográficos e estados digitais dos equipamentos de proteção). Intitulado como Agente de Diagnóstico da Engenharia de Proteção (do inglês, *Protection Engineering Diagnostic Agents* (PEDA)), o sistema é composto essencialmente por seis agentes, onde cada agente é responsável por uma tarefa específica (análise dos alarmes do sistema de proteção, análise das grandezas elétricas registradas pelos RDPs, dentre outras). O sistema relaciona os registros oscilográficos com as informações da proteção, permitindo assim avaliar qual dos registros está de fato relacionado com o incidente. Além do mais, um dos agentes possui a capacidade de classificar as faltas de acordo com sua natureza (trifásica, bifásica, monofásica), seu tempo de início e de acordo com o tempo de eliminação da falta.

Um outro sistema para detecção de faltas em linhas de transmissão é proposto por Kezunovic (2007). Neste trabalho, o autor une, fundamentalmente, duas análises. Uma análise global baseada no fluxo de potência, permitindo assim visualizar problemas de sobrecarga e queda de tensão nas barras do sistema e outra, local, que é instalada nas subestações. A análise local utiliza as informações de tensão e corrente, bem como estado lógico dos relés e disjuntores. Essas informações são tratadas através de um sistema inteligente baseado em uma rede *neuro-fuzzy* e um sistema de amostras sincronizadas (que utiliza as informações temporais de tensão e corrente no início e fim da linha faltosa). O autor explica que a utilização dessas amostras sincronizadas é útil para confirmação da ocorrência da falta, além de discernir sobrecargas, flutuações de potência e outros eventos não-faltosos. Por fim, as informações da rede neural e das amostras sincronizadas dispararam uma árvore de decisões, que tem como objetivo unir todas as informações coletadas durante a falta e gerar um diagnóstico final.

Ainda voltado para a aplicação em linhas de transmissão, Silva *et al.* (2007) propõe um algoritmo de diagnóstico e classificação de faltas baseado na aplicação das informações oscilográficas extraídas através da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). O sistema utiliza os coeficientes *Wavelet* das correntes trifásicas, bem como os instantes iniciais e finais da ocorrência do distúrbio para detecção da falta. Uma primeira etapa de detecção é realizada, onde as faltas são diferenciadas dos eventos relacionados à qualidade da energia (afundamentos de tensão, manobras de chaveamento, operação da manutenção, dentre outros). Feito isso, inicia-se uma classificação, onde uma rede neural artificial

(RNA) é responsável por inferir e classificar os distúrbios com base nas informações de tensão e corrente nas linhas de transmissão.

Já em âmbito nacional, Costa *et al.* (2010) desenvolveram um método de detecção de falta em sistemas de transmissão via análise da energia janelada dos coeficientes *Wavelet* das tensões e das correntes dos registros oscilográficos. O sistema se mostrou capaz de detectar faltas, afundamentos de tensão, transitórios de chaveamento, energização e desligamento de linhas de transmissão, faltas evolutivas e múltiplos distúrbios transitórios (uma falta seguida de um religamento automático, por exemplo).

Outro sistema de diagnóstico de faltas em linhas de transmissão é elaborado por Taifeng *et al.* (2010). Os autores ressaltam que em condições normais, o sistema se encontra estável, isto é, as variáveis do sistema se encontram em regime. Já, na ocorrência de uma falta, o sistema tende a sofrer um distúrbio dinâmico, causando mudanças significativas nas variáveis em um curto intervalo de tempo. Sendo assim, essas mudanças repentinas ou abruptas se tornam úteis para retratar a natureza do distúrbio. Com base nisso, os autores efetuam o diagnóstico levando em conta essas variações das grandezas elétricas. Um algoritmo de soma acumulativa (do inglês, *Cumulative Sum* (CUSUM)) é responsável por detectar as variações abruptas nas variáveis do sistema. Pode acontecer de que para determinados distúrbios sejam detectados mais de um ponto de variação abrupta, entretanto, segundo os autores, geralmente o primeiro ponto de variação abrupta indica o evento faltoso (os demais correspondem as oscilações do sistema oriundas do distúrbio). Para selecionar o ponto de variação correto é utilizado um algoritmo que emprega requisitos de similaridade de forma de onda, eliminando assim as oscilações provenientes do distúrbio. Por fim, um terceiro algoritmo é empregado e tem como função classificar as características do distúrbios, por exemplo: ocorrência de falta (quando a corrente da linha em questão se eleva repentinamente), extinção da falta (quando a corrente da linha decai repentinamente e retorna a valores nominais), abertura do disjuntor (quando a corrente da linha decai para zero) e fechamento do disjuntor (quando a corrente da linha se eleva do valor nulo).

Uma abordagem híbrida para diagnóstico de faltas em sistemas de distribuição é proposta por Mustafa *et al.* (2013). Os autores propõem uma metodologia baseada em lógica *fuzzy* e redes de causa-efeito (do inglês, *Cause-Effect Networks* (CE-NETs)), que nada mais são que gráficos de análise de informação (geralmente contendo informações dos estados lógicos dos disjuntores e dos relés de proteção). De um modo geral, a metodologia proposta localiza faltas baseada nos estados dos dispositivos de proteção (com base na

utilização das CE-NETs), por fim, um sistema *fuzzy* é responsável pelo diagnóstico das faltas. Toda a informação utilizada no desenvolvimento do trabalho é oriunda de um sistema SCADA.

Na metodologia de (SAHA; ALDEEN, 2014) é proposto um sistema para detecção de faltas em sistemas de transmissão baseado em SVM que se mostra capaz de detectar faltas em qualquer localização na rede avaliada em um tempo muito curto (próximo até da análise online), bem como identificar a linha faltosa e, classificar a natureza do distúrbio. A velocidade da resposta se dá principalmente devido a implementação de uma SVM modificada (LS-SVM). Além disso, outro fator que otimiza a velocidade do algoritmo é que utiliza-se a inferência lógica somente para detecção e identificação da falta.

No trabalho de (GOLI *et al.*, 2015) é apresentada uma abordagem para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão baseada nas informações sincronizadas de corrente no fim das linhas de transmissão. Por meio de uma análise multirresolução *Wavelet*, são calculados coeficientes dos sinais de corrente e, com base nesses coeficientes, é feita a detecção e o diagnóstico das faltas através de uma comparação dos valores dos coeficientes com limiares preestabelecidos. Por fim, um sistema *fuzzy* é responsável pela localização das faltas por toda a extensão da linha faltosa.

2.2.2 Sistemas de Análise e Diagnóstico de Eventos que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica

A classificação de faltas em SEPs é uma das grandes vertentes de aplicação de sistemas baseados em registros oscilográficos e inteligência artificial. Além dessa, o constante crescimento dos SEPs acarretou na preocupação com a qualidade da energia entregue aos consumidores, levando então ao desenvolvimento de normas que se referem aos critérios e limites que balizam a energia elétrica (DUGAN *et al.*, 2002). Essa preocupação com a QEE alavancou o desenvolvimento de métodos de diagnóstico e classificação que tem como fim avaliar o comportamento do sistema no âmbito da qualidade.

Como dito inicialmente, a constante evolução nas técnicas de processamento de sinais permite a aplicação de diversas metodologias nas área de diagnóstico e classificação de distúrbios. Atualmente, essas ferramentas de processamento de sinais agem em conjunto com técnicas de IA, constituindo assim os eficientes sistemas inteligentes aplicados nos SEPs (SAINI; KAPOOR, 2012).

É o caso do sistema proposto por Dash *et al.* (2000), que consiste em um sistema híbrido baseado na ação conjunta de um Combinador Linear de Fourier (do inglês, *Fourier Linear Combiner*) com um sistema de classificação *fuzzy*. O combinador linear tem como função extrair a amplitude e a fase dos sinais de tensão e corrente bem como a distorção harmônica total (DHT) dos sinais. Com base na informação da amplitude dos sinais os autores modelam o sistema *fuzzy* levando em conta a inclinação (dV/dt e dI/dt) e a amplitude do sinal, formando assim as funções de pertinência do sistema *fuzzy*. O sistema então classifica os distúrbios de acordo com a assinatura de tensão e/ou corrente, sendo estes, principalmente: afundamentos de tensão, sobretensão, inchamento de tensão (do inglês, *swell*), condições normais e interrupção de tensão. Os autores afirmam que na presença de harmônicas nos sinais, a utilização método de combinação linear utilizado apresenta certas desvantagens (principalmente quando comparado ao método da Transformada *Wavelet*), entretanto, o esforço computacional para o método aplicado é consideravelmente menor quando comparado ao da Transformada *Wavelet*, justificando portanto, o emprego do mesmo.

Utilizando a Transformada *Wavelet* Discreta em ação conjunta com uma RNA e um classificador *fuzzy*, Reaz *et al.* (2007) propõe um sistema que classifica os distúrbios referentes a QEE com base nas informações da componente fundamental da tensão bem como a fase da tensão e a DTH. Os distúrbios são classificados de cinco formas distintas (transitórios, afundamentos, inchamento, interrupções e flutuações). Inicialmente, a TWD calcula os coeficientes *wavelets* que então alimentam a RNA, dando início assim à fase de treinamento da mesma. Durante o treinamento, os demais blocos do sistema (processamento do sinal e classificador *fuzzy*) ficam desativados. Após o processo de treinamento, um vetor com os pesos finais calculados pela RNA é inserido no sistema *fuzzy*, auxiliando assim o diagnóstico dos distúrbios, correlacionando os mesmos com as classes pré-definidas.

No trabalho desenvolvido por Monedero *et al.* (2007) é proposto um sistema baseado na Transformada *Wavelet* e na utilização de uma RNA para classificação dos distúrbios. Os autores classificam os distúrbios em três naturezas (distúrbios de tensão, frequência e harmônicas), onde cada uma das naturezas de distúrbios possui distúrbios específicos (afundamentos de tensão, desvios de frequência, percentual de DTH, por exemplo). Sendo assim, com base na TW, as informações relevantes (em relação aos coeficientes *wavelets*) à RNA dizem respeito à energia total do sinal, aos possíveis picos na forma de onda e ao valor *rms* da tensão. O sistema de classificação então é dividido em três RNAs

específicas (uma para análise dos distúrbios de tensão, uma para os de frequência e outra para os distúrbios harmônicos). Sendo assim, ao serem extraídos os coeficientes, uma RNA é responsável por diagnosticar a existência do distúrbio e de qual natureza ele se assemelha. Na presença do mesmo, as três RNAs específicas entram em ação buscando diagnosticar o evento de forma precisa.

Já Samantaray (2010) propõe um sistema baseado em lógica *fuzzy* e árvore de decisões (do inglês, *Decision Tree*) para classificação de eventos relacionados à QEE. O sistema se baseia na aplicação da Transformada S (a Transformada S é fundamentalmente uma Transformada *Wavelet* Contínua com correção de fase) no sinal transitório para extração das informações de magnitude e frequência dos sinais. Essas informações são então convertidas e adaptadas para se tornarem parâmetros de decisão para o sistema.

2.2.3 Sistemas de Análise e Diagnóstico do Estado dos Sistemas de Proteção

Outra aplicação relevante possível graças à extração de informações dos registros oscilográficos, é a análise dos sistemas de proteção. Ou seja, avaliar o comportamento do sistema de proteção mediante distúrbios nocivos ao sistema elétrico. Sendo assim, se torna possível identificar a atuação (ou não) da proteção. Como resultado, essa análise (bem como a análise dos equipamentos que compõe os sistemas de proteção) gera informações relevantes para que as equipes de manutenção efetuem um diagnóstico local dos equipamentos em mal funcionamento.

Um exemplo dessa aplicação pode ser visto em Dongyuan *et al.* (2003), onde os autores propõe um sistema de informação de faltas em sistemas elétricos. O sistema faz uso da ação conjunta entre dados dos RDPs e os sinais de atuação dos relés de proteção, ambos instalados nas subestações. Essas informações são concentradas em um computador principal (*Local Management Computer* (LMC)) que desempenha o papel de gestão de informação. Tanto os registros dos RDPs quanto os registros dos relés são sincronizados por meio de um sinal do sistema de posicionamento global (do inglês, *Global Positioning System* (GPS)). O LMC serve como repositório de toda a informação adquirida via RDPs e relés. Numa situação de contingência, quando uma falta ocorre, a quantidade de informações que são enviadas para o centro de controle é relativamente grande, sendo assim, o LMC executa uma rotina que prioriza o envio de algumas informações, buscando reduzir o fardo da análise final por intermédio dos analistas.

Outro sistema que se baseia em registros oscilográficos e informações dos dispositivos de proteção é proposto por Zin e Karim (2013). No trabalho, os autores elaboram um sistema de análise da proteção (do inglês, *Protection System Analysis* (PSA)) que, baseado nas informações de tensões e correntes trifásicas e corrente de neutro, juntamente e os estados digitais da proteção (entradas digitais dos RDPs), calcula o tempo de resposta do sistema de proteção e também, o tempo total de extinção da falta. Além disso, o sistema também, por intermédio de uma RNA, efetua o reconhecimento de padrões das faltas, desempenhando assim um papel de classificação dos distúrbios com base nas assinaturas ³ das faltas.

Com base nos sistemas apresentados até aqui, é possível mensurar a importância dos mesmos para a integridade dos SEPs. Graças aos avanços no campo do processamento de sinais, bem como o avanço das técnicas de inteligência artificial (fortemente citados nos itens anteriores), torna-se possível, cada vez mais, a evolução dos sistemas de diagnóstico e análise de distúrbios. É possível observar que a grande maioria dos sistemas existentes, tem como foco principal os sistemas de transmissão (uma vez que é na transmissão que se concentra a maioria dos distúrbios referentes aos SEPs).

Em contra partida, alguns estudos direcionam a aplicação desses sistemas nas plantas de geração e também nas redes de distribuição, porém, em número muito inferior quando comparados aos sistemas de transmissão. Frente à esse fato, motiva-se a elaboração de sistemas inteligentes aplicados em usinas de geração elétrica. As usinas atuais, dispõem de modernos sistemas de monitoramento de sinais (RDPs, relés e sistemas de aquisição de dados instalados na planta, etc). Em virtude disso, dentro de uma planta geradora, estão disponíveis todas e quaisquer informações necessárias para se permitir avaliar o comportamento da mesma, mediante o SEP. Frente a estes aspectos, se torna latente a possibilidade de aplicação de sistemas de diagnóstico e análise de eventos e distúrbios dentro de plantas geradoras.

Além do mais, diversas são as metodologias empregadas nas práticas de diagnóstico e análise (como pode ser visto nos parágrafos acima). Portanto, escolher por uma em específico pode se tornar uma árdua tarefa, uma vez que todas possuem vantagens e desvantagens. Para Campos e Saito (2004) os conhecimentos que dispomos de qualquer tipo de sistema sempre serão incompletos e com diversas fontes de incertezas. Basicamente, existem duas razões para a origem dessas incertezas. A primeira decorre

³segundo Zin e Karim (2013), assinatura de falta pode ser definida como uma característica gerada por uma falta ou, faltas de uma mesma natureza.

da maneira como obtemos as informações sobre os sistemas, na maioria das vezes, essa etapa envolve observações através de instrumentos ou do próprio ser humano, ou seja, em qualquer um dos meios, estas observações sempre estarão sujeitas a erros e incertezas. O segundo aspecto que determina as incertezas se fundamenta no fato de que os conhecimentos obtidos de um sistema real sempre são representados ou através da própria linguagem natural, de uma lógica formal ou de uma formulação matemática. Desta forma, o modelo do sistema sempre será incompleto em função das simplificações necessárias à determinação do mesmo. Consequentemente, a observação, a aquisição e a representação dos conhecimentos irão conduzir inevitavelmente a uma perda de informações em relação ao sistema real.

Mediante isso, agrega-se à motivação dos sistemas voltados aos diagnósticos em plantas de geração o fato de elaborar-se um sistema capaz de lidar com incertezas de forma natural. Não deixando de lado sua flexibilidade. Além do mais, historicamente, os sistemas de inteligentes desempenham um papel de auxílio aos operadores dos sistemas elétricos de potência, portanto, a grande maioria desses sistemas se baseiam fortemente no conhecimento humano para efetuarem suas rotinas, ou seja, esses sistemas requerem fortemente uma estruturação baseada em regras heurísticas. Ainda, a grande maioria dos problemas relacionados ao diagnóstico em SEPs possui um complexo rigor matemático por de trás dos eventos, sendo assim, modelos simplificados (que seriam facilmente solucionados) apresentam pouca representação do problema real. Já os modelos complexos, se deparam com uma inexistência de expressões em forma matemática como método de solução. Sendo assim, essa complexidade ocasiona em soluções computacionais onerosas (caso técnicas convencionais sejam utilizadas). Frente a todos esses aspectos, a lógica *fuzzy*⁴ se torna uma alternativa promissora para sistemas de diagnóstico e análise, uma vez que possui grande capacidade de lidar com incertezas, modelar informações de senso comum e tomar decisões com base em raciocínios que envolvem linguagem natural (ROLIM *et al.*, 2004).

Sendo assim, na sequência alguns fundamentos acerca da lógica *fuzzy* serão abordados. Tendo como intuito elicitare os conceitos e aplicações dessa técnica, que vem sendo desenvolvida e aplicada fortemente nos últimos anos em SEPs para solução de problemas de diagnóstico e classificação de padrões.

⁴**muitas vezes tratada como lógica difusa ou nebulosa.**

3 LÓGICA FUZZY

Antes de se tratar da lógica *fuzzy* de maneira teórica, é preciso compreender o cenário que culminou na sua postulação. Para isso, se faz necessária uma abordagem de alguns aspectos que influenciam de maneira relevante o desenvolvimento e a fundamentação da lógica *fuzzy*.

3.1 O Problema das Incertezas

Formalmente, define-se incerteza como estado de algo incerto, hesitação, qualidade daquilo que incita dúvida(s), variabilidade (HOUAISS *et al.*, 2001).

Ao avaliarmos os grandes avanços nas áreas correlatas à ciência no último século, de imediato, iremos nos surpreender com tamanha gama de novas áreas que surgiram e influenciam o surgimento de novas outras. Para Klir e Yuan (1995) esse crescente aumento, tem se manifestado por intermédio de uma transição gradual de perspectiva, deixando de lado a ideia de que a incerteza é indesejável nos campos da ciência e deve ser evitada à qualquer custo, e passando a considerar que, de uma ótica mais alternativa, a incerteza é algo tolerável e que não há como evitá-la. De acordo com a ótica tradicional, a ciência deve se esforçar e buscar sempre a certeza em todas as suas manifestações (precisão, nitidez, especificidade, consistência), enquanto a incerteza (imprecisão, inconsistência) é considerada algo não-científico. Já para a visão moderna, a incerteza é considerada essencial para a ciência (e não algo indesejável), e desempenha um papel fundamental para o seu desenvolvimento.

Os primeiros passos dessa “visão moderna” se iniciaram em meados do século XIX, quando os físicos da época começaram a considerar determinados processos e fenômenos com uma visão molecular. Embora as leis da mecânica Newtoniana serem precisas e relevantes para as análises, o excesso de dados e informações novas (oriundas das análises moleculares) resultaram em demandas computacionais muito além das disponíveis na época. A necessidade de diferentes abordagens para as análises físicas, levou ao desenvolvimento de métodos estatísticos, que por sua vez, se mostraram úteis não só para a

aplicação no campo dos processos moleculares como também em diversas outras áreas. Nos métodos estatísticos, as manifestações das entidades microscópicas eram substituídas por médias estatísticas que eram relacionadas de forma apropriada com as variáveis microscópicas. O papel desempenhado na mecânica Newtoniana (através do cálculo diferencial e integral), que não considera incertezas, é substituído pela Teoria Probabilística, uma teoria que tem como principal propósito a abordagem de incertezas (KLIR; YUAN, 1995).

Enquanto os métodos analíticos baseados nos conceitos do cálculo diferencial e integral são geralmente aplicados à problemas que envolvem um número pequeno de variáveis e além disso, essas variáveis estão de certa forma relacionadas entre si de forma previsível, a aplicabilidade dos métodos estatísticos possuem característica completamente antagônica: tratam um grande número de variáveis e com alto grau de aleatoriedade, sendo assim, esses dois métodos são visivelmente complementares (KLIR; YUAN, 1995).

Em geral, a maioria dos problemas tratados na engenharia se baseiam em modelos, isto é, representações de sistemas de forma analítica. O propósito de se construir modelos reside na capacidade de se efetuar previsões, estimações acerca do fenômeno ou sistema avaliado. Na elaboração de um modelo, sempre busca-se maximizar sua utilidade. Esse almejo está estritamente conectado com a relação de três características fundamentais de qualquer modelo: **complexidade**, **credibilidade** e **incerteza**. Em relação à incerteza, é sabido que ela desempenha um papel relevante na construção de qualquer modelo. Embora usualmente (mas nem sempre) indesejada quando isolada, a incerteza torna-se útil quando considerada conectada a outras características do modelo: em geral, permitindo um alto grau de incerteza o modelo tende a ser mais simplista e possuir credibilidade adequada Klir e Yuan (1995). Sendo assim, a grande saga na construção de um modelo é a detecção de um ponto ótimo onde a incerteza desempenha um papel benéfico ao sistema completo.

O reconhecimento do papel da incerteza nos processos e sistemas resultou no passo seguinte da visão moderna (discutida há pouco). Esse novo cenário (reconhecendo o papel das incertezas) é caracterizado pelo surgimento de novas teorias relacionadas à incerteza. Essas novas teorias desafiam a conexão, aparentemente única, entre a incerteza e a Teoria Probabilística, que era dada como garantida. Elas foram capazes de mostrar que a Teoria Probabilística pode representar somente um, dos diversos tipos de incerteza (KLIR; YUAN, 1995).

A grande evolução dos conceitos modernos de incerteza se concretizou e se estabeleceu no artigo publicado em 1965 pelo matemático, engenheiro eletricitista e cientista da computação Lotfali Askar Zadeh (mais conhecido por Lotfi A. Zadeh), intitulado *Fuzzy Sets*. Muitos dos conceitos levantados por Zadeh serão vistos na sequência, entretanto, antes disso se faz necessária uma análise lógica dos modos de compreensão e raciocínio que perduraram durante séculos. Trata-se da lógica clássica que foi inicialmente desenvolvida pelo filósofo e pensador grego Aristóteles (384 a.C - 322 a.C) e é muitas vezes referenciada como Lógica Aristotélica.

3.2 Lógica Clássica - Uma Revisão

A lógica clássica é fundamentada com base no conceito de conjunto, no qual um elemento pertence ou não pertence a esse conjunto. A distinção entre pertencer e não pertencer é fortemente definida na lógica clássica, logo, os limites que definem se um elemento pertence ou não ao conjunto são claros e precisos (CHEN; PHAM, 2000).

3.2.1 Conjuntos Clássicos - Conceitos Fundamentais

Definindo um universo de discurso X como uma coleção de objetos (todos possuindo as mesmas características) e, denotando como x um elemento individual desse universo. Além disso, considerando A e B como sendo subconjuntos do universo X , tem-se:

$x \in X$	O elemento x pertence ao conjunto X
$x \in A$	O elemento x pertence ao subconjunto A
$x \notin X$	O elemento x não pertence ao conjunto X
$A \subset B$	O subconjunto A está contido no subconjunto B
$A \subseteq B$	O subconjunto A está contido ou é equivalente ao subconjunto B
$A \equiv B$	O subconjunto A é equivalente ao subconjunto B e vice-versa

Além do mais, define-se como **conjunto nulo** (\emptyset), o conjunto que não contém nenhum elemento (ROSS, 2009).

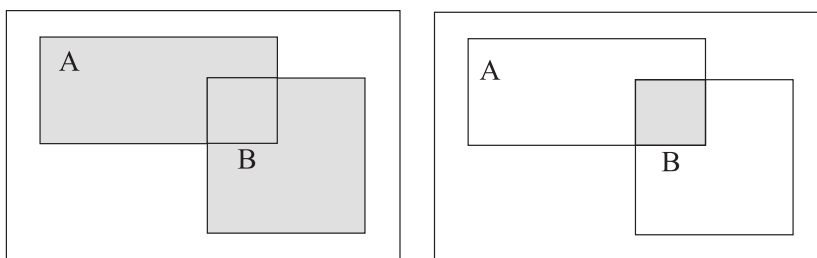
3.2.1.1 Operações com Conjuntos Clássicos

Considerando A e B como dois conjuntos no universo X . A união entre os dois conjuntos é denotada por $A \cup B$ e representa todos os elementos no universo que

residem ou pertencem ao conjunto A e ao conjunto B ou a ambos. A intersecção entre dois conjuntos, denotada $A \cap B$, representa todos os elementos no universo X que residem ou pertencem, simultaneamente, a ambos os conjuntos A e B . O complemento de um conjunto A é denotado por \bar{A} e define um agregado de elementos que não residem no conjunto A . Por fim, a diferença entre um conjunto A e um conjunto B , denotada por $A|B$, define um agregado de elementos no universo que residem no conjunto A mas não residem no conjunto B simultaneamente (ROSS, 2009).

União	$A \cup B = x x \in A \text{ ou } x x \in B$
Intersecção	$A \cap B = x x \in A \text{ e } x x \in B$
Complemento	$\bar{A} = x x \notin A, x \in X$
Diferença	$A B = x x \in A \text{ e } x x \notin B$

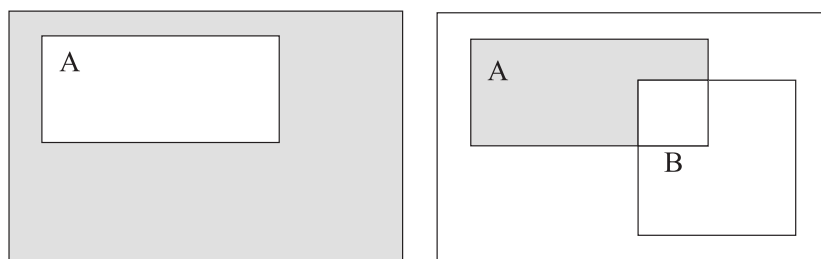
De forma gráfica:



(a) União dos conjuntos A e B . (b) Intersecção dos conjuntos A e B .

Figura 5: Operação entre conjuntos: União e Intersecção.

Fonte: Adaptado de (ROSS, 2009).



(a) Complemento do conjunto A . (b) Diferença entre os conjuntos A e B .

Figura 6: Operação entre conjuntos: Complemento e Diferença.

Fonte: Adaptado de (ROSS, 2009).

3.2.1.2 Propriedades dos Conjuntos Clássicos

Certas propriedades dos conjuntos são de extrema importância pois, influenciam na manipulação matemática quando opera-se com conjuntos. Das inúmeras propriedades, as que mais se destacam são:

Comutatividade	$A \cup B = B \cup A$
	$A \cap B = B \cap A$
Associatividade	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$
	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$
Distributividade	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Idempotência	$A \cup A = A$
	$A \cap A = A$
Identidade	$A \cup \emptyset = A$
	$A \cap X = A$
	$A \cap \emptyset = \emptyset$
	$A \cup X = X$
Transitividade	Se $A \subseteq B$ e $B \subseteq C$, então $A \subseteq C$
Involução	$\overline{\overline{A}} = A$

Além das propriedades acima citadas, existem outras duas que desempenham papel importante na manipulação matemática. São elas: os **Axiomas do Terceiro Excluído**¹ e os **Princípios de De Morgan**. Tais propriedades são fundamentais pois, por exemplo, os Axiomas do Terceiro Excluído são operações válidas nas abordagens clássicas, porém, não se aplicam nos conjuntos *fuzzy*.

Os Axiomas do Terceiro Excluído podem ser divididos em dois:

Axioma do Terceiro Excluído	$A \cup \overline{A} = X$
Axioma da Contradição	$A \cap \overline{A} = \emptyset$

Já os Princípios de De Morgan são extremamente úteis para provar redundâncias (tautologias) e contradições lógicas. Assim como os Axiomas do Terceiro Excluído, os Princípios de De Morgan podem ser divididos em dois:

¹do inglês, *Excluded Middle Axioms*

Princípios de De Morgan	$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$
-------------------------	---

3.2.1.3 Mapeamento dos Conjuntos Clássicos em Funções

O mapeamento é um conceito extremamente importante quando deseja-se relacionar conjuntos com funções. A forma mais trivial de mapeamento consiste em mapear elementos ou subconjuntos de um dado universo de discurso em elementos ou conjuntos em outro universo. Considerando X e Y como sendo dois universos de discurso, distintos, portanto, se um elemento x está contido em X e corresponde a um elemento y que está contido em Y , logo, denomina-se um mapeamento de X em Y ($f : X \rightarrow Y$).

Para os conjuntos clássicos, a função de mapeamento é denominada de **função característica** (χ) e é definida como:

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

Onde χ_A expressa a pertinência de um elemento x em um conjunto A . Essa pertinência reflete o mapeamento de um elemento x em um universo X para um dos dois elementos do universo Y , ou seja, 0 ou 1. A Figura 7 apresenta de forma gráfica esse mapeamento:

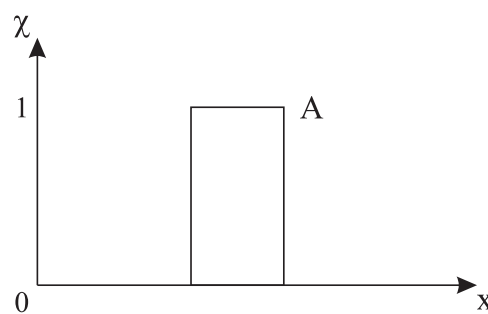


Figura 7: Função de pertinência resultante do mapeamento de um conjunto clássico.

Por definição, ao conjunto nulo (\emptyset) atribui-se a pertinência 0 e, ao conjunto completo, 1.

Com base nos aspectos da função característica, e definindo dois conjuntos A e B , pertencentes ao universo X , pode-se redefinir algumas operações entre os conjuntos, considerando a existência das funções de pertinência de cada conjunto (GUPTA; QI, 1991).

Sendo assim define-se:

União:

$$A \cup B \rightarrow \chi_{A \cup B}(x) = \chi_A(x) \vee \chi_B(x) = \max(\chi_A(x), \chi_B(x)) \quad (2)$$

Intersecção:

$$A \cap B \rightarrow \chi_{A \cap B}(x) = \chi_A(x) \wedge \chi_B(x) = \min(\chi_A(x), \chi_B(x)) \quad (3)$$

Complemento:

$$\bar{A} \rightarrow \chi_{\bar{A}}(x) = 1 - \chi_A(x) \quad (4)$$

Contenção:

$$A \subseteq B \rightarrow \chi_A(x) \leq \chi_B(x) \quad (5)$$

Onde os operadores \vee e \wedge representam as operações de máximo e mínimo, respectivamente. A compreensão dessas operações é de suma importância para o entendimento das operações com conjuntos *fuzzy*.

3.3 Lógica *Fuzzy* - Fundamentos

Formalmente fundamentada em 1965 por Lotfi A. Zadeh, a lógica *fuzzy* tem como principal premissa, lidar com informações imprecisas. A principal mudança no tratamento de informações na lógica *fuzzy*, em relação a lógica Aristotélica (verdadeiro ou falso, não podendo assumir dualidade) é a de lidar com os dados de maneira semântica, ou seja, substituindo números por expressões linguísticas, e dessa forma dando peso (grau de pertinência) para as informações. Seguindo os estudos de lógica multinível já idealizados no passado por Max Black e Jan Lukasiewicz, em seu artigo intitulado: *Fuzzy Sets*, Zadeh, em 1965, postulou os conceitos de conjuntos *fuzzy* (COX, 1994).

Nos conjuntos clássicos², a transição que define se um elemento qualquer pertence ou não a um certo conjunto é dada de forma abrupta e bem definida (como pode ser visto na Figura 7). Em contrapartida, para elementos contidos em universos baseados nas premissas *fuzzy* essa transição pode ser gradual. Essa transição gradual pode ser correlacionada com o fato de que os limites dos conjuntos *fuzzy* são imprecisos (ZADEH, 1965; ROSS, 2009). Sendo assim, um conjunto *fuzzy* é um conjunto cujos elementos possuem variação no grau de pertinência no conjunto (essa ideia se opõe completamente à ideia dos conjuntos clássicos, onde para um elemento ser considerado membro de um determinado conjunto, sua pertinência deve ser completa) (ZADEH, 1965).

Os elementos de um conjunto *fuzzy* são mapeados de forma análoga aos elementos dos conjuntos clássicos, ou seja, através de uma função característica que é conhecida como **função de pertinência** (μ) (ZADEH, 1965). Portanto, dado um elemento qualquer x pertencente ao conjunto *fuzzy* \underline{A} o mapeamento do conjunto *fuzzy* é:

$$\mu_{\underline{A}}(x) \in [0, 1] \quad (6)$$

A Figura 8 mostra o mapeamento do conjunto *fuzzy*.

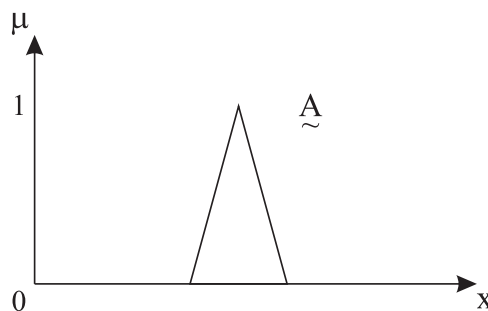


Figura 8: Função de pertinência resultante do mapeamento de um conjunto *fuzzy*.

Diferentemente da lógica clássica, existem diversas funções resultantes do mapeamento dos conjuntos *fuzzy*, ou seja, diversos são os tipos de funções de pertinência existentes na abordagem *fuzzy* (COX, 1994).

²muitas vezes, os conjuntos clássicos são tidos como um caso especial dos conjuntos *fuzzy* (ROSS, 2009).

3.3.1 Operações com Conjuntos *Fuzzy*

Como dito anteriormente, antes de Zadeh, alguns pensadores já buscavam uma compreensão do universo através de uma lógica multinível. Na verdade, por meio de uma análise cronológica, se torna possível observar que os conceitos de lógica multinível foram sendo expandidos, sempre partindo dos conceitos da lógica clássica.

Por exemplo, a lógica *Booleana*, desenvolvida pelo matemático George Boole, é um exemplo claro de lógica bivalente (fundamentada fortemente através da lógica Aristotélica), ou seja, a lógica *Booleana* é formalmente tratada como lógica clássica. Na lógica desenvolvida por Boole, existem apenas três operadores lógicos básicos: o operador de **negação**³ (\neg), o operador **e**⁴ (\wedge) e o operador **ou**⁵ (\vee). Para a lógica bivalente, o resultado é sempre ou **verdadeiro** ou **falso**. Entretanto, com o passar do tempo, muitos pensadores sentiram a necessidade de expandir essa bivalência encontrada na lógica *Booleana*. Desta forma, desenvolveu-se a lógica trivalente, onde agora a resposta pode assumir além de **verdadeira** ou **falsa**, também o estado de **nem uma, nem outra** (COX, 1994).

Motivado por essa evolução no tratamento das informações, nos anos 30, Lukasiewicz iniciou alguns trabalhos adotando uma lógica n -valente⁶ (permitindo $n \rightarrow \infty$).

A fundamentação da lógica n -valente se sustentou com base nos conceitos da lógica clássica, sendo assim, a compreensão da teoria dos conjuntos *fuzzy* elaborada por Zadeh pode ser elucidada através de uma comparação isomórfica entre os conceitos lógicos. A Tabela 1 apresenta tal comparação.

Como dito, Lukasiewicz iniciou alguns trabalhos que abordavam conceitos de uma lógica n -valente, logo, uma vez fundamentada a lógica bivalente, a extrapolação para ordens superiores se fazia possível. Sendo assim, inicialmente fundamentou-se a lógica trivalente que permitia além da **verdade**, a **falsidade** e a **indeterminação** (1, 0 e $1/2$, respectivamente). Uma vez aceita a relevância da lógica trivalente, automaticamente, a extensão da mesma para valores onde $3 \leq n < \infty$ se tornou coerente.

A lógica n -valente desenvolvida por Lukasiewicz em meados de 1930 utilizava somente dois operadores lógicos: o operador de **negação** (\neg) e o operador de **implicação** (\Rightarrow)(CHEN; PHAM, 2000).

³do inglês, *not*.

⁴do inglês, *and*.

⁵do inglês, *or*.

⁶para muitos, a lógica *fuzzy* é um gênero da lógica n -valente (muitas vezes conhecida como lógica Zadeh-Lukasiewicz com $n = \infty$) (CHEN; PHAM, 2000).

Tabela 1: Isomorfismo entre Teoria dos Conjuntos Clássicos, Álgebra Booleana e Lógica Bivalente.

Teoria dos Conjuntos Clássicos	Álgebra Booleana	Lógica Bivalente
\cup	$+$	\vee
\cap	\cdot	\wedge
$-$	$-$	\neg
S	1	V
\emptyset	0	F
\subset	$<$	\Rightarrow
$=$	$=$	\Leftrightarrow

Fonte: Adaptado de (CHEN; PHAM, 2000).

Para desenvolver a teoria acerca das operações com conjuntos *fuzzy*, Zadeh utilizou os conceitos de lógica n -valente com $2 \leq n < \infty$ e garantiu que a mesma fosse isomorfa tanto na teoria dos conjuntos *fuzzy*, quanto na teoria da lógica bivalente. Para isso, modificou a lógica de Lukasiewicz e definiu uma lógica de valor infinito, estabelecendo, assim como nas operações com os conjuntos clássicos, as **operações básicas fuzzy**. Dado dois conjuntos *fuzzy* \underline{A} e \underline{B} em um universo X , tem-se:

União:

$$\underline{A} \cup \underline{B} \rightarrow \mu_{\underline{A} \cup \underline{B}}(x) = \mu_{\underline{A}}(x) \vee \mu_{\underline{B}}(x) \quad (7)$$

Intersecção:

$$\underline{A} \cap \underline{B} \rightarrow \mu_{\underline{A} \cap \underline{B}}(x) = \mu_{\underline{A}}(x) \wedge \mu_{\underline{B}}(x) \quad (8)$$

Complemento:

$$\overline{\underline{A}} \rightarrow \mu_{\overline{\underline{A}}}(x) = 1 - \mu_{\underline{A}}(x) \quad (9)$$

Da mesma forma que nos conjuntos clássicos, a pertinência de elemento qualquer x no conjunto nulo (\emptyset) é 0 e, a em um conjunto completo, é 1.

A Figura 9 apresenta, de forma gráfica, o conceito por de trás das operações básicas entre conjuntos *fuzzy*.

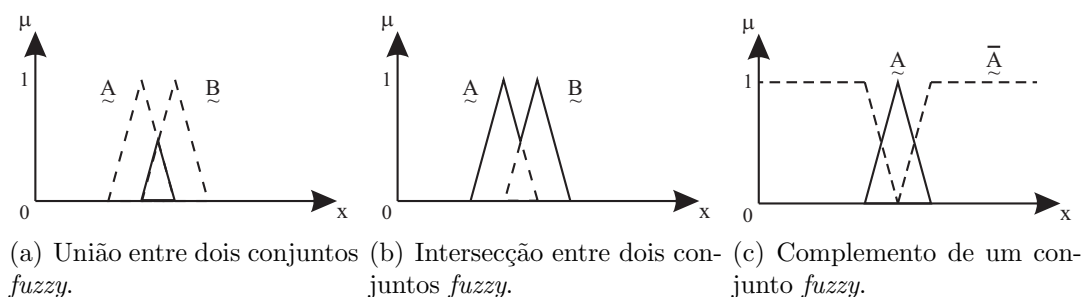


Figura 9: Operações básicas entre conjuntos fuzzy.

3.3.2 Propriedades dos Conjuntos Fuzzy

Assim como na teoria dos conjuntos clássicos, as propriedades de comutatividade, associatividade, distributividade, idempotência e involução se mantêm iguais para os conjuntos *fuzzy*. Além disso, os Princípios de De Morgan também se mantêm iguais, bem como os conceitos de conjunto nulo e conjunto completo são análogos aos conceitos de relação nulo (**O**) e relação completa (**E**). Entretanto, a grande diferença entre os conjuntos clássicos e os conjuntos *fuzzy* se evidencia na definição dos Axiomas do Terceiro Excluído. Considerando que uma relação *fuzzy* \underline{R} que também é um conjunto *fuzzy*, há uma sobreposição entre a relação e o seu complemento, isto é:

$$\underline{R} \cup \overline{\underline{R}} \neq \mathbf{E} \quad (10)$$

$$\underline{R} \cap \overline{\underline{R}} \neq \mathbf{O} \quad (11)$$

Ou seja, por definição, os Axiomas do Terceiro Excluído para relações *fuzzy* não implicam, em geral, na relação nula e na relação completa (ROSS, 2009).

3.3.3 Funções de Pertinência

Como dito anteriormente, uma função de pertinência é, fundamentalmente, a resultante do mapeamento dos conjuntos *fuzzy* dentro de um determinado universo de discurso.

Funções de pertinência representam as características fundamentais de um sistema *fuzzy*, ou seja, todas as ações teóricas e práticas do sistema. Uma função de pertinência é uma função numérica (gráfica ou tabulada) que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável qualquer (dentro de um determinado universo

de discurso) (SIMÕES; SHAW, 2007).

Em relação à caracterização das funções de pertinência, se faz relevante a definição de um formalismo léxico buscando uniformizar as características gerais de uma função de pertinência (ROSS, 2009).

Dado um conjunto *fuzzy* \underline{A} , define-se como **núcleo** da função de pertinência desse conjunto, a região definida pela pertinência plena (completa) ao conjunto \underline{A} , ou seja, o núcleo representa a região onde, dado um elemento qualquer x obtenha-se $\mu_{\underline{A}}(x) = 1$. Já a **sustentação** da função de pertinência é definida como a região cuja pertinência é não nula em relação ao conjunto \underline{A} , em outras palavras, dado um elemento x , a sustentação da função de pertinência é definida por $\mu_{\underline{A}}(x) > 0$. Por fim, define-se como **fronteira** de uma função de pertinência a região que contém elementos que possuem pertinência não nula, entretanto, não completas em relação ao conjunto \underline{A} , ou seja, a fronteira compreende a zona onde, dado um elemento x , $0 < \mu_{\underline{A}}(x) < 1$ (ROSS, 2009).

A Figura 10 apresenta tais características:

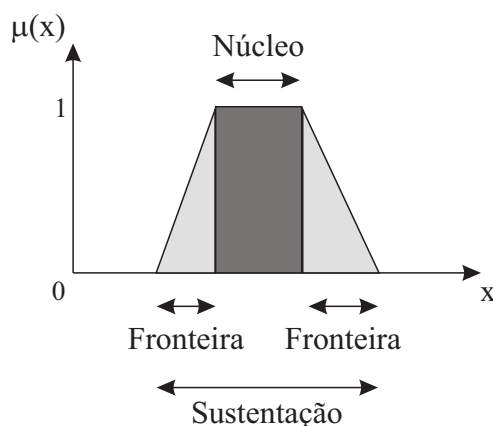


Figura 10: Caracterização de uma função de pertinência.

Fonte: Adaptado de (CHEN; PHAM, 2000).

Embora a função de pertinência apresentada na Figura 10 ser do tipo trapezoidal, não implica na obrigatoriedade dessa utilização. Optou-se por esse formato justamente para fins de ilustração das regiões típicas das funções de pertinência.

Vale ressaltar que a quantidade de funções em um universo de discurso, bem como o formato das mesmas, são determinados de acordo com a experiência, na natureza do processo ou evento a ser avaliado. De modo geral, a determinação da função de pertinência não é uma tarefa trivial (SIMÕES; SHAW, 2007). Ainda em relação aos formatos

das funções de pertinência, fundamentalmente se baseiam em algumas funções básicas, que são: Funções Lineares, Distribuição Gaussiana, Curva Sigmoidal e Curvas Polinomiais (GUPTA; QI, 1991).

Frequentemente, utiliza-se (para a grande maioria dos processos) funções de pertinência do tipo triangular e trapezoidal (por apresentarem simplicidade de elaboração e manuseio). Entretanto, existem diversos outros formatos de emprego das funções de pertinência. Na sequência, definem-se, alguns desses formatos.

3.3.3.1 Tipos de Funções de Pertinência

Como dito, vários são os formatos das funções de pertinência. Entretanto, alguns se destacam perante os demais. A Figura 11 apresenta os principais formatos de funções de pertinência encontrados na literatura (COX, 1994):

A função de pertinência triangular é apresentada na Figura 11(a) e é obtida através do seguinte mapeamento de um determinado elemento x :

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (12)$$

Onde os parâmetros a e c definem os pontos mínimos da função, enquanto o parâmetro b indica o valor cujo a função atinge a pertinência máxima, isto é, 1 (GUPTA; QI, 1991; MATLAB, 2014).

Já a Figura 11(b) mostra um função trapezoidal típica, onde os parâmetros a e d definem os pontos cuja pertinência é nula, enquanto os parâmetros b e c definem os pontos cuja pertinência é máxima. O mapeamento de uma função de pertinência trapezoidal é definido da seguinte maneira:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (13)$$

Nota-se que a Equação 13 é uma extensão da Equação 12, onde a região cuja

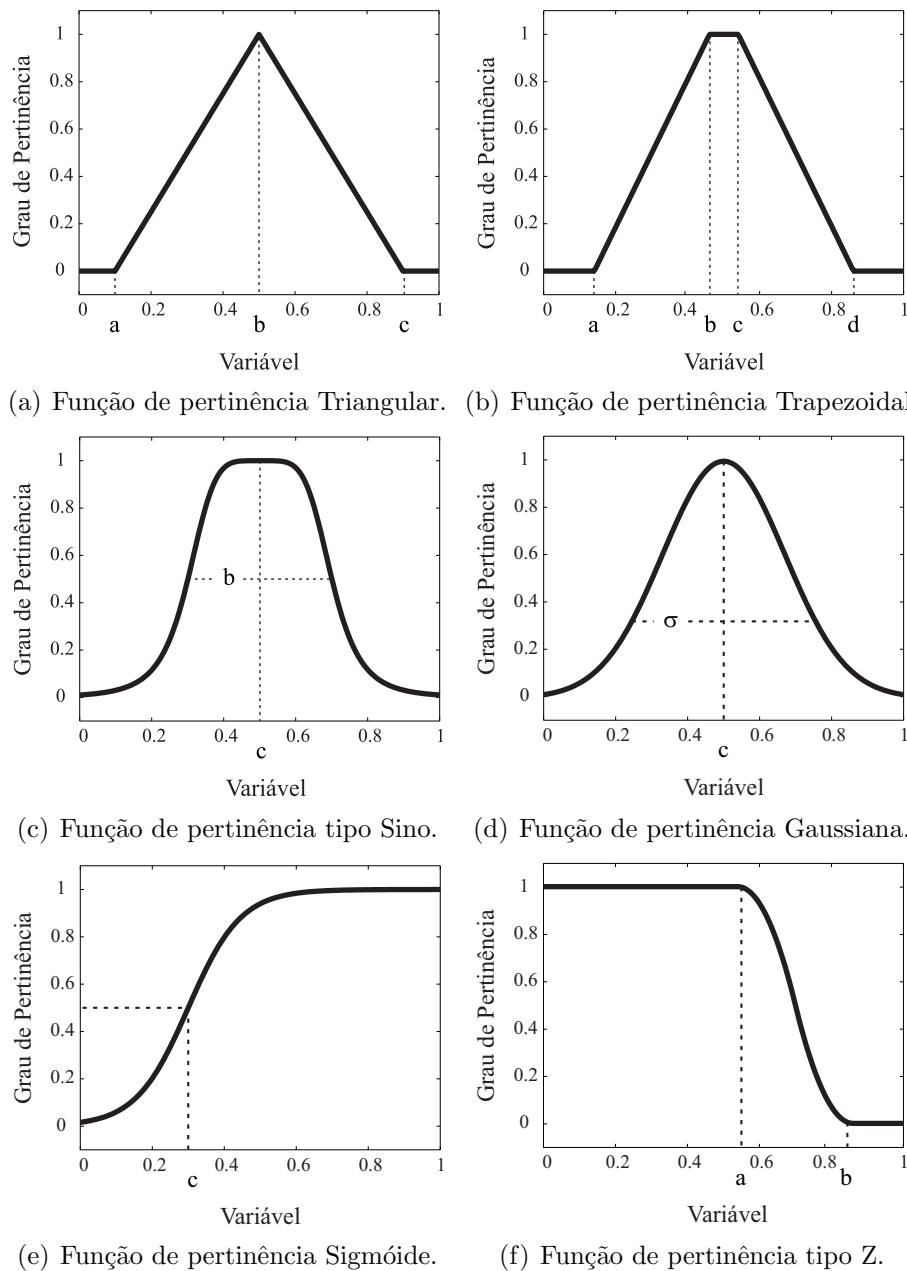


Figura 11: Tipos de funções de pertinência.

pertinência é completa é definida pelo intervalo $[b, c]$ e não mais pontualmente (como no caso da função triangular) (GUPTA; QI, 1991; MATLAB, 2014).

A Figura 11(c) representa um tipo de função de pertinência chamado de **Função Sino**, que é definida pelo seguinte mapeamento:

$$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}, \quad b > 0 \quad (14)$$

Onde o parâmetro a define a largura da curva (e usualmente coincide com o

ponto cuja pertinência equivale a 0.5), enquanto o parâmetro c define o centro da curva (GUPTA; QI, 1991; MATLAB, 2014).

Muito semelhante à função sino, a Figura 11(d) mostra a **Função Gaussiana** que é obtida por intermédio da seguinte expressão:

$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (15)$$

Onde os parâmetros σ e c representam o desvio padrão e a média da função, respectivamente (GUPTA; QI, 1991; MATLAB, 2014). Nota-se que essa função é nada mais que a curva da distribuição Gaussiana.

A Figura 11(e) apresenta a função de pertinência do tipo Sigmóide que pode ser obtida através do seguinte mapeamento:

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (16)$$

O sinal do parâmetro a define a abertura da sigmóide, ou seja, para valores positivos de a a curva apresenta uma abertura para a direita (como é o caso da Figura 11(e)), já para valores negativos de a essa abertura se inverte. O parâmetro c define o valor cuja pertinência é de 0.5 (GUPTA; QI, 1991; MATLAB, 2014).

Por fim, um outro tipo de função de pertinência é apresentado na Figura 11(f), trata-se de uma função de pertinência do tipo Z que pode ser obtida da seguinte forma:

$$f(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (17)$$

Onde os parâmetros a e b definem os extremos da curva de inclinação (GUPTA; QI, 1991; MATLAB, 2014).

Nota-se que todas as funções de pertinência aqui apresentadas dependem de determinados parâmetros (que definem suas formas). Esses parâmetros são geralmente obtidos por meio da experiência e do conhecimento humano (GUPTA; QI, 1991).

3.3.4 Fuzzificação

A Fuzzificação⁷ é o processo que mapeia, do domínio dos números reais para o domínio dos números *fuzzy*, determinada informação (SIMÕES; SHAW, 2007). Em outras palavras, o processo de fuzzificação trata as informações analíticas sob uma perspectiva semântica. Fundamentalmente, o processo aborda o filosofia de que as informações não são puramente determinísticas e sim, possuem incertezas, ambiguidades e imprecisões. Sendo assim, requerem uma abordagem alternativa, que é alcançada por intermédio do tratamento via funções de pertinência (ROSS, 2009). A fuzzificação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes, reduzindo significativamente o número de informações a serem processadas.

A fuzzificação, ou seja, a modelagem das informações dentro dos conceitos dos conjuntos *fuzzy*, na maioria das vezes, é obtida através da experiência humana em um determinado processo, ou seja, depende dos conhecimentos de um especialista na área de interesse (SIMÕES; SHAW, 2007).

Como abordado anteriormente (na Seção 3.3.3.1), diversas são as formas de obter uma modelagem das informações dentro do formalismo dos conjuntos *fuzzy*, novamente, a escolha pela melhor abordagem irá depender, principalmente, do conhecimento por de trás do processo a ser analisado.

3.3.5 Sistema de Inferência *Fuzzy*

Linguisticamente, define-se inferência como o ato ou efeito de inferir. Ou ainda, como uma consequência, dedução (HOUAISS *et al.*, 2001).

Um Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF) é um mecanismo responsável por correlacionar regras e informações. Uma vez modeladas as informações referentes ao sistema, é na etapa de inferência onde, de fato, ocorre o raciocínio lógico do sistema *fuzzy*.

De forma simplista, um sistema de inferência⁸ se baseia na fundamentação teórica para efetuar o raciocínio sobre proposições imprecisas e por isso, é muitas vezes caracterizado como etapa de **raciocínio aproximado** (ZADEH, 1975). Esse raciocínio aproximado é análogo à inferência clássica para proposições precisas (ROSS, 2009).

Majoritariamente, um sistema de inferência é baseado em regras que corre-

⁷do inglês, *Fuzzification*.

⁸muitas vezes chamado de máquina de inferência.

lacionam informações **antecedentes** e **consequentes**, ou seja, baseia-se na lógica **SE-ENTÃO**⁹ (ROSS, 2009). De outra ótica, essas informações antecedentes e consequentes podem ser analisadas como entradas e saídas (respectivamente) de um sistema qualquer, sendo assim, pode-se considerar que, a inferência se baseia em operações entre universos de discurso diferentes (é justamente esse fato que permite a construção de uma base de conhecimento para o sistema) (SIMÕES; SHAW, 2007). Considerando $\underline{A}(u)$ como um conjunto informações de entrada em um universo qualquer U ($\underline{A}(u) \in U$), pode-se relacionar a entrada com uma saída qualquer $\underline{B}(v)$ pertencente a um universo distinto V ($\underline{B}(v) \in V$), através da seguinte expressão condicional de inferência:

$$\underline{A} \Rightarrow \underline{B} \quad (18)$$

A Equação 18 define a ligação do conjunto \underline{A} (por intermédio de um vetor de pertinência $\mu_{\underline{A}}(u)$), dito **antecedente**, ao conjunto \underline{B} (definido por seu vetor de pertinências $\mu_{\underline{B}}(u)$), dito **consequente**. Que é equivalente a **SE** $\underline{A}(u)$ **ENTÃO** $\underline{B}(v)$ (SIMÕES; SHAW, 2007).

3.3.5.1 Operadores de Implicação

Como visto, a inferência é responsável por correlacionar informações de entrada de um sistema com as respectivas saída do mesmo, ou seja, correlacionar dois conjuntos *fuzzy* distintos e pertencentes a universos de discurso diferentes. Para isso, deve haver uma determinada implicação entre as informações, isto é, uma operação lógica que executa tal tarefa (ROSS, 2009). As duas formas de implicação (ou composição) mais comuns são:

1. Composição *máximo-mínimo* (*máx-mín*);
2. Composição *máximo-produto* (*máx-produto*).

Em geral, as relações *fuzzy* se dão fundamentalmente baseadas em conjuntos, sendo assim, se faz válida a definição do **Produto Cartesiano**, afinal, é essa operação responsável pela correlação entre conjuntos *fuzzy*. Considerando um conjunto *fuzzy* qualquer \underline{A} pertencente ao universo de discurso X e \underline{B} como sendo um conjunto *fuzzy* pertencente ao universo Y , o produto cartesiano entre os conjuntos \underline{A} e \underline{B} resulta em uma relação *fuzzy* \underline{R} (que contém o produto cartesiano dos referentes conjuntos), em outras palavras:

⁹do inglês, **IF-THEN**.

$$\underline{A} \times \underline{B} = \underline{R} \subset X \times Y \quad (19)$$

Onde a relação *fuzzy* \underline{R} possui a seguinte função de pertinência:

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \mu_{\underline{A} \times \underline{B}}(x, y) = \min(\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(y)) \quad (20)$$

Vale ressaltar que o produto cartesiano **não** é a mesma operação que o produto aritmético (ZADEH, 1975).

Outro aspecto importante para compreensão das operações de implicação é o de **Conjuntos Condicionados**. Um conjunto $\underline{B}(y)$ contido em um universo qualquer E_2 é dito condicionado em E_1 se sua função de pertinência $\mu_{\underline{B}}$ depender de um parâmetro x , que por sua vez é elemento do universo E_1 ($x \in E_1$). Sendo assim:

$$\mu_{\underline{B}}(y/x) \quad (21)$$

Onde $x \in E_1$ e $y \in E_2$. A noção de conjunto condicionado é análoga à noção de uma função (SIMÕES; SHAW, 2007).

Sendo assim, a função de pertinência condicionada da Equação 21 define um mapeamento do espaço E_1 no espaço E_2 . Ou seja, o conjunto *fuzzy* $A \subset E_1$ irá induzir outro conjunto *fuzzy* $B \subset E_2$ cuja função de pertinência será $\mu_{\underline{B}}(y/x)$. Se x pertencer a um conjunto $\underline{A}(x) \subset E_1$, e adicionalmente $\underline{B}(y) \subset E_2$ e $\underline{R}(x, y) \subset E_1 \times E_2$, então:

$$\underline{B}(y) = \underline{A}(x) \circ \underline{R}(x, y) \quad (22)$$

Onde o operador \circ é chamado de operador composicional que indica uma operação generalizada (SIMÕES; SHAW, 2007).

A Equação 22 é chamada de **regra composicional de inferência**. Por fim, tendo esses conceitos fundamentados, pode-se definir as duas operações básicas de implicação:

$$\mu_{\underline{B}}(y) = \max \left\{ \min \left[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{R}}(x, y) \right] \right\} \quad (23)$$

A Equação 23 define a operação composicional de *máx-mín*. Já a Equação 24 representa a operação composicional do *máx-produto*:

$$\mu_{\underline{B}}(y) = \text{máx} \left\{ \mu_{\underline{A}}(x) \cdot \mu_{\underline{R}}(x, y) \right\} \quad (24)$$

Além desses dois métodos acima abordados (que por sinal são os mais utilizados), existem outros operadores de implicação que se baseiam no mesmo fundamento de correlação ($\underline{R} = \underline{A} \Rightarrow \underline{B}$), são alguns deles:

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \text{máx} \left[\mu_{\underline{B}}(y), 1 - \mu_{\underline{A}}(x) \right] \quad (25)$$

O operador da Equação 25 é muito similar ao operador clássico de implicação proposto por Zadeh em 1975 (ZADEH, 1975).

Já o operador da Equação 26 é conhecido como **Operador de Implicação de Mamdani** (desenvolvido em 1976 por Ebrahim Mamdani).

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \text{mín} \left[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(y) \right] \quad (26)$$

Outro operador de correlação é o **Operador de Implicação de Lukasiewicz** que pode ser visto na Equação 27:

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \text{mín} \left[1, 1 - \mu_{\underline{A}}(x) + \mu_{\underline{B}}(y) \right] \quad (27)$$

Por fim, um outro importante operador é o **Operador de Implicação do Produto Correlacionado**¹⁰ e é descrito por:

$$\mu_{\underline{R}}(x, y) = \mu_{\underline{A}}(x) \cdot \mu_{\underline{B}}(y) \quad (28)$$

3.3.5.2 Tratamento das Regras e Métodos Gráficos de Inferência

Dentro do vasto campo da inteligência artificial, diversos são os métodos de se representar o conhecimento. Entretanto, o método mais comum baseia-se na representação do conhecimento humano através de um conjunto de regras baseado, fundamentalmente, em linguagem natural, do tipo:

SE *premissa*¹¹, **ENTÃO** *conclusão*¹²

¹⁰do inglês, *Correlation-Product Implication*

¹¹chamada de termo antecedente.

¹²chamado de termo consequente.

Como já discutido, a sentença mostrada acima é muitas vezes referenciada com forma SE-ENTÃO de dedução. Esse método de dedução geralmente expressa uma inferência a partir do conhecimento de um fato (premissa, hipótese), gerando assim uma conclusão. Essa forma de raciocínio é apropriada, no contexto linguístico, pois permite a expressão do conhecimento empírico e heurístico dos seres humanos (se baseia na nossa própria linguagem de comunicação) (ROSS, 2009).

Com base no que foi visto em relação aos conectivos lógicos utilizados para inferência de conjuntos *fuzzy* e nos conceitos do método SE-ENTÃO de raciocínio, pode-se definir as linhas de raciocínio mais frequentes em sistemas de inferência *fuzzy*.

Tendo \underline{A} e \underline{B} como conjuntos *fuzzy* possuidores de informações referentes à entrada e saída, respectivamente, de um determinado sistema e x e y como elementos de \underline{A} e \underline{B} ($x \in \underline{A}$ e $y \in \underline{B}$), pode-se definir como **Operação Conjuntiva de Múltiplos Antecedentes** a seguinte expressão linguística:

$$\text{SE } x \text{ é } \underline{A}^1 \text{ E } \underline{A}^2, \dots, \underline{A}^n \text{ ENTÃO } y \text{ é } \underline{B}^s \quad (29)$$

Assumindo que $\underline{A}^s = \underline{A}^1 \cap \underline{A}^2 \cap \dots \cap \underline{A}^n$ e considerando a expressão através de funções de pertinência:

$$\mu_{\underline{A}^s}(x) = \text{mín} [\underline{A}^1(x), \underline{A}^2(x), \dots, \underline{A}^n(x)] \quad (30)$$

Logo, baseado na definição da operação de intersecção entre conjuntos *fuzzy*, ganha-se:

$$\text{SE } x \text{ é } \underline{A}^s \text{ ENTÃO } y \text{ é } \underline{B}^s \quad (31)$$

Analogamente, define-se como **Operação Disjuntiva de Múltiplos Antecedentes** a seguinte expressão linguística:

$$\text{SE } x \text{ é } \underline{A}^1 \text{ OU } \underline{A}^2, \dots, \text{OU } \underline{A}^n \text{ ENTÃO } y \text{ é } \underline{B}^s \quad (32)$$

Que, se manipulada obedecendo $\underline{A}^s = \underline{A}^1 \cup \underline{A}^2 \cup \dots \cup \underline{A}^n$ e dispondo da definição de união entre conjuntos *fuzzy*, obtém-se:

$$\mu_{\underline{A}^s}(x) = \text{máx} [\underline{A}^1(x), \underline{A}^2(x), \dots, \underline{A}^n(x)] \quad (33)$$

A maioria dos sistemas baseados em regras envolvem mais de uma regra, sendo assim, o processo para busca de uma conclusão global (baseado nas conclusões individuais de cada regra) se baseia em uma estratégia de agregação desses valores individuais (ROSS, 2009). A Tabela 2 apresenta os métodos que mais se destacam, na literatura:

Tabela 2: Principais estratégias de agregação global de conclusões.

Operador	Agregação Global	Operação entre Conjuntos
Conjuntivo	$y = y^1 \text{ e } y^2 \text{ e, } \dots, y^m$	$y = y^1 \cap y^2 \cap, \dots, y^m$
Disjuntivo	$y = y^1 \text{ ou } y^2 \text{ ou, } \dots, y^m$	$y = y^1 \cup y^2 \cup, \dots, y^m$

Na agregação conjuntiva, todas as regras são conectadas pelo operador lógico \mathbf{e}^{13} , ou seja, a saída global y é resultante da intersecção de todas as i -ésimas saídas individuais ($i = 1, 2, 3, \dots, m$). A função de pertinência resultante para a saída global é expressa por:

$$\mu_y(y) = \text{mín} [\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^m}(y)] \quad (34)$$

De forma similar, na agregação disjuntiva, as regras são unidas pelo operador lógico \mathbf{ou}^{14} , isto é, o saída global depende da união dos i -ésimas saídas individuais:

$$\mu_y(y) = \text{máx} [\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^m}(y)] \quad (35)$$

Até então foram abordados procedimentos matemáticos para as operações de inferência e agrupamento de conjuntos *fuzzy* (os quais são implementados computacionalmente para solução de sistemas), entretanto, muitas vezes se torna interessante, para fim de inspecionar o sistema *fuzzy*, uma abordagem manual contendo poucas regras, visando verificar as operações de inferência do sistema e assim avaliar a eficácia do mesmo. Além do mais, outro método alternativo (que será abordado no tópico seguinte) se baseia na construção de matrizes de correlação, porém, para sistemas *fuzzy* com um número considerável de variáveis antecedentes e consequentes a compreensão dessas matrizes não é tarefa trivial, uma vez que a ordem dessas matrizes é diretamente afetada pelo tamanho estrutural do sistema *fuzzy* (COX, 1994).

Com base nesses aspectos, alguns especialistas em lógica *fuzzy* propuseram métodos gráficos de inferência que tem como papel emular o funcionamento global do

¹³**and.**

¹⁴**or.**

sistema com base em um pequeno número de regras e restrições (ROSS, 2009). Três métodos gráficos destacam-se na literatura, são eles:

1. Método de Mamdani;
2. Método de Sugeno;
3. Método de Tsukamoto.

O primeiro método (e mais utilizado) foi proposto por Mamdani¹⁵ e Assilian em 1975. Para compreensão do método, considerado um sistema hipotético contendo duas regras de inferência (onde x_1 e x_2 são os termos antecedentes do sistema, enquanto y é o termo consequente). A Figura 12 apresenta o sistema abordado:

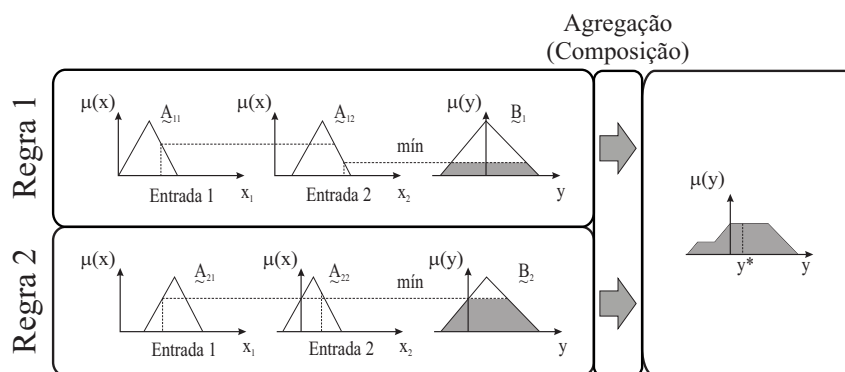


Figura 12: Método gráfico de Mamdani (Operador de inferência máx-mín).

Fonte: Adaptado de (ROSS, 2009).

Como dito, no exemplo da Figura 12 é utilizado o operador de inferência *máx-mín*. Nesse sistema, A_{11} e A_{12} representam o primeiro e o segundo antecedente da primeira regra, bem como A_{21} e A_{22} referem-se à segunda regra. Logo, de acordo com a Equação 26 e considerando o operador disjuntivo de agregação global, tem-se que:

$$\mu_{\tilde{B}^k}(y) = \underset{k}{\text{máx}} \left[\underset{k}{\text{mín}} \left[\mu_{\tilde{A}_1^k}(\text{Entrada 1}), \mu_{\tilde{A}_2^k}(\text{Entrada 2}) \right] \right], \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (36)$$

Onde r é o número de antecedentes que compõe o sistema *fuzzy*. A função *mín* na Equação 36 é utilizada uma vez que os termos antecedentes e consequentes são conectados por meio do operador lógico **e**. Basicamente, o valor mínimo da função de

¹⁵a abordagem completa pode ser vista em (MAMDANI; ASSILIAN, 1975).

pertinência dos termos antecedentes se propaga para o termo conseqüente e, ocorre, um truncamento da função de pertinência do termo conseqüente. Por fim, as funções de pertinência truncadas são agregadas com base nos conceitos de conjunção ou disjunção (ver Tabela 2).

Como no caso da Figura 12 é utilizado o operador de disjunção, logo, o operador de agregação é o operador *máx*. Conclusivamente, na função de pertinência resultante ao método de inferência acima descrito pode-se aplicar alguma método de defuzzificação (que serão abordados na seção seguinte) resultando assim em um ponto referente à solução da inferência (y^*) (ROSS, 2009).

Uma outra variação do método de Mamdani pode ser obtida ao utilizar-se como operação de inferência o método do *máx-produto*. A Figura 13 apresenta tal abordagem:

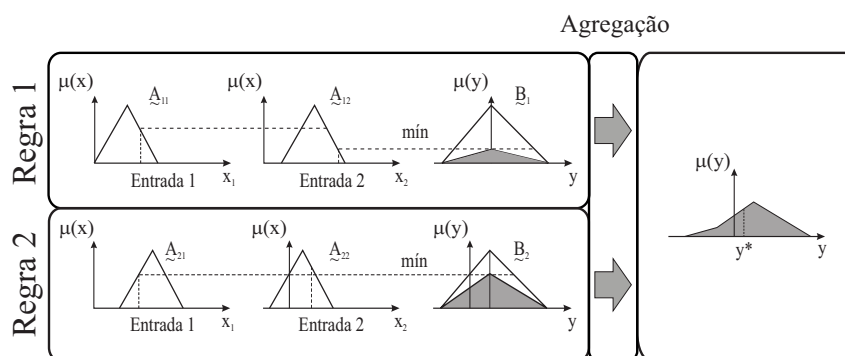


Figura 13: Método gráfico de Mamdani (Operador de inferência *máx-produto*).

Fonte: Adaptado de (ROSS, 2009).

Ainda considerando uma operação disjuntiva entre os conjuntos, a saída agregada do sistema para r regras pode ser expressa por (de acordo com a Equação 28):

$$\mu_{\tilde{B}^k}(y) = \underset{k}{\text{máx}} \left[\mu_{\tilde{A}_1^k}(\text{Entrada 1}) \cdot \mu_{\tilde{A}_2^k}(\text{Entrada 2}) \right], \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (37)$$

O resultado da Equação 37 pode ser visto na Figura 13 onde, diferentemente da Figura 12, o resultado não é truncado pela ação de inferência (como pode ser visto pela forma triangular resultante da inferência) (ROSS, 2009).

Analogamente, com base na função de pertinência resultante da Figura 13, a conclusão do sistema é obtida através da defuzzificação função de pertinência resultante da agregação global do sistema.

Existem diversas variações do método de Mamdani (diferentes métodos conectivos entre termos antecedentes, diferentes métodos de agregação e defuzzificação), entretanto, os exemplos acima citados aparecem em grande parte das aplicações em sistemas *fuzzy* (ROSS, 2009).

O segundo método gráfico de inferência é também conhecido como **Método TSK** (em homenagem aos trabalhos de Takagi e Sugeno e também de Sugeno e Kang desenvolvidos em 1985 e 1988, respectivamente¹⁶).

O método de Sugeno se baseia na busca de uma função polinomial ($z = f(x, y)$) para os termos consequentes. Fato esse que faz com que a utilização deste método não requira a etapa de defuzzificação da função de pertinência resultante (uma vez que função polinomial já pertence ao conjunto *crisp*) (ROSS, 2009).

A Figura 14 mostra de forma simplificada o método gráfico de Sugeno.

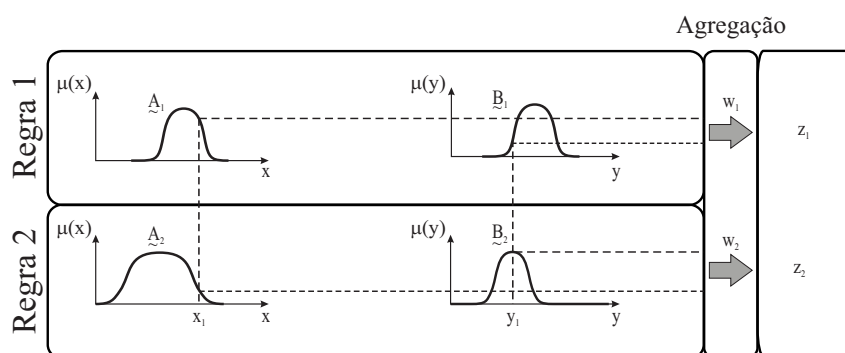


Figura 14: Método gráfico de Sugeno.

Fonte: Adaptado de (ROSS, 2009).

No método de Sugeno, cada regra possui uma saída *crisp* que é dada por uma função específica:

$$z_1 = \mu(x_1)x_1 + \mu(y_1)y_1 \quad (38)$$

$$z_2 = \mu(x_2)x_2 + \mu(y_2)y_2 \quad (39)$$

Logo, a saída global do sistema é obtida através de uma média ponderada (que desempenha o papel direto de defuzzificação) (ROSS, 2009). Para o sistema da Figura 14, a solução do sistema é obtida através da seguinte expressão:

¹⁶para maior aprofundamento, buscar (TAKAGI; SUGENO, 1985; SUGENO; KANG, 1988).

$$z = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \quad (40)$$

Onde w_1 e w_2 são os pesos referentes ao processo de agregação (composição *máx-mín*, *máx-produto*, etc.).

Por fim, o terceiro método gráfico de inferência foi proposto por Tsukamoto em 1979 e se baseia na obtenção de funções monotônicas específicas para os termos consequentes de cada regra, essas funções monotônicas são também conhecidas como *shoulder functions* e são representadas na Figuras 15 pelos conjuntos \underline{C}_1 e \underline{C}_2 .

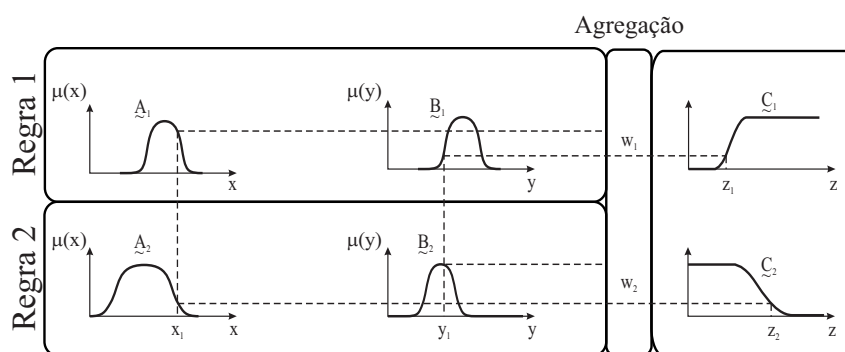


Figura 15: Método gráfico de Tsukamoto.

Fonte: Adaptado de (ROSS, 2009).

Assim como no método de Sugeno, no método de Tsukamoto a etapa de defuzzificação é desnecessária uma vez que a solução final para o sistema é dada de acordo com o cálculo da média ponderada vista na Equação 40. Entretanto, devido à natureza específica das funções de pertinência para os termos consequentes, o método de Tsukamoto não é tão usual quanto os demais em abordagens convencionais (é empregado em situações específicas) (ROSS, 2009).

3.3.5.3 Matriz de Correlação

Como base nas informações obtidas sobre os métodos de correlação dos conjuntos *fuzzy* pode-se definir um artifício gráfico para tal fim. Considerando uma relação *fuzzy* \underline{R} , definida em um conjunto $\underline{A} \subset U$ a outro conjunto $\underline{B} \subset V$, logo, $\underline{R} \subset U \times V$, formando assim uma matriz que relaciona $U \Rightarrow V$, como pode ser visto na Figura 16.

As entradas em cada elemento da matriz ($\mu_{ij} \in [0, 1]$), são os valores de pertinência associados a cada par ordenado x_i, y_j . Os elementos dessa matriz ligam o universo de entrada ao universo de saída, ou seja, correlacionam os conjuntos \underline{A} e \underline{B} com um valor

	\underline{B}_1	\underline{B}_2
\underline{A}_1	μ_{11}	μ_{12}
\underline{A}_2	μ_{21}	μ_{22}
\underline{A}_3	μ_{31}	μ_{32}

Figura 16: Matriz relacional.

contido em $[0, 1]$. Tal valor é chamado de **intensidade de mapeamento** (SIMÕES; SHAW, 2007).

3.3.6 Defuzzificação

O processo de Defuzzificação¹⁷, consiste basicamente na tradução do valor das variáveis linguísticas (conjuntos *fuzzy*) inferidas para valores analíticos. O objetivo é, obter um único valor discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos das variáveis linguísticas, ou seja, a distribuição probabilística dessas variáveis. Assim, a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto (analítico) (SIMÕES; SHAW, 2007).

Assim como para o processo de fuzzificação, existem diferentes maneiras de se defuzzificar uma dada informação *fuzzy*. Entretanto, vale ressaltar que a escolha por qual dos métodos utilizar está diretamente relacionada à escolha dos métodos utilizados na fuzzificação, isto é, a maneira como as informações são modeladas (tipos de funções de pertinência utilizadas), impacta diretamente no método de defuzzificação adotado.

A seguir, serão apresentados os principais métodos de defuzzificação presentes na literatura.

3.3.6.1 Principais Métodos de Defuzzificação

Como dito anteriormente, a principal ideia por de trás do processo de defuzzificação (ou decomposição), é a de se obter um valor analítico que melhor represente a composição estrutural dos conjuntos *fuzzy* avaliados (COX, 1994).

Das diversas técnicas existentes, duas destacam-se perante as demais, são elas:

¹⁷do inglês, *Defuzzification*.

o Método do Centro de Gravidade¹⁸ e o Método do Máximo Valor¹⁹.

3.3.6.1.1 Método do Centro de Gravidade

O Método da Centróide determina o ponto de equilíbrio da solução de uma determinada região *fuzzy*, por intermédio do cálculo da média dos pesos da região. Do ponto de vista matemático, pode-se obter o Centróide de uma determinada região *fuzzy* \underline{A} através da seguinte expressão:

$$\mathfrak{R} \leftarrow \mu_{\underline{A}}^*(d) = \frac{\sum_{i=0}^n d_i \cdot \mu_{\underline{A}}(d_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_{\underline{A}}(d_i)} \quad (41)$$

Onde d é o i -ésimo ponto no domínio do conjunto *fuzzy*, $\mu_{\underline{A}}(d)$ é a sua correspondente pertinência em relação ao conjunto \underline{A} e $\mu_{\underline{A}}^*(d)$ representa o valor defuzzificado (COX, 1994).

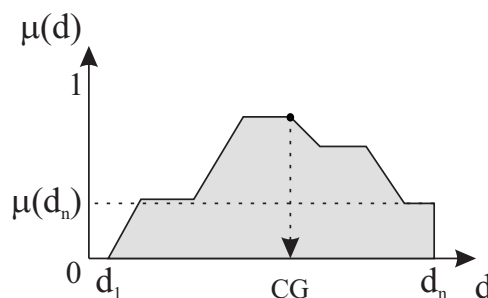


Figura 17: Método do Centro de Gravidade - Exemplificação.

Fonte: Adaptado de (COX, 1994).

Na Figura 17 o valor do Centro de Gravidade (CG) representa a solução da Equação 41 para a figura geométrica resultante do processo de inferência.

No Método do Centro de Gravidade destacam-se as propriedades:

1. O valor defuzzificado tende a mover-se suavemente para próximo da região da saída *fuzzy*, sendo assim, mudanças na topologia dos modelos (funções de pertinência) resultam em suaves mudanças no valor resultante;
2. O cálculo do CG é relativamente simples, principalmente quando considera-se funções

¹⁸ou Centróide.

¹⁹do inglês, *Maximum Height*.

de pertinência de geometria elementar (funções de pertinência triangulares e trapezoidais, por exemplo);

3. O método pode ser aplicado tanto para conjuntos *fuzzy* (funções de pertinência convencionais) quanto para conjuntos do tipo *singleton*.

São esses aspectos que fazem com que o Método do Centro de Gravidade seja amplamente utilizado nos sistemas *fuzzy* (COX, 1994).

3.3.6.1.2 Método do Máximo Valor

O do Método de Máximo Valor se baseia na determinação de um elemento d cuja pertinência $\mu_{\underline{A}}(d)$ seja a máxima em relação a todos os demais elementos do conjunto \underline{A} . Esse método pode ser descrito através da seguinte expressão:

$$\mu_{\underline{A}}^*(d) \rightarrow \mu_{\underline{A}}(d_{max}) \geq \mu_{\underline{A}}(d_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

A Figura 18 mostra de forma clara o significado do método.

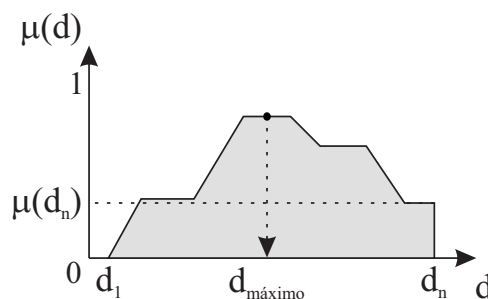


Figura 18: Método do Máximo Valor - Exemplificação.

Fonte: Adaptado de (COX, 1994).

Entretanto, o método é sensível para situações onde o valor defuzzificado resida em regiões planas (como é o caso da Figura 18), gerando assim ambiguidade no resultado e portanto, podendo ser aplicado em uma faixa mais restrita de problemas. Mediante tais aspectos, algumas técnicas derivam do Método do Máximo Valor (buscando mitigar tal sensibilidade), são elas:

1. O Método da Média dos Máximos Valores;
2. O Método do Centro dos Máximos Valores.

De forma breve, o **Método da Média dos Máximos Valores** se preocupa em obter um valor médio de todos os máximos valores encontrados. Dessa forma, elimina a ambiguidade na resposta. A defuzzificação por intermédio da média dos máximos é obtida através da seguinte expressão:

$$\mu_{\underline{A}}^*(d) = \sum_{i=0}^n \frac{\mu_{\underline{A}}(d_i)}{D} \quad (43)$$

Onde D é o número total de elementos d que são os máximos da função de pertinência resultante. Usualmente, a Equação 43 é modificada da seguinte maneira:

$$\mu_{\underline{A}}^*(d) = \frac{d_a + d_b}{2} \quad (44)$$

Assumindo que em uma região plana de máximo, pode-se considerar apenas a existência de dois máximos quaisquer (ROSS, 2009).

Já, no **Método do Centro dos Máximos Valores**, uma vez definidos os máximos valores do conjunto \underline{A} , basta determinar o centro geométrico da região que delimita os máximos valores.

A Equação 45 representa método de defuzzificação pelo Centro dos Máximos Valores:

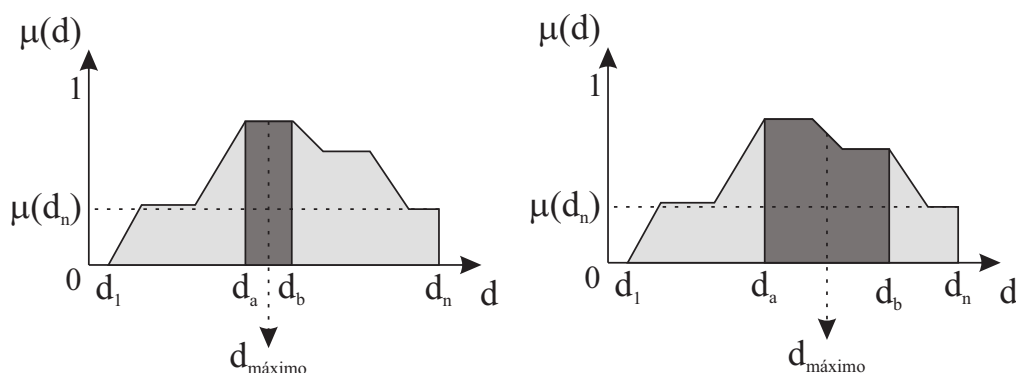
$$\mu_{\underline{A}}^*(d) = \frac{\sum_{i=0}^n d_{max_i} \cdot \mu_{\underline{A}}(d_{max_i})}{\sum_{i=0}^n \mu_{\underline{A}}(d_{max_i})} \quad (45)$$

Onde d_{max_i} é o i -ésimo ponto máximo da função de pertinência.

A Figura 19 exemplifica essas duas variações:

Existem outras técnicas de defuzzificação, onde a grande maioria se baseia na variação dos métodos acima explanados (ROSS, 2009). Sendo assim, para a compreensão presente, os tópicos até aqui apresentados referentes à lógica *fuzzy* são suficientes para o entendimento do trabalho proposto.

Buscando destacar a crescente aplicação da lógica *fuzzy* em sistemas inteligentes, na sequência, serão apresentados alguns exemplos de aplicação desses sistemas voltados para o âmbito dos sistemas elétricos de potência.



(a) Método da Média dos Máximos Valores. (b) Método do Centro dos Máximos Valores.

Figura 19: Variações do Método do Máximo Valor.

Fonte: Adaptado de (COX, 1994).

3.4 Aplicação da Lógica *Fuzzy* em Sistemas Inteligentes voltados aos SEPs

Esta seção tem como objetivo evidenciar a aplicação de algumas abordagens *fuzzy* voltadas para os mais diversos problemas presentes nos sistemas elétricos (diagnóstico de distúrbios, avaliação de equipamentos, análise de dispositivos de proteção, dentre outros).

Como visto, um dos grandes benefícios da utilização da lógica *fuzzy* reside na sua representação do conhecimento de forma explícita (baseada na relação SE-ENTÃO). Além disso, ao decorrer das últimas décadas, os sistemas *fuzzy* vêm se mostrando mais simplistas e muitas vezes mais ágeis, quando comparados com outras técnicas de inteligência artificial, como por exemplo, redes neurais (YOUSSEF, 2004a). Em adição, as regras de sistemas *fuzzy* são geralmente mais expressivas do que as regras baseadas em sistemas *crisp* (fato relacionado fortemente a abordagem semântica que a lógica *fuzzy* adota).

Um sistema difuso para diagnóstico automático de faltas incipientes em transformadores de potência é proposto por Falqueto e Telles (2007). O trabalho é desenvolvido juntamente com a Usina Hidrelétrica de Itaipu²⁰ e se baseia, fundamentalmente, em um processo automatizado de análise de gases. Uma abordagem *fuzzy* é desenvolvida visando emular a inferência desenvolvida pelos especialistas, de modo a tornar o sistema confiável e acima de tudo, simples. Fundamentalmente, as informações relevantes para o diagnóstico são os níveis de certos gases dissolvidos no óleo isolante, como por exemplo: CO , H_2 , CH_4 ,

²⁰www.itaipu.gov.br

etc. Esses gases são originados por decomposição química causadas, principalmente, por elevação de temperatura (indicando atividade elétrica indesejada e contato físico entre partes do transformador).

Uma outra abordagem difusa, voltada para o problema de faltas em motores de indução é proposta por Rodríguez e Arkkio (2008). Nesta metodologia, os autores buscam uma automatização do diagnóstico de falhas operacionais que são comuns em motores de indução (estresse térmico, elétrico e mecânico, além de falhas elétricas e/ou mecânicas). Uma dificuldade encontrada pelos autores foi a escassez de informação relevante para tal tarefa, fato esse que motivou a aplicação do Método de Elementos Finitos na busca de dados “virtuais” que representassem as condições do motor em diversas situações de carga e falta. Além do mais, os elementos finitos permitiram a construção adequada das funções de pertinência (uma vez que objetivo da técnica de elementos finitos é de prever as mudanças da performance dos parâmetros internos do motor mediante situações faltosas). Fundamentalmente, a metodologia visa detectar (com base nas correntes terminais da máquina) faltas iminentes no estator da máquina, tais como: curtos entre fases, curtos entre bobinas de uma mesma fase, etc.

Ainda em relação a detecção de faltas em transformadores, em um trabalho mais recente, Rao *et al.* (2011) propõe um sistema *fuzzy* que avalia três causas típicas de faltas em transformadores de potência: falhas térmicas, falhas elétricas e falhas mecânicas. Segundo os autores, umas das ferramentas mais comuns para avaliação de transformadores de potência é a Análise de Gases Dissolvidos (do inglês, *Dissolved Gas Analysis* (DGA)). Mas, segundo os mesmos, o maior problema dessa análise é que a mesma demanda de vasta experiência para ser efetuada, deixando de lado qualquer formalismo matemático. Sendo assim, há uma imensa dependência de profissionais experientes no tratamento dessas informações. Deste modo, propõe-se uma metodologia que além da DGA (envolvendo decomposição do óleo e do papel isolante), desempenha também avaliação de descargas elétricas parciais, arcos elétricos, tensão de ruptura dielétrica do óleo isolante e deformações mecânicas.

Já Kaliwoda *et al.* (2014) propõe uma metodologia para detecção, identificação e localização de faltas em subestações de média tensão. Neste trabalho, os autores utilizam informações de tensão e corrente do sistema e baseado nos valores *rms*, componentes de sequência zero e DHT dessas grandezas modelam um SIF. A detecção da falta é feita baseada na ideia da não operação normal, ou seja, existe uma saída *fuzzy* que indica a operação normal do sistema. Se esta não for ativada, trata-se de um evento faltoso.

Feita essa detecção, a identificação e a localização (se foi a montante ou a jusante da subestação) é feita com base na comparação das demais regras ativadas. Sendo assim, um único sistema é capaz de desempenhar os três aspectos fundamentais propostos.

Algo sempre citado nos trabalhos referentes à aplicação da Lógica *Fuzzy* é o fato de que a abordagem semântica, típica desses sistemas, permite ao sistema um dinamismo maior na hora de lidar com as informações, principalmente se essas possuírem algum grau de imprecisão. Além do mais, grande parte das aplicações são voltadas para tarefas muitas vezes desempenhadas por especialistas, sendo assim, o sistema aplicado sempre visa emular a inferência humana e por consequência, facilitar o trabalho dos mesmos. Deste modo, na sequência, será apresentada a metodologia aqui proposta para o problema do diagnóstico automático de eventos em plantas geradoras adotando uma abordagem difusa.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma generalizada, o trabalho proposto. Trata-se de um sistema *fuzzy* que desempenha um papel de diagnóstico e classificação de distúrbios em unidades geradoras de energia elétrica, baseado nos registros oscilográficos de longa duração provenientes dos RDPs.

Atualmente, nas usinas e subestações é comum a presença de oscilógrafos (outra denominação para os RDPs). Com o avanço da tecnologia digital, estes equipamentos tornaram-se mais práticos, versáteis e, principalmente, mais baratos quando comparados aos antigos oscilógrafos eletromecânicos. Uma das mais marcantes características dos RDPs é sua capacidade de ser acessado e configurado remotamente, através de redes de comunicação. Assim, podem ser formadas as chamadas redes de oscilografia. Onde todas as oscilografias de instalações de uma mesma empresa podem ser concentradas em um único local na rede, criando um tipo de *data center*, onde se é possível o acesso e o vislumbre do comportamento de todas as usinas. Consequentemente, com o advento da popularização dos RDPs, ocorre um crescente aumento da dificuldade de se armazenar, gerenciar e classificar a grande quantidade de dados que são disponibilizados diariamente em uma rede de oscilografia. Quando se trata de unidades de geração de energia, este problema é agravado devido ao maior número de causas possíveis para o registro de oscilografias nestas instalações em comparação com sistemas de transmissão (MORETO; ROLIM, 2010).

O excesso de informações em um centro de operação de uma unidade geradora torna laboriosa a tarefa de análise desempenhada pelos engenheiros analistas (MORETO, 2011). Além disso, a aplicação de sistemas inteligentes na tarefa de diagnóstico e classificação de distúrbios, visando auxiliar o trabalho de análise dos especialistas, vem se tornando cada vez mais relevante e útil (ROLIM *et al.*, 2004).

Na rotina diária de operação das unidades geradoras, diversos são os procedimentos que resultam no registro oscilográfico por intermédio dos RDPs. Sendo assim, o montante de registros torna-se ainda maior quando pensamos nas oscilografias registradas provenientes de situações de contingência ao sistema elétrico. Ou seja, a primeira tarefa

cabível ao analista é a de efetuar uma triagem em relação aos eventos esperados (procedimentos operacionais) e os inesperados (curto-circuito, por exemplo). Uma vez feita essa triagem, a análise segue visando os registros nocivos ao sistema e então, um diagnóstico é dado com base no conhecimento e experiência dos especialistas responsáveis.

O sistema aqui proposto tem como papel fundamental efetuar a triagem inicial, diagnosticando os distúrbios em: procedimentos operacionais e situações de contingência. Além disso, uma vez diagnosticado, o registro referente à situação de contingência poderá ser classificado de acordo com a sua natureza (falta bifásica, para o exemplo de um curto-circuito). Considerando ainda que os RDPs também efetuam o registro dos eventos de alguns equipamentos de proteção (nem todos os equipamentos que compõe os sistemas de proteção das unidades geradoras são monitorados), será possível efetuar uma correlação entre a análise dos registros oscilográficos e os eventos das proteções monitoradas, ou seja, obter uma visão geral acerca dos dispositivos envolvidos com o distúrbio. Sendo assim, em situações onde a proteção não desempenhou seu papel de forma adequada, pode se tratar de um indicador da necessidade de manutenção. Conseqüentemente, o sistema proposto pode causar impactos benéficos em relação à manutenção preventiva dos sistemas de proteção que compõe as unidades geradoras de energia elétrica.

Todas essas ações têm como principal objetivo reduzir o tempo em que as máquinas ficam fora de serviço, implicando assim em um benefício financeiro, uma vez que o custo operacional de uma máquina parada é relativamente alto e, danoso ao equilíbrio financeiro da planta de geração. Mas principalmente, a implantação desse tipo de sistema automático visa tornar os SEPs cada vez mais confiáveis. Uma visão geral do sistema proposto é apresentada na Figura 20.

Como é visto na Figura 20, de forma geral, o sistema pode ser dividido em três grandes etapas:

1. Etapa de Aquisição dos Sinais;
2. Etapa de Processamento dos Sinais;
3. Etapa de Classificação e Diagnóstico de Eventos.

Já na Figura 21, é apresentado o sequenciamento lógico da metodologia proposta.

A seguir, todas as etapas e processos do sistema proposto serão elucidadas de forma a evidenciar quais medidas foram tomadas de modo a solucionar o problema de

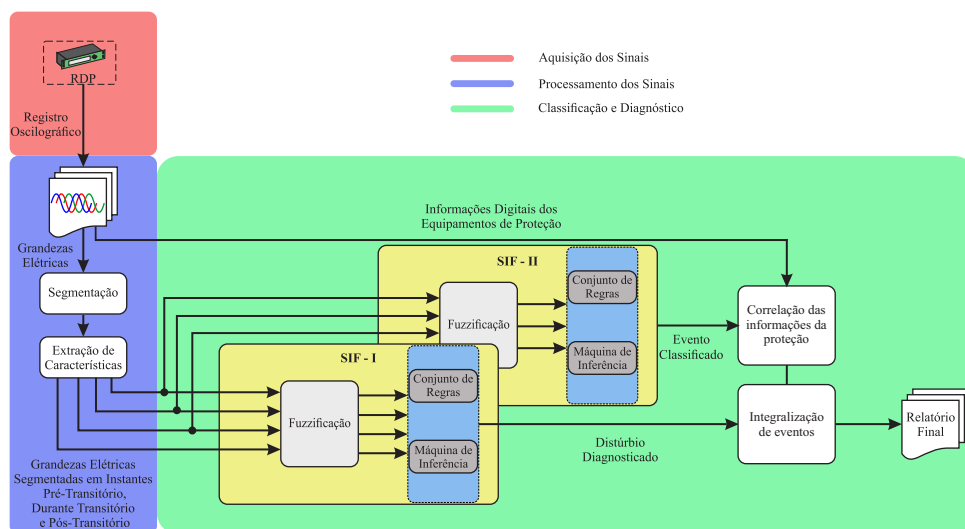


Figura 20: Metodologia do trabalho proposto.

excesso de informações e, abordar de forma automática a tarefa de análise de registros oscilográficos.

4.1 Aquisição dos Sinais - Registros de Longa Duração

A primeira etapa do sistema proposto é a **Aquisição dos Sinais** provenientes do sistema elétrico. Os RDPs medem continuamente as grandezas elétricas do sistema através de transformadores de medição (Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Corrente (TC)), além de registrarem a atuação digital de determinados dispositivos de proteção. De forma geral, os RDPs são capazes de registrar a operação do sistema elétrico e sua proteção mediante eventos importantes (faltas elétricas, oscilações de frequência, falhas operativas, procedimentos operacionais, dentre outros).

As imposições feitas pelo ONS (2009) definem quais grandezas devem ser monitoradas pelos RDPs. Com base nessas imposições, a Tabela 3 apresenta as grandezas tipicamente monitoradas em unidades geradoras de energia elétrica.

Além das grandezas analógicas, o ONS também enumera os eventos digitais que devem constar na Sequência de Eventos (SOE) dos equipamentos. A SOE¹ consiste no registro das mudanças de estado dos canais correspondentes às sinalizações de estados digitais. Além da descrição do evento, o registro também contém o instante de tempo em que a mudança de estado ocorreu (MORETO, 2011). Entretanto as informações contidas nas SOEs são provenientes de sistemas SCADA.

¹do inglês, *Sequence of Events*.

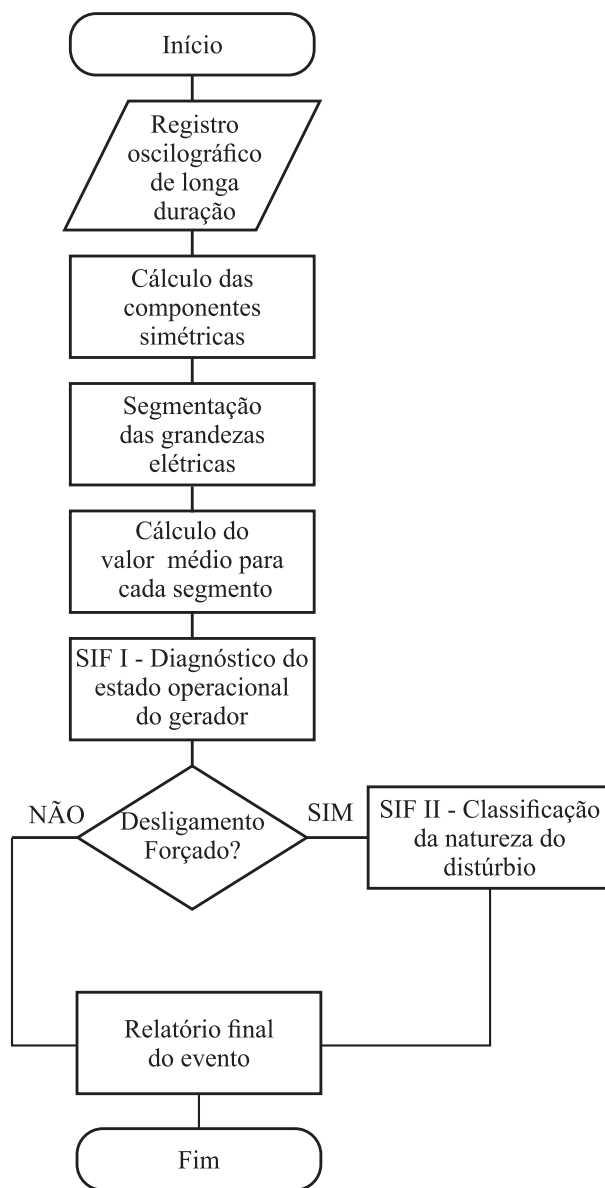


Figura 21: Fluxograma descrevendo a o sequenciamento lógico do algoritmo proposto para diagnóstico e classificação de distúrbios.

Os itens subsequentes servirão como alicerce para compreensão do funcionamento da metodologia proposta. Serão abordados os princípios essenciais sobre a obtenção de dados para realização da tarefa do diagnóstico, bem como, a modelagem difusa das informações oriundas dos registros oscilográficos de longa duração.

Tabela 3: Grandezas elétricas comumente monitoradas em unidades de geração de energia.

Grandeza Elétrica	Descrição
I_A	Corrente da fase A
I_B	Corrente da fase B
I_C	Corrente da fase C
V_A	Tensão da fase A
V_B	Tensão da fase B
V_C	Tensão da fase C
V_N ou I_N	Tensão ou corrente de neutro
I_{tfA}	Corrente da fase A do transformador (lado de alta tensão)
I_{tfB}	Corrente da fase B do transformador (lado de alta tensão)
I_{tfC}	Corrente da fase C do transformador (lado de alta tensão)
I_{tfN}	Corrente de neutro do transformador (lado de alta tensão)
I_{DC}	Corrente de excitação
V_{DC}	Tensão de excitação

Fonte: Adaptado de (MORETO, 2011).

4.2 Processamento dos Sinais - Método de Segmentação e Extração de Características

A próxima etapa é a de **Processamento dos Sinais**. Fundamentalmente, essa etapa se baseia na **Segmentação e Extração de Características** dos registros oscilográficos. A segmentação dos registros consiste, basicamente, na definição de índices de detecção que podem ser utilizados para localização de transitório e/ou mudanças de estado nas grandezas elétricas. Sendo assim, após a etapa de segmentação o registro oscilográfico pode ser separado em informações pré, durante e pós-evento. O método de segmentação utilizado foi proposto por Moreto (2011) e consiste na determinação de um índice id que representa o desvio padrão para uma determinada janela de dados. Esse índice é expresso por:

$$id(n) = \sigma_{\Delta}(n) = \frac{1}{\Delta - 1} \sum_{i=n}^{n+\Delta} (|\vec{y}(i)| - \bar{y})^2 \quad (46)$$

Onde n é o índice da amostra do sinal no registro de oscilografia, $|\vec{y}(i)|$ é o módulo do fasor da amostra i , Δ representa o tamanho da janela expresso em número de amostras, σ_{Δ} é o desvio padrão calculado para esta janela e \bar{y} é o valor médio calculado na janela. Como dito, esse índice é determinante para a detecção de algum transitório, uma vez que quando o valor de id ultrapassa um determinado limiar δ , considera-se que

a amostra n pertence a um segmento transitório. Sendo assim, a primeira amostra onde $id(n) > \delta$ indica o início do transitório, o qual termina com a última amostra onde $id(n) > \delta$. A Figura 22 exemplifica o processo de segmentação acima descrito.

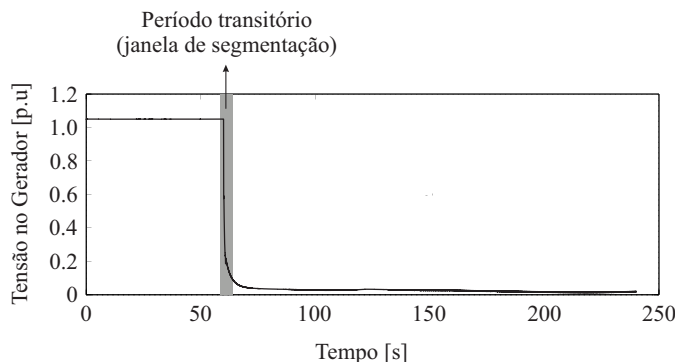


Figura 22: Exemplo de sinal segmentado.

Fonte: Adaptado de (MORETO, 2011).

Já a extração de características se baseia na determinação das informações mais relevantes em relação aos registros oscilográficos. A grande maioria dos sistemas supervisórios de unidades geradoras monitoram as correntes de saída e as tensões nos terminais dos geradores. Sendo assim, essas informações são adotadas para o sistema de análise automática aqui proposto. Buscando reduzir o número de características a serem extraídas, inicialmente os dados são submetidos a uma etapa de pré-processamento onde as grandezas trifásicas registradas pelos RDPs são decompostas em suas respectivas componentes simétricas. Para fim de simplificação, a componente de sequência positiva é utilizada para segmentação. Através do registro das tensões e correntes trifásicas, as potências ativa, reativa e aparente também podem ser calculadas (MORETO, 2011).

Sendo assim, após a etapa do processamento dos sinais, todas as informações úteis para a análise estão disponíveis e são visualizadas na Tabela 4.

Uma vez extraídas as características do registro oscilográfico, se faz possível a utilização de um sistema inteligente desempenhando o papel de analisador e classificador de eventos. Para isso, se fará uso dos conceitos fundamentados no Capítulo 3, no que diz respeito a Lógica *Fuzzy*.

4.3 Diagnóstico e Classificação - Abordagem *Fuzzy*

A última etapa do sistema aqui proposto é a de **Diagnosticar e Classificar** os eventos referentes à unidade geradora. Para isso, propõe-se o desenvolvimento de um

Tabela 4: Conjunto de características extraídas do registro oscilográfico.

Nomenclatura	Descrição
$V_{pré}^{(1)}$	Valor médio do módulo da tensão de sequência positiva pré-transitório
$V_{transitório}^{(0,1,2)}$	Valor médio do módulo das tensões de sequência durante o transitório
$V_{pós}^{(1)}$	Valor médio do módulo da tensão de sequência positiva pós-transitório
$I_{pré}^{(1)}$	Valor médio do módulo da corrente de sequência positiva pré-transitório
$I_{transitório}^{(0,1,2)}$	Valor médio do módulo das correntes de sequência durante o transitório
$I_{pós}^{(1)}$	Valor médio do módulo da corrente de sequência positiva pós-transitório
$P_{pré}$	Valor médio da potência ativa trifásica pré-transitório
$P_{pós}$	Valor médio da potência ativa trifásica pós-transitório
$Q_{pré}$	Valor médio da potência reativa trifásica pré-transitório
$Q_{pós}$	Valor médio da potência reativa trifásica pós-transitório
$S_{pré}$	Valor médio da potência aparente trifásica pré-transitório
$S_{pós}$	Valor médio da potência aparente trifásica pós-transitório

Fonte: Adaptado de (MORETO, 2011).

sistema especialista *fuzzy* que terá como função avaliar e inferir sobre os eventos referentes às unidades geradoras que compõe a planta em estudo.

Como pode ser visto na Figura 20, a metodologia é composta por dois sistemas *fuzzy* distintos (um responsável pelo diagnóstico do distúrbio e outro responsável pela classificação do evento). Desta forma, na sequência serão expostos os conceitos que fundamentam cada um desses sistemas.

4.3.1 Sistema de Inferência *Fuzzy* I - Diagnóstico do Distúrbio

O primeiro Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF I, visto na Figura 20) é responsável pelo diagnóstico dos eventos ocorridos na unidade em avaliação. Fundamentalmente, o diagnóstico dos eventos se dará com base na situação operacional da máquina, ou seja, como o gerador estava se comportando antes do distúrbio e como passou a se comportar após o distúrbio.

Quando desempenhada pelos engenheiros analistas, de modo geral, a análise do registro oscilográfico é feita com base nas transições das grandezas elétricas ao decorrer do registro, isto é, como por exemplo, o modo em que as tensões e correntes na máquina se comportaram durante o registro. Sendo assim, como o intuito desse algoritmo é de, baseado em um conjunto de regras heurísticas, simular o raciocínio humano quando este está analisando um registro oscilográfico, a preocupação maior é a de dispor de carac-

terísticas essenciais que permitam conclusões acerca do registro oscilográfico. Para isso, se fará uso das informações obtidas no processo de extração de características do registro oscilográfico (Seção 4.2) a fim de se modelar o SIF.

Além do mais, como as informações das tensões terminais e correntes que fluem da unidade carregam consigo aspectos fundamentais para avaliação operacional de cada unidade, serão essas informações as variáveis fundamentais para o SIF proposto. Uma vez conhecidas as variáveis de entrada do SIF se faz necessária a fuzzificação dessas informações para então ser possível a abordagem *fuzzy*.

4.3.1.1 SIF I - Fuzzificação

Como visto na Seção 3.3.4, o processo de fuzzificação consiste na modelagem semântica de grandezas analíticas, ou seja, é uma representação fundamentada na linguagem natural. Sendo assim, tanto as variáveis de entrada do SIF I (tensões e correntes) quanto as variáveis de saída (estados operacionais da unidade) devem ser devidamente modeladas, para então ser possível a inferência *fuzzy* que consiste, essencialmente, no raciocínio do sistema.

Um analista, ao avaliar um registro oscilográfico, está atento ao comportamento das grandezas elétricas durante todo o registro e, em caso de algum distúrbio, baseando-se no comportamento das grandezas antes e após o distúrbio, conclui sobre o provável evento que causou tal comportamento no registro oscilográfico. Sendo assim, como o SIF I tem o objetivo avaliar o estado operacional da unidade mediante algum distúrbio, as informações de extrema relevância para a modelagem do sistema são os valores pré e pós-distúrbio, tanto das tensões quanto das correntes (como visto na Tabela 5).

Tabela 5: Variáveis de entrada do SIF I (não fuzzificadas).

Variáveis de Entrada
$V_{pré}$
$V_{pós}$
$I_{pré}$
$I_{pós}$

Durante a avaliação, graças à experiência, o analista qualifica níveis de tensão e corrente com base no seu próprio conhecimento (e também baseado no comportamento do sistema elétrico). Ou seja, para um evento cujo valor da tensão pré-transitório é próximo

de zero e, após o transitório esse valor se eleva para próximo de $1p.u$ e a corrente se mantém próxima de zero durante todo o registro, para o analista, esse comportamento das grandezas evidencia fortemente um caso de energização da unidade sem a tomada de carga. Nota-se que, o valor exato das grandezas não implica diretamente na inferência desempenhada pelo engenheiro analista, ou seja, mais vale a noção qualificada da grandeza do que sua quantificação exata. Por isso, as variáveis de entrada do sistema aqui proposto se preocupam mais com a qualificação (funções de pertinência) das grandezas de interesse. Deste modo, para emular o raciocínio humano, toma-se como referência para as variáveis de entrada do sistema *fuzzy* três possíveis estados qualificativos para as grandezas: valores **nulos**, valores **intermediários** e valores **nominais**. Além disso, por simplicidade, optou-se pela modelagem através de funções de pertinência do tipo trapezoidais (como pode ser visto na Figura 11(b)).

As variáveis, agora fuzzificadas, presentes na Tabela 5, podem ser vistas na Figura 23 e foram parametrizadas após uma ampla análise de registros reais, buscando observar o comportamento e a transição das grandezas elétricas durante procedimentos operacionais e situações de contingência ocorrentes em uma planta de geração.

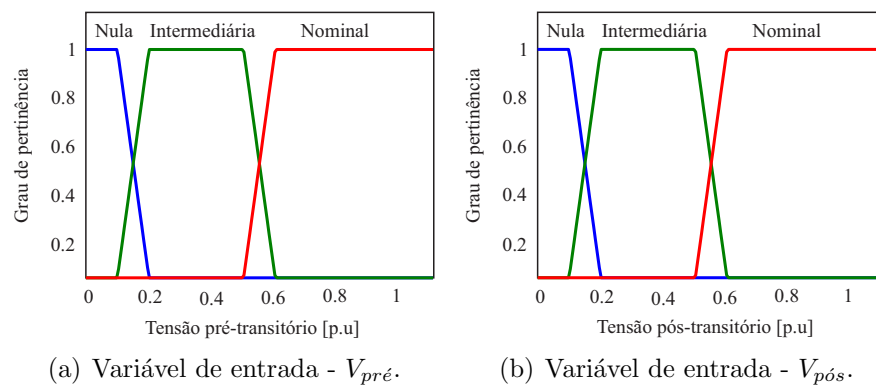


Figura 23: Variáveis de entrada (Tensões pré e pós-distúrbio).

Deste modo, tomando em mente as variáveis fuzzificadas, para o mesmo caso citado anteriormente, o analista poderia inferir da seguinte maneira: *Para um evento cujo valor da tensão pré-transitório é **nulo** e pós-transitório é **nominal**, juntamente como fato de que a corrente pré-transitório e a corrente pós-transitório são **nulas**, concluí-se que trata-se de uma energização sem tomada de carga.* É evidente que a representação semântica das grandezas facilita a compreensão e, conseqüentemente, a inferência em relação ao distúrbio, uma vez que ocorre um independência da exatidão do valor da grandeza avaliada.

Sendo assim, as variáveis apresentadas na Tabela 5 devem ser modeladas de modo a representar fielmente o *modus operandi* com que as mesmas são avaliadas pelos engenheiros analistas, além do mais, por se tratar de uma abordagem *fuzzy*, as transições entre estados devem ser definidos baseadas no conhecimento dos engenheiros analistas responsáveis pela análise dos registros oscilográficos. As variáveis fuzzificadas das correntes são apresentadas na Figura 24.

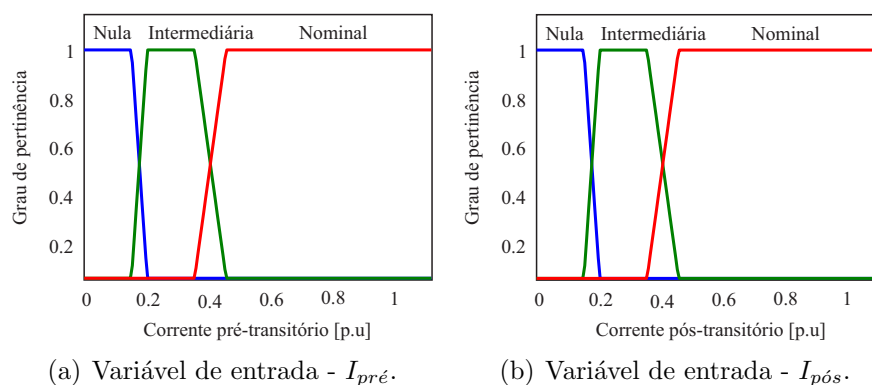


Figura 24: Variáveis de entrada (Correntes pré e pós-distúrbio).

As Figuras 23 e 24 apresentam as variáveis de entrada do SIF I, porém, para finalizar a modelagem das informações necessárias para a inferência difusa é preciso ainda, de mais uma variável que tem como finalidade auxiliar no diagnóstico entre três estados operacionais que possuem, do ponto de vista das tensões e correntes pré e pós-transitório, o mesmo comportamento. Na sequência, todos os estados operacionais serão descritos e, a definição da variável ΔI será justificada. Portanto, pra finalizar a modelagem das variáveis de entrada do SIF I é necessário conhecer a variação de corrente de sequência positiva durante o registro, sendo assim:

$$\Delta I = I_{pós} - I_{pré} \quad (47)$$

A importância da Equação 47 se evidencia na diferenciação entre os estados de incremento, decréscimo de carga e operação normal (como poderá ser visto na sequência). A variável ΔI é modelada contendo duas funções de pertinência: valores **negativos** de ΔI e valores **positivos** de ΔI , como pode ser visto na Figura 25.

Uma vez dispondo de todas as variáveis de entrada abordadas de uma maneira *fuzzy*, se faz necessária o mesmo tratamento para as variáveis de saída do sistema (estados operacionais). As variáveis de saída do SIF I, como dito, são obtidas através da experiência dos engenheiros analistas, por isso, não podem ser extraídas dos registros oscilográficos.

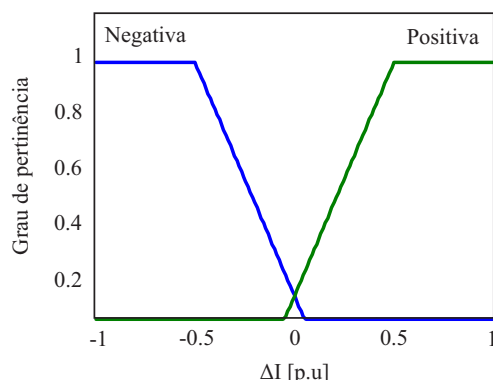


Figura 25: Variável de entrada - ΔI

Pode-se até pensar no diagnóstico dos estados operacionais como sendo um diagnóstico clínico, onde, com base nos sintomas (neste caso, comportamento das grandezas elétricas durante o registro) é possível inferir sobre uma possível enfermidade (estado operacional), entretanto, a enfermidade, por si só, é função dos sintomas, não fazendo nenhum sentido defini-las de modo individualizado, ou seja, buscar uma representação matemática que descreva cada estado operacional.

Desta forma, na Tabela 6 são apresentadas as possíveis saídas do SIF I, ou seja, os possíveis estados operacionais da unidade.

Tabela 6: Variáveis *fuzzy* de saída.

<i>Index</i>	Estado Operacional na Máquina
A	Energização Plena
B	Energização Plena com Carregamento
C	Energização Incompleta
D	Desenergização Plena
E	Desenergização Incompleta
F	Desligamento Forçado
G	Evento Desconhecido
H	Fora de Serviço
I	Operação Normal
J	Unidade Isolada
K	Sincronismo
L	Incremento de Carga
M	Decremento de Carga

Cada um dos estados acima citados é descrito na sequência.

Energização Plena:

Evento caracterizado pelo aumento da tensão de um valor próximo de zero para

nominal enquanto a corrente se mantém próxima de zero.

Energização Plena com Carregamento:

Evento caracterizado pelo aumento da tensão de um valor próximo de zero para nominal e um acréscimo na corrente, indicando uma tomada de carga em conjunto com a energização da unidade.

Energização Incompleta:

Caso onde a oscilografia não registra completamente o evento, gerando assim um registro onde as variações acima citadas não estão devidamente apresentadas.

Desenergização Plena:

Evento caracterizado pela diminuição da tensão de valores próximos do nominal para valores próximos a zero ao passo que não há carregamento na unidade.

Desenergização Incompleta:

Similar ao caso da energização incompleta, onde o RDP não registra o evento total.

Desligamento Forçado:

Caso correspondente à rejeição de carga, caracterizada pela interrupção da corrente (redução do valor para zero) e também pela redução da tensão para valores próximos de zero.

Evento Desconhecido:

Referente ao evento que comumente não é real, perante a ótica do sistema elétrico. Pode ser ocasionado por um registro indevido ou falho.

Fora de Serviço:

Caracterizado pelo desligamento da unidade, ou seja, quando tanto a tensão quanto a corrente são nulas durante todo o registro.

Operação Normal:

Quando tensão e corrente apresentam valores próximos do nominal (sem variações significativas), durante todo o registro.

Unidade Isolada:

Caracteriza-se pela operação a vazio do gerador. A tensão se mantém próxima do nominal durante todo o registro e não há acréscimo de carga.

Sincronismo:

Evento caracterizado pelo acréscimo de carga enquanto o gerador operava a vazio. A tensão permanece próxima do nominal e a corrente aumenta de um valor próximo de zero para um valor superior.

Incremento de Carga:

Evento caracterizado pela manutenção da tensão em valores nominais e incremento do valor da corrente, desde que seu valor inicial não seja nulo.

Decremento de Carga:

Análogo ao caso do incremento de carga, caracteriza-se pela manutenção da tensão em valores nominais e decremento do valor da corrente, sendo que o valor inicial desta não seja nulo.

A modelagem das variáveis de saída do SIF I foi obtida com base no conceito de *Singleton*². *Singletons* são uma particularidade de funções de pertinência e podem ser tratados como pulsos isolados, representando uma unidade discreta. A aplicação dos *Singletons* simplifica os cálculos computacionais de defuzzificação (visto na Seção 3.3.6) (SIMÕES; SHAW, 2007).

A Figura 26 apresenta a variável de saída do SIF I com suas respectivas funções de pertinência, do tipo *Singleton*, presentes na Tabela 6.

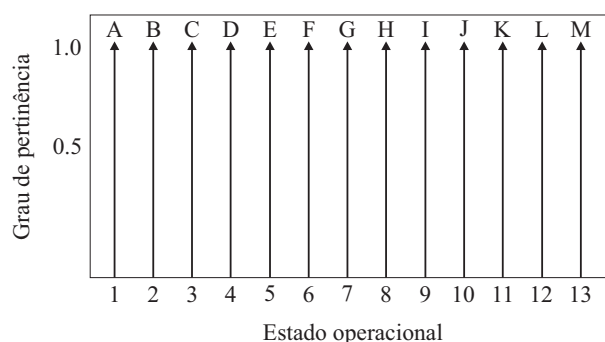


Figura 26: Variável de saída - Estados operacionais da unidade.

Uma vez dispondo das variáveis, modeladas, de entrada e saída do sistema *fuzzy* se encerra a etapa de fuzzificação e se dá início ao desenvolvimento do mecanismo de inferência responsável pela correlação entre entrada e saída de um SIF. Para isso, a seguir, será demonstrado a etapa de construção da máquina de inferência *fuzzy* que compõe a base de raciocínio do SIF I.

²também chamado de *fuzzy-tom*.

4.3.1.2 SIF I - Máquina de Inferência

Como visto na Seção 3.3.5, a etapa de inferência é responsável pelo raciocínio do sistema, desta forma, a máquina de inferência pode ser dita como o cérebro do SIF, uma vez que é composta por regras heurísticas baseadas no conhecimento do engenheiro analista. Para a máquina de inferência aqui proposta, as informações antecedentes são aquelas referentes aos instantes pré e pós-transitório, já as consequentes são relacionadas aos possíveis modos de operação da unidade, ou seja, o comportamento das grandezas elétricas mediante o transitório correlacionam-se com os estados operacionais dos geradores indicando a relação causa-efeito do distúrbio.

As regras aqui propostas são fundamentadas tanto na didática adotada por engenheiros analistas, bem como na análise de um grande número de registros oscilográficos reais. Desta forma, buscou-se criar um banco de regras não tão extenso, porém, cobrindo um maior número de ocorrências. Visando assim, garantir ao SIF robustez e confiabilidade na tomada de decisões..

Por ser baseada na lógica SE-ENTÃO (como de fato é o raciocínio humano), a compreensão das regras é trivial e sua base pode ser ampliada ou alterada sem a necessidade prévia de um conhecimento aprofundado em lógica. O mapa de regras do SIF I pode ser visto na Tabela 7 e, conta com 22 regras de ativação, compondo assim, juntamente com as variáveis modeladas na Seção 4.3.1.1, o SIF responsável pelo diagnóstico de eventos na planta geradora.

Na Tabela 7, NU, IN, NO, PO e NE correspondem as abreviações das funções de pertinência **Nula**, **Intermediária**, **Nominal**, **Positiva** e **Negativa** (referentes as Figuras 23, 24 e 25), respectivamente.

Como é sabido, após a inferência *fuzzy* a resultante do processo ainda deve ser submetida a uma etapa final, de tradução, que visa tornar novamente analítica a informação de interesse. Essa etapa é conhecida como defuzzificação (Seção 3.3.6) e consiste em abordagem matemática que visa converter informação difusa em analítica, permitindo assim a análise pelo usuário final, neste caso, o engenheiro analista.

O SIF aqui proposto se baseia no diagnóstico de eventos com base em sintomas apresentados no registros oscilográficos, por isso, por conveniência, adotou-se a modelagem via *Singletons* para os possíveis estados operacionais da unidade. Pensando no ponto de vista matemático de um *Singleton*, ele nada mais é do que uma constante, um pulso.

Tabela 7: Mapa de regras do SIF I

Regra	$V_{pré}$	$V_{pós}$	$I_{pré}$	$I_{pós}$	ΔI	Estado Operacional
1	NU	NO	NU	NU	–	A
2	NU	NO	NU	NO	–	B
3	NU	NO	NU	IN	–	B
4	NU	IN	–	–	–	C
5	IN	NO	–	–	–	C
6	NO	NU	NU	NU	–	D
7	NO	IN	NU	NU	–	E
8	IN	NU	NU	NU	–	E
9	NO	NU	NO	NU	–	F
10	NO	NU	IN	NU	–	F
11	IN	IN	IN	IN	–	G
12	NU	NU	NU	NU	–	H
13	NO	NO	NO	NO	–	I
14	NO	NO	IN	IN	–	I
15	NO	NO	NU	NU	–	J
16	NO	NO	NU	IN	–	K
17	NO	NO	IN	IN	PO	L
18	NO	NO	IN	NO	–	L
19	NO	NO	IN	IN	NE	M
20	NO	NO	IN	NU	–	M
21	NO	NO	NO	IN	–	M
22	NO	NO	NO	NU	–	M

Sendo assim, para esse tipo de abordagem se faz conveniente a aplicação do método de inferência proposto por Takagi, Sugeno e Kang (Takagi e Sugeno (1985), Sugeno e Kang (1988)), resumido na Figura 14. Esse método torna desnecessária uma etapa específica de defuzzificação, uma vez que, a inferência se baseia em uma média ponderada entre a função de pertinência ativada e seu respectivo grau de pertinência, sendo assim, na composição final (agregação), o cálculo ponderado é, mascaradamente, o processo de defuzzificação, em essência.

4.3.2 Sistema de Inferência *Fuzzy* II - Classificação de Eventos

Na Tabela 6, o evento referente ao **Desligamento Forçado** da unidade, se refere a única situação cuja ocorrência não está atrelada a procedimentos operacionais, comuns em unidades geradoras. Sendo assim, a ocorrência desse evento leva a crer que trata-se de uma situação de contingência no sistema (uma falta elétrica, por exemplo). De acordo com a Figura 21, o a ocorrência de uma desligamento forçado na unidade dispara

um *trigger*, que inicia o segundo Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF II, presente na Figura 20).

A maioria dos trabalhos envolvendo registros oscilográficos para detecção e/ou classificação de faltas se baseiam na utilização de registros de forma de onda (curta duração), para tal tarefa. Já aqui, toda a metodologia é proposta baseada na análise de registros oscilográficos fasoriais (longa duração), portanto, para a classificação dos eventos que geram desligamento da máquina serão necessárias as informações do transitório do registro, deste modo a janela de segmentação proposta retornará informações relevantes da eminência do distúrbio, sendo assim possível, com base nos conceitos das componentes simétricas, classificar a natureza do distúrbio.

4.3.2.1 SIF II - Fuzzificação

Assim como na Seção 4.3.1.1, a abordagem tomada para modelagem das variáveis do SIF II são fundamentadas nos conceitos das funções de pertinência do tipo trapezoidais. O SIF II só é inicializado no caso do diagnóstico resultante do SIF I gerar um estado de desligamento forçado da unidade. Como é sabido, o desligamento forçado se caracteriza, fundamentalmente, pela rejeição de carga da máquina, sendo assim, ocorre uma grande variação, tanto de tensão quanto de corrente durante o registro. Baseado nisso, modela-se duas variáveis de entrada para o SIF II que, ainda desempenham o papel de verificação do evento diagnosticado pelo SIF I. As duas variáveis são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Variáveis de entrada do SIF II (não fuzzificadas).

Variáveis de Entrada
ΔV
ΔI

As variáveis ΔV e ΔI são definidas como as variações das grandezas durante o transitório, isto é:

$$\Delta V = |V_{pós}^{(1)} - V_{pré}^{(1)}| \quad (48)$$

$$\Delta I = |I_{pós}^{(1)} - I_{pré}^{(1)}| \quad (49)$$

As variáveis ΔV e ΔI podem ser visualizadas na Figura 27.

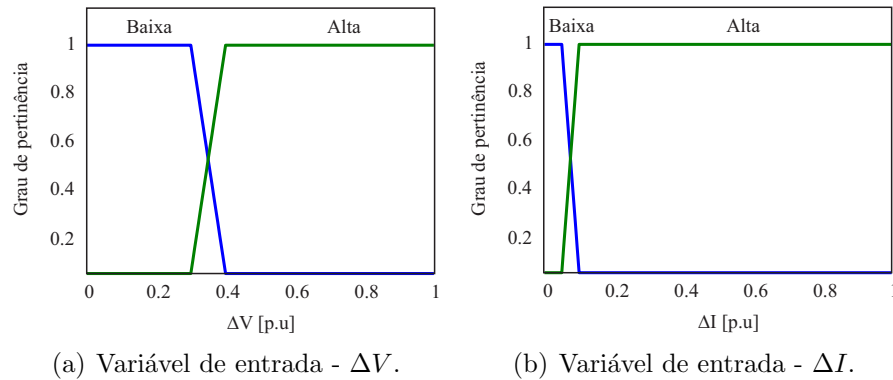


Figura 27: Variáveis de entrada (Variação de tensão e corrente durante o distúrbio).

Entretanto, somente com a variação das grandezas elétricas, não é possível determinar a natureza do distúrbio, isto é, pensando em uma falta elétrica, qual é a sua característica (monofásica, por exemplo). Para isso, faz-se uso dos conceitos das componentes simétricas para se modelar uma nova variável capaz de informar sobre a cada tipo de falta, possível em um SEP.

Como mencionado no início desse trabalho, o SEP convive diretamente com a ocorrência de distúrbios de diversas naturezas, dentre desses, destacam-se as faltas elétricas que por sua vez, podem ser ocasionadas de diferentes maneiras. Mais especificamente ainda, pode-se diferenciar as faltas em um SEP de dois modos: faltas **simétricas** e faltas **assimétricas**³. As faltas assimétricas são as de maior ocorrência dentro de um SEP e se caracterizam como faltas onde não há o envolvimento de todos os condutores, logo, há uma desbalanço (STEVENSON, 1962).

Pensando nas faltas assimétricas, elas podem ser divididas em três diferentes tipos:

1. Falta Monofásica
2. Falta Bifásica
3. Falta Bifásica-terra

Durante a ocorrência do distúrbio, cada uma das faltas listadas acima se comporta de uma maneira bem específica, quando avaliadas as suas componentes simétricas (STEVENSON, 1962; KUNDUR, 1994; SAADAT, 1999). E é esse fato que torna possível a

³ou desbalanceadas.

separação entre cada uma delas e, por consequência, uma modelagem formal para classificação do evento.

As **Faltas Monofásicas (FT)**, possuem as seguintes características:

$$I^{(0)} \cong I^{(1)} \cong I^{(2)} \quad (50)$$

$$V^{(1)} \cong V^{(2)} + V^{(0)} \quad (51)$$

Já para as **Faltas Bifásicas (FF)**, as características são:

$$I^{(1)} \cong -I^{(2)} \quad (52)$$

$$V^{(1)} \cong V^{(2)} \quad (53)$$

$$V^{(0)} \cong I^{(0)} \cong 0 \quad (54)$$

Por fim, para as **Faltas Bifásicas Aterradas (FFT)**, tem-se as seguintes relações:

$$I^{(1)} \cong -I^{(2)} - I^{(0)} \quad (55)$$

$$V^{(0)} \cong V^{(1)} \cong V^{(2)} \quad (56)$$

Baseando-se nessas relações, busca-se uma informação única que permita diferenciar cada um dos três tipos de faltas assimétricas listados. Seguindo o raciocínio de uma aplicação para identificação de faltas proposta por Podvin (2005) e levando em conta que as relações de cada tipo de falta acima listadas podem ser combinadas entre si de modo a determinar um fator único e útil para a sua classificação. Deste modo, propõe-se neste trabalho um fator que foi chamado de **Fator de Tensão Negativa Desbalanceada (ψ)** e definido como:

$$\psi = \frac{|V_{transitório}^{(0)}|}{|V_{transitório}^{(2)}|} \quad (57)$$

A definição da Equação 57 permite a identificação dos tipos de falta baseando-se na variação do valor do fator, uma vez que, para cada tipo de falta, há um comportamento específico das componentes simétricas durante o período do transitório da falta.

$$\psi = \begin{cases} \psi \cong 0, & FF \\ \psi < 1, & FT \\ \psi \cong 1, & FFT \\ \psi > 1, & FT \end{cases} \quad (58)$$

De acordo com a Equação 58, a ocorrência de uma falta bifásica pode ser evidenciada quando $\psi \rightarrow 0$, pois de acordo com a Equação 54, durante o transitório $V^{(0)} \rightarrow 0$. Do mesmo modo, a ocorrência de faltas de natureza monofásica se evidenciam de duas formas distintas. Quando $\psi < 1$, caracteriza uma falta monofásica com impedância de sequência zero tendendo a zero. Já quando $\psi > 1$, trata-se de uma falta monofásica com alta impedância de sequência zero (quando o gerador é aterrado por meio de impedância, por exemplo). Por fim, quando $\psi \cong 1$, trata-se de uma falta bifásica aterrada, pois, de acordo com a Equação 56, tem-se que a razão entre $V^{(0)}$ e $V^{(2)}$ tende a unidade.

Como pode ser visto, o fator proposto na Equação 57 permite a classificação das faltas desbalanceadas que podem ocorrer em uma unidade de geração de energia elétrica. Além do mais, ao observar as condições da Equação 58, pode-se de imediato, notar a variação suave entre os possíveis casos, desta forma, a modelagem do fator através de funções de pertinência pode ser obtida de maneira relativamente simples, uma vez conhecendo a característica de cada falta. Desta forma, para a variável de entrada do SIF II que classifica o tipo de falta (ψ), define-se como funções de pertinência (de acordo com a Equação 58): valores **nulos**, **baixos**, **unitários** e **altos** de ψ .

A modelagem da variável ψ pode ser vista na Figura 28(a) e o detalhe da mesma (função de pertinência **Nulo**) pode ser observado na Figura 28(b).

Além das faltas assimétricas, o SIF II também tem como objetivo o diagnóstico de faltas de natureza trifásica (**FFF**). Sabe-se que esse tipo de distúrbio não apresenta nenhum tipo de desequilíbrio das grandezas (STEVENSON, 1962). Desta forma, para seu diagnóstico será utilizada a informação da componente de sequência positiva da corrente ($I_{transitório}^{(1)}$) durante o período do transitório do registro.

Seguindo a mesma abordagem para o diagnóstico de faltas assimétricas, busca-

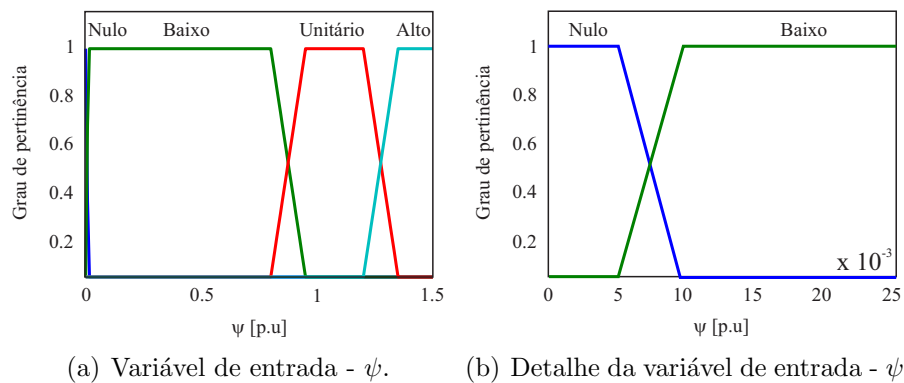


Figura 28: Variável de entrada (Fator de Tensão Negativa Desbalanceada).

se a obtenção de uma variável *fuzzy* que permita o diagnóstico de distúrbios trifásicos. Sendo assim, a Figura 29 apresenta a modelagem da variável *fuzzy* referente a componente positiva da corrente de transitório.

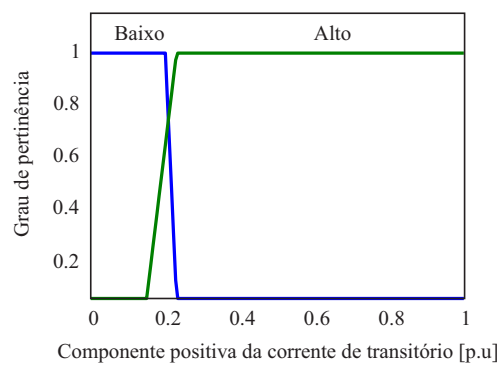


Figura 29: Variável de entrada - $I_{transitório}^{(1)}$

Entretanto, devido a sua característica simétrica, o distúrbio de natureza trifásica apresenta também um valor de ψ aproximadamente unitário (pois $V^{(0)}$ e $V^{(2)}$ são praticamente zero durante o transitório. Desta forma, de acordo com a Equação 58 é passível a conclusão de um distúrbio bifásico aterrado. Tendo em mente tal situação e visando auxiliar a classificação das possíveis faltas, define-se uma última variável que tem como objetivo evitar a possível confusão entre faltas assimétricas e simétricas. Avaliando as Equações 50 a 56 observa-se que para todos os casos de faltas assimétricas, o valor da componente de sequência negativa da tensão ($V^{(2)}$) nunca é nulo. Já para a falta trifásica (onde não ocorre desequilíbrio), tanto $V^{(0)}$ quanto $V^{(2)}$ são praticamente nulas durante o transitório. Dessa forma, a definição de uma variável que correlacione tais valores de $V^{(2)}$ é suficiente para diferenciar faltas assimétricas de simétrica. Desta forma, utilizando os conceitos *fuzzy* repetidamente apresentados até aqui, define-se a última variável que compõe o SIF II:

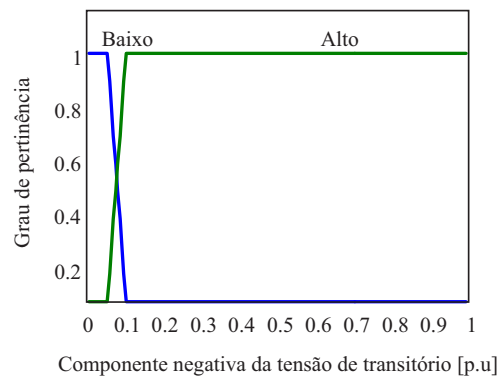


Figura 30: Variável de entrada - $V_{transitório}^{(2)}$

Uma vez dispondo das variáveis de entrada todas modeladas (ΔV , ΔI , ψ , $I_{transitório}^{(1)}$ e $V_{transitório}^{(2)}$), deve-se modelar também as variáveis de saída do sistema, neste caso, o tipo da falta. Sendo assim, seguindo os mesmos conceitos discutidos na Seção 4.3.1.1, a seguir, são definidas as possíveis saídas do SIF II.

Combinando o diagnóstico de faltas assimétricas e simétricas, a Figura 31 apresenta as possíveis saídas do sistema de classificação de distúrbios.

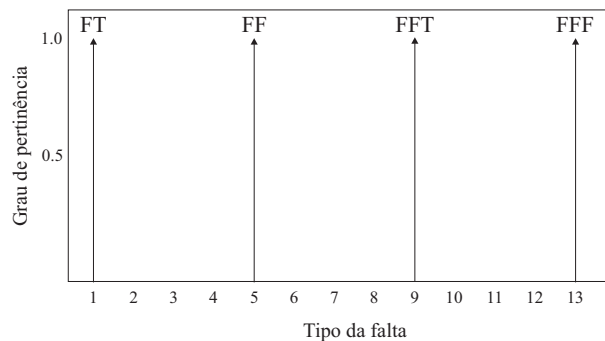


Figura 31: Variável de saída - Tipos de falta.

Uma vez efetuada a etapa de modelagem do SIF II, parte-se agora para a etapa da estruturação do mecanismo de inferência para classificação de faltas. Na sequência, será apresentada a máquina de inferência do SIF II.

4.3.2.2 SIF II - Máquina de Inferência

Assim como na seção 4.3.1.2, a abordagem adotada para a inferência é do tipo SE-ENTÃO. Para a máquina de inferência aqui desenvolvida, as informações antecedentes são as variáveis ΔV , ΔI , ψ e $I_{transitório}^{(1)}$. Já os termos consequentes são as possíveis tipos de falta avaliados.

A base de raciocínio do SIF II consiste fundamentalmente na avaliação da variação da tensão e da corrente ao longo do registro (de modo identificar a rejeição de carga) juntamente com o comportamento das componentes de sequência dessas grandezas ao longo do transitório de modo a destacar cada tipo de falta, individualmente.

O mapa de regras do SIF II pode ser visto na Tabela 9 e conta com 5 regras de ativação (uma para cada possível saída).

Tabela 9: Mapa de regras do SIF II.

Regra	ΔV	ΔI	ψ	$I_{transitório}^{(1)}$	$V_{transitório}^{(2)}$	Tipo da Falta
1	AL	AL	NU	BA	AL	FF
2	AL	AL	BA	BA	AL	FT
3	AL	AL	AL	BA	AL	FT
4	AL	AL	UN	BA	AL	FFT
5	AL	AL	-	AL	BA	FFF

Na Tabela 9, NU, BA, UN e AL correspondem as abreviações das funções de pertinência **Nulo**, **Baixo(a)**, **Unitário** e **Alto(a)**, respectivamente.

Após as três etapas fundamentais do classificador *fuzzy*, o sistema será capaz de correlacionar os eventos com os respectivos estados operacionais dos geradores levando em conta incertezas, ou seja, por se tratar de um sistema baseado em lógica *fuzzy*, a saída global do sistema pode possuir mais de uma pertinência em relação as saídas pré estabelecidas.

Assim como na inferência do SIF I, o processo escolhido para o SIF II é o método TSK de inferência. Deste modo, o próprio método dedutivo desempenha o papel de defuzzificação, não fazendo necessária a formulação individual deste processo.

Ao fim desta etapa, conclui-se a modelagem da metodologia de diagnóstico e classificação de eventos proposta, faltando agora uma abordagem que correlacione o evento em si juntamente com as filosofias de proteção registradas pelos RPDs.

4.4 Integralização de Eventos e Correlação de Informações dos Dispositivos de Proteção - Abordagem Fuzzy

Pensando em uma planta de geração, constituída por diversas máquinas, o trabalho aqui proposto busca integralizar o diagnóstico, ou seja, para um determinado

evento, avaliar o impacto do mesmo em todas as máquinas que compõe a planta, podendo assim ter uma visão geral do que ocorre na usina mediante uma situação de contingência.

Para isso, tanto o SIF I quanto o SIF II deve ser aplicado em toda a planta geradora, ou seja, em todas as n máquinas que compõe a usina. Desta forma, por exemplo, para um evento que cause o desligamento forçado na máquina G_1 , será possível observar os estados operacionais das demais máquinas mediante tal distúrbio. E assim inferir sobre a propagação do evento.

Já em relação a correlação dos eventos dos dispositivos de proteção monitorados pelos RDPs (que não são todos os presentes na planta), busca-se uma avaliação do comportamento destes em relação ao evento avaliado, ou seja, levando em conta que a metodologia proposta subsidia a análise global da planta pelos engenheiros analistas, os eventos digitais dos dispositivos de proteção podem ser apresentados de forma a correlacionar suas transições de acordo com a variação das grandezas elétricas durante o registro, sendo assim possível determinar se na ocorrência sob análise houve atuação de algum dispositivo de proteção, o que indica uma situação não corriqueira e que deve ser analisada com cautela pelos engenheiros analistas.

Além disso, buscar-se-á uma análise da segmentação empregada nos registros oscilográficos de acordo com avaliação da atuação da proteção. Deste modo, serão comparados o tamanho da janela de segmentação em relação ao tempo de atuação dos dispositivos de proteção. Sendo assim possível avaliar se a segmentação está adequada e engloba a duração do transitório do registro, podendo até, se necessário, uma reformulação dos parâmetros do método de segmentação.

A metodologia adotada para correlação das informações dos dispositivos de proteção segue a filosofia aplicado até o momento de utilizar conceitos de lógica difusa para a análise das informações. Deste modo, os mesmos procedimentos de modelagem *fuzzy* se fazem necessários.

4.4.1 Fuzzificação

As estampas de tempo dos dispositivos de proteção registrados pelos RDPs são obtidas a partir do instante em que ocorre o *trigger* de registro do RDP. Com base nisso, deseja-se correlacionar os instantes da janela de segmentação (instante inicial e final da janela) com as estampas de tempo dos dispositivos de proteção. Sendo então possível, de acordo com o *trigger* do registro avaliar se a segmentação está coerente com

a atuação dos dispositivos de proteção. A Figura 32 define os instantes relevantes da janela de segmentação que serão úteis para a correlação das informações dos dispositivos de proteção.

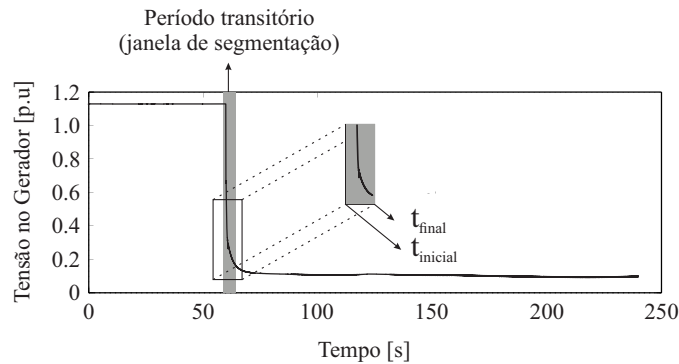


Figura 32: Definição dos tempos da janela de segmentação.

Idealmente, o estampa temporal inicial da janela de segmentação deve tender ao tempo de início da atuação da proteção.

A operação dos dispositivos de proteção acontece em dois instantes distintos (de acordo com sua filosofia de proteção): primeiro, a transição do estado lógico 0 para o estado lógico 1 e depois o retorno para o estado lógico inicial, ou seja, transição do estado 1 para o estado 0 (ou *vice versa*). A primeira transição é chamada de t_{TR1} e a segunda, t_{TR2} .

Desta forma, possuindo as estampas de tempo tanto da janela de segmentação, quanto da atuação dos dispositivos de proteção, busca-se modelar tais informações de modo que se tornem premissas de um mecanismo de inferência *fuzzy*.

Como dito, idealmente, as estampas iniciais da janela de segmentação e da atuação dos dispositivos de proteção devem coincidir. Além disso, o limiar da atuação da proteção dentro da janela de segmentação se dá quanto $t_{TR1} = t_{inicial}$. Logo, para que a atuação da proteção esteja dentro da janela de segmentação, a seguinte restrição deve ser atendida:

$$RT_1 = (t_{TR1} - t_{inicial}) \geq 0 \quad (59)$$

E ainda, a estampa inicial da atuação da proteção não deve estar localizada fora da janela de segmentação, ou seja:

$$RT_2 = (t_{final} - t_{TR1}) \geq 0 \quad (60)$$

Uma vez definindo as restrições algebricamente, basta uma abordagem difusa para uma representação semântica de RT_1 e RT_2 . As Figuras 33(a) e 33(b) apresentam as funções de pertinência de tais restrições.

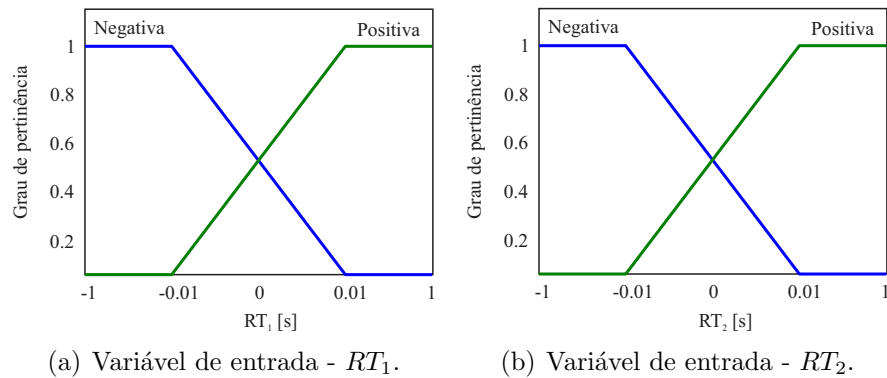


Figura 33: Variáveis de entrada (relação de estampas de tempo entre a janela de segmentação e atuação da proteção).

Uma vez modeladas as variáveis de entrada, se faz necessária também a modelagem dos termos consequentes do sistema, ou seja, as possíveis saídas do sistema *fuzzy* de correlação de informações temporais. Seguindo o que fora citado na Seção 4.3.1.1, são definidas as possíveis saídas do mecanismo de correlação.



Figura 34: Variável de saída - Resultado da correlação.

Na Figura 34, os termos **ADEQ** e **INAD** correspondem as abreviações das funções de pertinência **Adequada** e **Inadequada**, respectivamente.

Dispondo dos termos antecedentes e consequentes *fuzzy* para a correlação das informações temporais da janela de segmentação e da atuação dos dispositivos de proteção, se faz possível a construção de um mecanismo de inferência responsável por tal correlação.

4.4.2 Máquina de Inferência

A abordagem adotada para a máquina de inferência que correlaciona as informações temporais da janela de segmentação e da atuação dos dispositivos de proteção é também baseada no conceito SE-ENTÃO. Desta forma, as premissas do SIF são os valores de RT_1 e RT_2 . Já os termos consequentes dizem respeito a forma com que os dispositivos de proteção atuaram quando comparados com o tamanho da janela de segmentação.

O mapa de regras⁴ para este SIF pode ser visto na Tabela 10 :

Tabela 10: Mapa de regras do SIF responsável pela correção das informações dos dispositivos de proteção.

Regra	RT_1	RT_2	Atuação
1	NEG	POS	INAD
2	POS	NEG	INAD
3	POS	POS	ADEQ

Bem como na descrição do SIF I e SIF II, o método de inferência adotado é o método TSK de inferência por motivos outrora citados.

Na sequência, serão apresentados resultados com registros reais e simulados, visando validar a abordagem proposta e quantificar sua eficácia mediante diversos casos referentes ao dia a dia de uma planta geradora.

⁴NOTA: A regra referente ao caso onde RT_1 e RT_2 são negativas não é possível de ser obtida pois se $t_{TR1} < t_{inicial}$ implicará que $t_{TR1} < t_{final}$.

5 RESULTADOS

Como visto no Capítulo 4, a metodologia proposta é composta, fundamentalmente, por dois sistemas de inferência *fuzzy*. Um para a detecção do evento relacionado a unidade geradora e outro, que visa classificar a natureza do distúrbio em caso de desligamento da unidade. Desta forma, os resultados apresentados a seguir seguirão a mesma concepção (eventos convencionais que ativam somente o SIF I e, eventos nocivos que são diagnosticados como desligamento forçado pelo SIF I e necessitam ser classificados devidamente pelo SIF II).

5.1 Implementação da Metodologia

Como mencionado, para a validação da metodologia proposta, se fez uso de uma grande quantidade de registros reais, oriundos de uma planta termoeétrica de geração de energia. Porém, raros são os registros que referem-se a situações de contingência, ou seja, que representem situações de distúrbios que ocasionem o desligamento da unidade. Portanto, para validação do sistema de classificação de distúrbios, necessitou-se a utilização de registros oscilográficos simulados. Para tal, fez-se uso do *software MATLAB/Simulink*¹ (como será melhor destacado na Seção 5.3).

Uma vez dispondo de todos os registros (reais e simulados), a implementação da metodologia se efetuou com base na linguagem Python de programação. Python é uma linguagem de alto nível orientada a objeto, de tipagem dinâmica e forte, interpretada e interativa. Possui sintaxe clara e concisa, fato que favorece a legibilidade do código fonte, tornando a linguagem mais produtiva.

A linguagem inclui diversas estruturas de alto nível (tais como: listas, dicionários e outros) e uma vasta coleção de módulos prontos para uso, além de permitir a utilização de *frameworks* de terceiros. Python é um *software* de código aberto (com licença compatível com a *General Public License*(GLP), porém menos restritiva, permitindo que o Python seja inclusive incorporado em produtos proprietários. A especificação

¹The MathWorks, Inc.

da linguagem é mantida pela *Python Software Foundation* (PSF) (BORGES, 2010).

A linguagem foi criada em meados de 1990 por Guido van Rossum, no Instituto Nacional de Pesquisa para Matemática e Ciência da Computação da Holanda (CWI) e tinha originalmente foco em usuários como físicos e engenheiros. Atualmente, a linguagem é bem aceita na indústria por empresas de tecnologia, tais como Google, Yahoo, Microsoft, Nokia.

5.2 Resultados do SIF I - Diagnóstico do Distúrbio

Para a validação do SIF I foram realizados vários testes com registros oscilográficos reais (provenientes de uma usina que é detalhada no Anexo A) e não houve necessidade de nenhuma simulação. Todos esses registros reais permitiram uma concepção profunda do comportamento das grandezas elétricas mediante cada evento conhecido. Desta forma, houve uma avaliação constante da modelagem das funções de pertinência, de modo a garantir a fidelidade do diagnóstico.

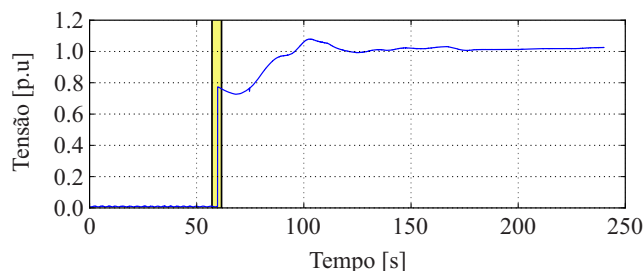
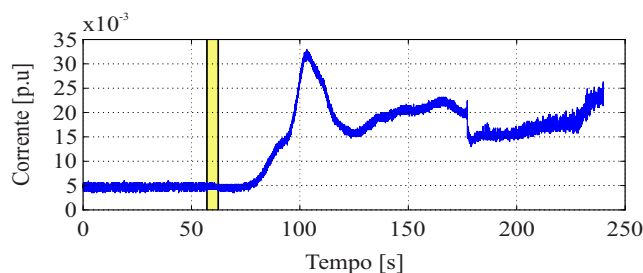
O SIF I foi testado com centenas de registros reais, porém, serão apresentados casos pontuais que visam elucidar o mecanismo de inferência e principalmente o resultado da metodologia mediante determinadas ocorrências.

5.2.1 Estudo de caso: Energização plena de uma unidade

O primeiro evento avaliado pelo SIF I é o registro oscilográfico referente a energização de uma unidade. Pela observação do registro, pode-se notar que a tensão varia de valores nulos para valores próximos do nominal enquanto a corrente não sofre variação relevante durante o registro, sendo assim, de imediato pode-se concluir que trata-se de uma energização onde não ocorre tomada de carga pela máquina. A Figura 35 mostra o registro da tensão e corrente de sequência positiva da unidade. As demais componentes simétricas foram suprimidas, pois apresentam valores nulos durante todo o registro. Além do mais, o registro já apresenta o janelamento referente a segmentação adequada do sinal, que, quando observado, refere-se ao segmento baseado no transitório da tensão.

O registro oscilográfico foi submetido a todas as etapas descritas na Figura 21 e a Tabela 11 apresenta os valores médios segmentados da tensão e da corrente da unidade.

Da Tabela 11, tomam-se os valores pré e pós-transitório da componente de

(a) Tensão nos terminais no gerador - $V^{(1)}$.(b) Corrente de carga do gerador - $I^{(1)}$.**Figura 35:** Registro oscilográfico típico de uma energização plena da unidade.**Tabela 11:** Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso de energização.

Grandeza	Valor pré-transitório [p.u.]	Valor pós-transitório [p.u.]
$V^{(0)}$	0.0052	0.0049
$V^{(1)}$	0.0090	0.9849
$V^{(2)}$	0.0110	0.0056
$I^{(0)}$	0.0015	0.0027
$I^{(1)}$	0.0095	0.0183
$I^{(2)}$	0.0009	0.0014

sequência positiva da tensão e da corrente como variáveis do SIF I. Como o próprio registro apresenta, a tensão de sequência positiva varia de um valor próximo de zero ($0.0090p.u.$) para um valor muito próximo do nominal ($0.9849p.u.$).

Com base nesses valores, podemos inferir em relação ao evento bastando apenas observar como os valores extraídos dos registros ativam as funções de pertinência das variáveis de entrada do SIF I (Figuras 23 e 24). Nota-se por exemplo, avaliando as variáveis *fuzzy*, que o valor pré-transitório da tensão se adequa perfeitamente à função de pertinência **nula** e, o valor pós-transitório pertence integralmente a função de pertinência **nominal**. Sendo assim, avaliando a Tabela 7, vemos que a regra 1 é ativada. O evento pode ser então descrito da seguinte forma:

SE $V_{pré}$ é Nula E $V_{pós}$ é Nominal E $I_{pré}$ é Nula E $I_{pós}$ é Nula ENTÃO Estado Operacional é Energização Plena com 100% de pertinência.

As características do evento dispararam somente uma regra do mecanismo de inferência (Tabela 7), desta forma, de modo a exemplificar o processo de inferência *fuzzy*, a Figura 36 demonstra de maneira detalhada como ocorre o mecanismo de avaliação.

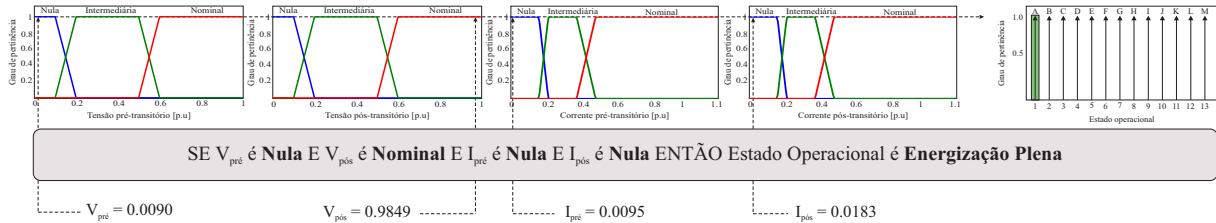


Figura 36: Demonstração do processo de inferência: Energização plena.

Nota-se que para cada entrada é calculado o respectivo grau de pertinência em relação as variáveis de entrada e, adota-se o mínimo valor como eleito para ativar a possível saída *fuzzy* (neste caso, todos os valores das pertinência são iguais a 1.0, logo, o mínimo valor pode ser escolhido de maneira arbitrária). Como a inferência percorre todo o banco de regras, esse processo é repetido n vezes (onde n é o número de regras que compõe o SIF²). Por fim, tendo calculado os pesos para cada regra, correlaciona-se as entradas com a saída de acordo com a(s) regra(s) que melhor se adequa(m) ao evento, sendo assim, para um mesmo evento pode ocorrer a ativação de mais de uma regra. Para o caso do registro da Figura 35, ocorreu o disparo de somente uma regra e a resposta global do SIF é dada com base na média ponderada das regras ativadas, para o caso aqui descrito tem-se, com base na Equação 40:

$$z = \frac{1.0 * 1}{1.0} = 1 \quad (61)$$

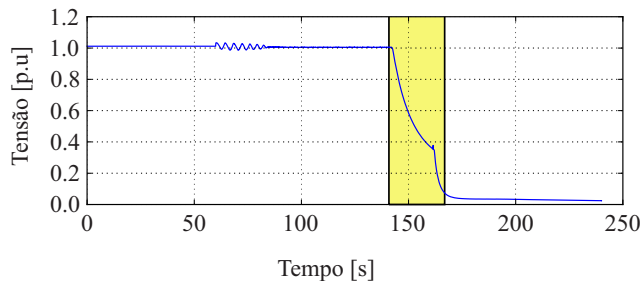
O resultado da Equação 61 nos diz qual a saída global do SIF (de acordo com a Figura 26). Por se tratar de um evento operacional da unidade, como era de se esperar, não houve a ativação do SIF II.

5.2.2 Estudo de caso: Desenergização plena de uma unidade

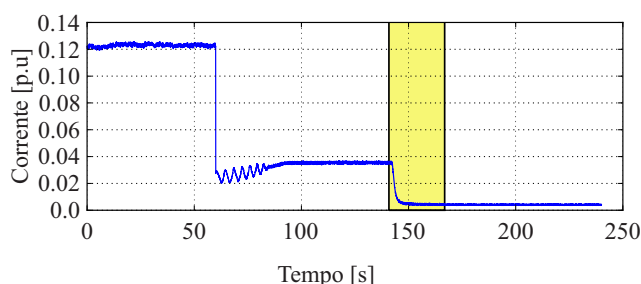
O próximo evento a ser avaliado pelo SIF I consiste no registro oscilográfico referente ao caso de desenergização de uma unidade. A Figura 37 apresenta o registro das componentes de sequência positiva da tensão e da corrente do gerador durante o evento. Como pode ser visto, houve uma diminuição da tensão de um valor próximo ao nominal

²no caso do SIF I, 22 vezes.

para um valor quase nulo, enquanto a unidade operava com baixo carregamento, muito provavelmente fornecendo energia aos serviços auxiliares da usina.



(a) Tensão nos terminais no gerador - $V^{(1)}$.



(b) Corrente de carga do gerador - $I^{(1)}$.

Figura 37: Registro oscilográfico típico de uma desenergização plena da unidade.

Os valores médios extraídos do registro são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso de desenergização.

Grandeza	Valor pré-transitório [p.u.]	Valor pós-transitório [p.u.]
$V^{(0)}$	0.0077	0.0051
$V^{(1)}$	1.0082	0.0328
$V^{(2)}$	0.0090	0.0063
$I^{(0)}$	0.0049	0.0011
$I^{(1)}$	0.0774	0.0104
$I^{(2)}$	0.0032	0.0008

Novamente, considerando os valores médios das componentes de sequência positiva da tensão e da corrente, e avaliando tais valores em relação as variáveis modeladas nas Figuras 23 e 24, nota-se que a tensão do gerador variou de um valor considerado **nominal** para um valor tido como **nulo**. Além do mais, durante o registro a corrente não sofreu variações que caracterizam carregamento da unidade, logo, manteve-se **nula** durante todo o registro.

Considerando tais informações, a inferência *fuzzy* para o registro da Figura 37 é:

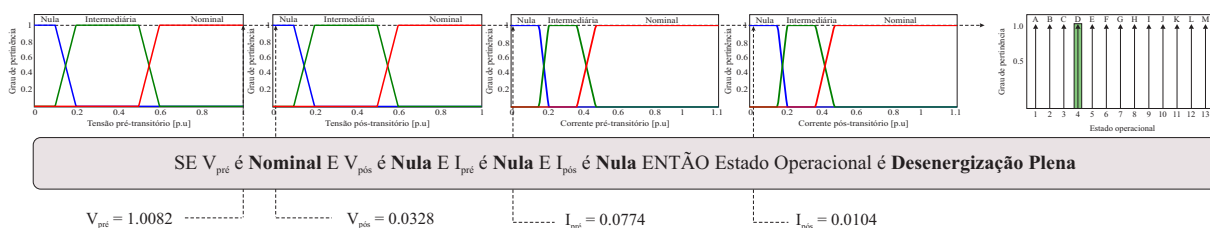


Figura 38: Demonstração do processo de inferência: Desenergização plena.

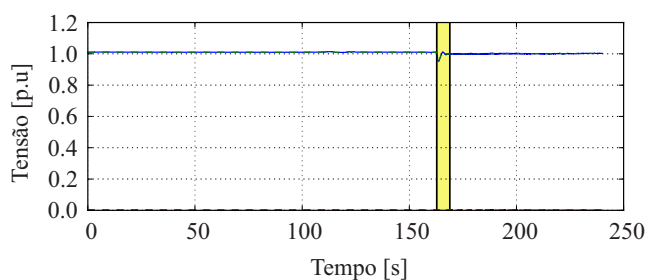
Tal evento pode ser descrito de acordo com a regra 6 da Tabela 7, que diz:

SE $V_{pré}$ é Nominal E $V_{pós}$ é Nula E $I_{pré}$ é Nula E $I_{pós}$ é Nula ENTÃO Estado Operacional é Desenergização Plena com 100% de pertinência.

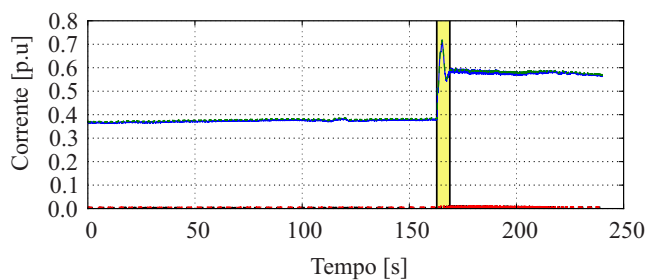
Novamente nota-se que o SIF se comportou de maneira coerente quando submetido a avaliação de um registro real e, a saída, como era esperado, representa de fato o evento em questão.

5.2.3 Estudo de caso: Incremento de carga na unidade

Outro evento típico em uma planta de geração refere-se ao caso onde ocorre o incremento de carga na unidade, ou seja, a tensão da máquina se mantém próxima do nominal enquanto ocorre um acréscimo no valor da corrente do gerador, caracterizando uma maior injeção de corrente no sistema. A Figura 39 apresenta o registro das grandezas elétricas da unidade mediante tal evento.



(a) Tensão nos terminais no gerador - $V^{(1)}$.



(b) Corrente de carga do gerador - $I^{(1)}$.

Figura 39: Registro oscilográfico referente ao caso de incremento de carga na unidade.

Nota-se que a unidade estava operando com uma corrente relativamente baixa (na ordem de $0.4p.u$) e ocorre um degrau de corrente, levando a mesma para valores próximos de $0.6p.u$.

No instante onde ocorre a tomada do bloco de carga, a tensão nos terminais do gerador sofre uma pequena diminuição e reestabelece-se após alguns segundos, retornando novamente a valores nominais.

A Tabela 13 apresenta os valores médios dos segmentos referentes ao registro em avaliação.

Tabela 13: Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso de incremento de carga na unidade.

Grandeza	Valor pré-transitório [p.u]	Valor pós-transitório [p.u]
$V^{(0)}$	0.0018	0.0020
$V^{(1)}$	1.0105	1.0044
$V^{(2)}$	0.0012	0.0012
$I^{(0)}$	0.0048	0.0057
$I^{(1)}$	0.3774	0.5849
$I^{(2)}$	0.0051	0.0060

De acordo com os valores extraídos do registro, e avaliando as regras ativadas da Tabela 7, nota-se que 2 regras são ativadas: a regra 13 (referente a operação normal da unidade) e a regra 18 (referente ao acréscimo de carga da unidade sem variação considerável no valor da corrente).

A Figura 40 apresenta o detalhamento da inferência para este caso.

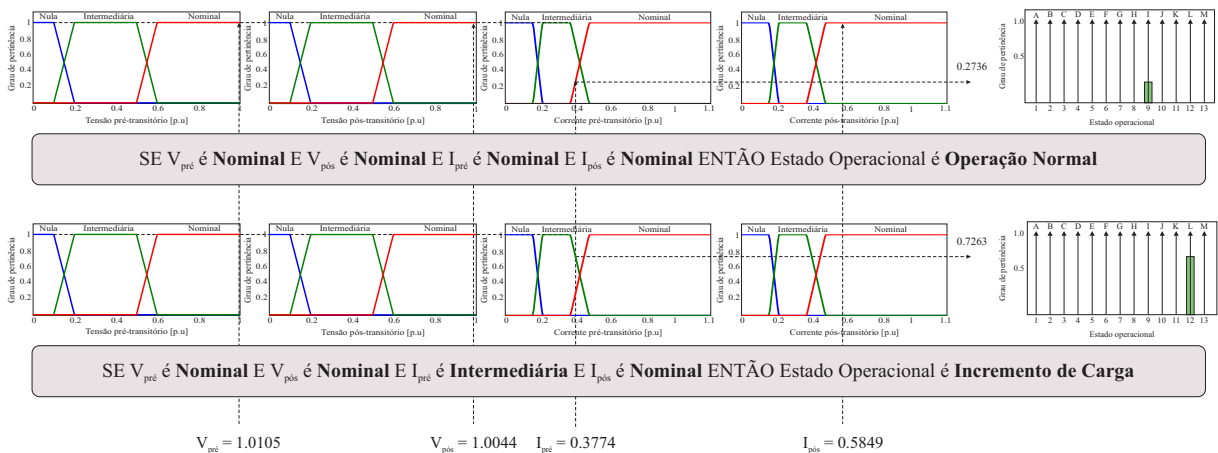


Figura 40: Demonstração do processo de inferência: Incremento de carga.

Logo, duas são as saídas do SIF para tal registro e são apresentadas da seguinte

maneira:

*SE $V_{pré}$ é **Nominal** E $V_{pós}$ é **Nominal** E $I_{pré}$ é **Nominal** E $I_{pós}$ é **Nominal** ENTÃO Estado Operacional é **Operação Normal** com 27,36% de pertinência.*

*SE $V_{pré}$ é **Nominal** E $V_{pós}$ é **Nominal** E $I_{pré}$ é **Intermediária** E $I_{pós}$ é **Nominal** ENTÃO Estado Operacional é **Incremento de Carga** com 72,63% de pertinência.*

Avaliando o registro da Figura 39 observa-se que de fato a unidade provavelmente assumiu um pequeno bloco de cargas (que ocasionou um aumento de aproximadamente $0.2p.u$ na corrente injetada pela unidade). Apenas com a análise gráfica é possível inferir que o evento não se trata de uma operação normal convencional, pois o valor pré-transitório da corrente é considerado nominal porém com baixo grau de pertinência (mas o suficiente para ativar regra 13). A regra 14 que também trata do caso de **Operação Normal** da unidade não foi ativada pois o valor pós-transitório da corrente intersecciona, em totalidade, a variável *fuzzy* $I_{pré}$ na função de pertinência **Nominal**, sendo assim, de acordo com a Tabela 7 a regra 14 não representa tal comportamento. Em relação a regra que diz respeito ao **Incremento de Carga** na unidade, a regra 17 da Tabela 7 não é ativada pois como observado na Figura 40, o valor da corrente pós-transitório não pertence a função de pertinência **Intermediário**, desta forma, tal regra não é considerada no processo de inferência. A regra que de fato define o estado de acréscimo de carga diz respeito a variação de corrente de um nível **Intermediário** antes do transitório para um nível **Nominal** após. Como a valor da corrente pré-transitório não intersecciona a função de pertinência **Intermediário** em plenitude, a regra é ativada não com 100% de pertinência.

Uma vez validado o SIF I, serão avaliados registros que causam o desligamento da unidade, ou seja, registros que inicializam o SIF II.

5.3 Resultados do SIF II - Classificação de Eventos

Para as situações de contingência deve-se efetuar uma análise transitória do distúrbio, permitindo assim a classificação da natureza do distúrbio. Eventos que causam desligamento forçado nas unidades não são comuns no dia a dia das usinas, portanto, para a validação do SIF II se fez necessária a aplicação de registros oscilográficos simulados, uma vez que não se possuía um acervo considerável de registros reais da planta geradora fornecedora dos registros oscilográficos.

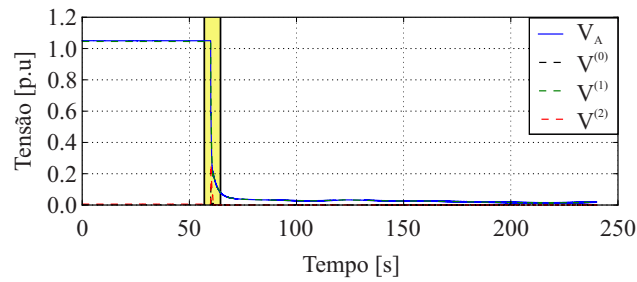
Para isso, utiliza-se a ferramenta de simulação *MATLAB/Simulink*, uma vez que a mesma possui um sistema de demonstração de uma unidade de geração hidroelétrica contendo os modelos já ajustados da turbina e dos controladores de velocidade e tensão. O sistema da Figura 51 (ver Anexo B) é composto pelos seguintes modelos de componentes: gerador síncrono, turbina e controle de velocidade, sistema de excitação e controle de tensão, transformador elevador, barramento infinito (desempenhando o papel de interligação com o SIN), transformador de aterramento (como pode ser visto na Figura 50 (Anexo A), os geradores são aterrados por meio de transformadores de aterramento), bloco de falta e cargas representando serviços auxiliares. Além do mais, a adição de blocos de medição permite que os dados possam ser exportados para o formato de registros oscilográficos e assim suas características podem ser extraídas e analisadas. A unidade simulada consiste em um gerador com potência nominal de $200MVA$ e $13.8kV$. As grandezas registradas são as tensões terminais e as correntes de carga do gerador e também a corrente de neutro do transformador elevador ($\Delta - Y$).

5.3.1 Estudo de caso: Desligamento forçado oriundo de um evento real

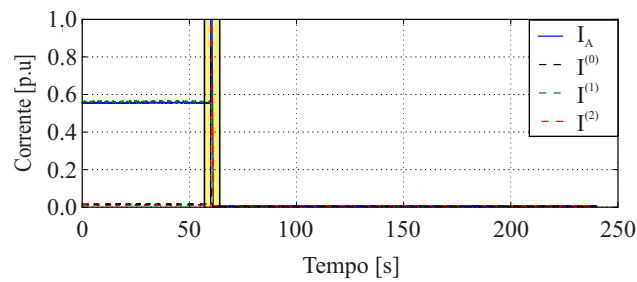
Um dos poucos registros oscilográficos reais referente ao caso de desligamento forçado é apresentado na Figura 41. O registro mostra o impacto de um curto circuito nos enrolamentos de alta tensão do transformador elevador ocorrido quando o para-raio explode e o cabo que o conectava toca o chão.

A Figura 42 mostra em detalhes o comportamento das componentes simétricas mediante o curto circuito.

Como apresentado no Anexo A, a planta geradora que fornece os registros dispõe de quatro unidades de geração. O registro mostrado na Figura 41 é referente ao

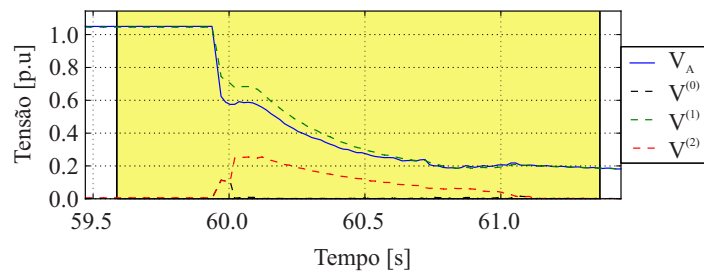


(a) Tensão nos terminais no gerador G_2 - Fase A e suas componentes simétricas.

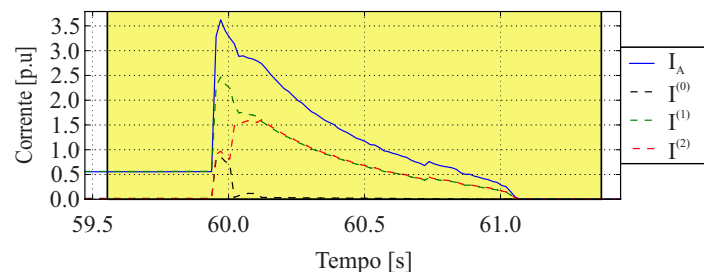


(b) Corrente de carga do gerador G_2 - Fase A e suas componentes simétricas.

Figura 41: Registro oscilográfico real referente ao desligamento forçado da unidade G_2 .



(a) Tensão nos terminais no gerador G_2 - Fase A e suas componentes simétricas.



(b) Corrente de carga do gerador G_2 - Fase A e suas componentes simétricas.

Figura 42: Detalhe do registro oscilográfico: curto circuito no lado de alta do transformador elevador.

comportamento da tensão e da corrente no gerador G_2 da planta.

Pela topologia do transformador elevador se $\Delta - Y$, o curto monofásico no lado de alta tensão é visto como bifásico no lado de baixa. A corrente de sequência zero no lado de alta não passa pelo gerador pois a ligação do transformador não permite. O que se vê de sequência zero na Figura 42 é oriundo do acoplamento capacitivo da instalação elétrica. Como o curto é visto pelo gerador como bifásico, percebe-se que os valores de sequência positiva e negativa são praticamente iguais (para a corrente).

Os valores extraídos do registro são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao curto circuito no transformador elevador.

Grandeza	Pré-transitório [p.u]	Transitório [p.u]	Pós-transitório [p.u]
$V^{(0)}$	0.00121	0.00030	0.00119
$V^{(1)}$	1.04531	1.07319	0.02759
$V^{(2)}$	0.00572	0.10379	0.00123
$I^{(0)}$	0.00032	0.07786	0.00034
$I^{(1)}$	0.97497	1.06732	0.00324
$I^{(2)}$	0.01072	0.42965	0.00585

Levando em consideração as componentes de sequência positiva extraídas do registro, a saída do SIF I é:

SE $V_{pré}$ é Nominal E $V_{pós}$ é Nula E $I_{pré}$ é Intermediária E $I_{pós}$ é Nula ENTÃO Estado Operacional é Desligamento Forçado com 96,78% de pertinência.

Sendo assim, como houve desligamento forçado, ocorre a inicialização do SIF II levando em conta as variações das grandezas durante o registro (ΔV e ΔI) e também o fator de tensão negativa desbalanceada (ψ). Desta forma, de acordo com as Equações 48, 49 e 57, tem-se que:

$$\Delta V = |0.02759 - 1.04531| = 1.01772p.u \quad (62)$$

$$\Delta I = |0.00324 - 0.97497| = 0.55642p.u \quad (63)$$

$$\psi = \frac{|V_{transitório}^{(0)}|}{|V_{transitório}^{(2)}|} = \frac{0.00030}{0.10379} = 2.89045 \times 10^{-3}p.u \quad (64)$$

Comparando os valores calculados em relação as variáveis de entrada do SIF

II (Figuras 27(a), 27(b) e 28(a)), vê-se que ambas as variações das grandezas possuem pertinência **alta** de acordo com a modelagem de ΔV e ΔI e de acordo com o valor do fator ψ , o mesmo é qualificado como sendo **nulo**. Sendo assim, de acordo com a Tabela 9, tem-se como saída do SIF II (que já era esperado):

*SE ΔV é **Alta** E ΔI é **Alta** E ψ é **Nulo** E $V_{transitório}^{(2)}$ é **Baixa** ENTÃO Tipo da Falta é **Falta Bifásica** com 100% de pertinência.*

Como mencionado, para eventos que causem o desligamento da unidade, será avaliado o comportamento dos dispositivos de proteção de tal máquina (de acordo com o proposto na Seção 4.4.

De acordo com o registro, as estampas temporais relevantes para correlação são:

Tabela 15: Estampas temporais da segmentação do registro oscilográfico.

Estampas	Tempo de ocorrência [s]
$t_{inicial}$	59.50413
t_{final}	60.87089

Para a unidade G_2 (que foi desligada devido ao distúrbio) a proteção atuante foi a proteção diferencial, de acordo com as informações do registro, os instantes de atuação foram:

Tabela 16: Instantes de transição da proteção diferencial do gerador G_2 .

Proteção	Tempo de ocorrência [s]
87A	60.01764
87B	60.02805
87C	60.02805

Uma avaliação rápida das informações das Tabelas 15 e 16 é suficiente para concluir que a atuação da proteção ocorreu devidamente dentro da janela de segmentação e então, conseqüentemente, a segmentação do registro está de acordo com o esperado.

Entretanto, utilizando uma abordagem difusa para classificação da atuação da proteção, necessita-se inicialmente a determinação dos instantes RT_1 e RT_2 , portanto, de acordo com as Equações 59 e 60:

Comparando os valores de RT da Tabela 17 com as variáveis das Figura 33 observa-se que os índices de cada atuação possuem pertinência **positiva**, desta forma, considerando ainda o mapa de regras do sistema responsável pela correlação da atuação

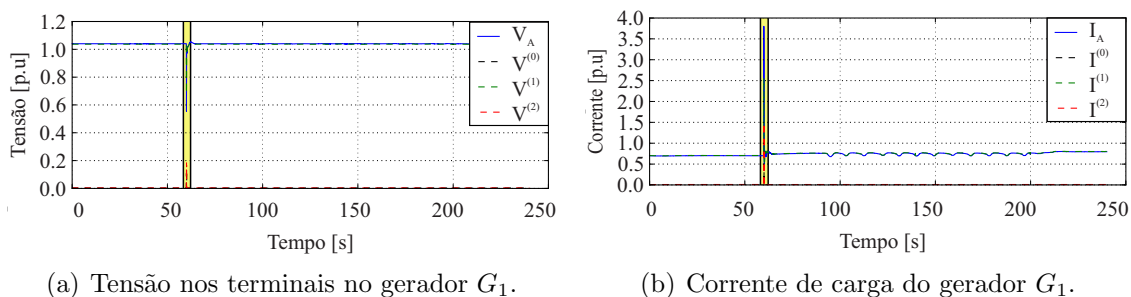
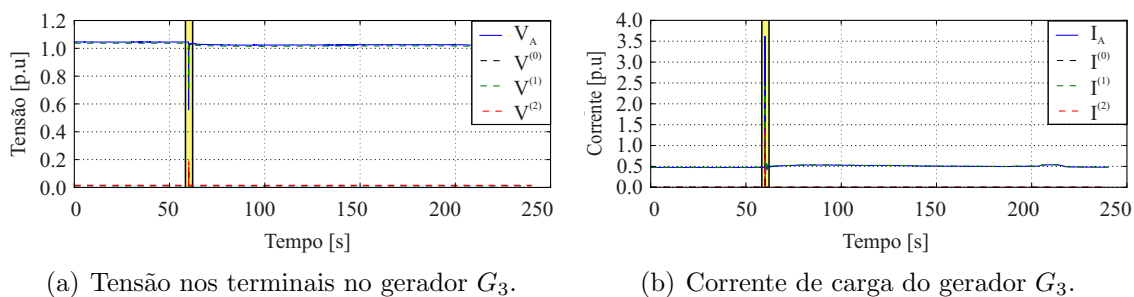
Tabela 17: Valores de RT_1 e RT_2 para a atuação da proteção de G_2 .

Proteção	RT_1 [s]	RT_2 [s]
87A	0.54684	1.43662
87B	0.55725	1.42621
87C	0.55725	1.42621

da proteção (Tabela 10) concluí-se que:

SE RT_1 é Positivo E RT_2 é Positivo ENTÃO Atuação da Proteção é Adequada com 100% de pertinência.

Como observado, o distúrbio gerou o desligamento do gerador G_2 e a atuação correta dos dispositivos de proteção. Além disso, é possível avaliar também o impacto de tal distúrbio nas demais máquinas (G_1 , G_3 e G_4). As Figuras 43, 44 e 45 mostram como se deu a propagação da falta em toda a planta geradora.

Figura 43: Comportamento da unidade G_1 mediante o distúrbio.Figura 44: Comportamento da unidade G_3 mediante o distúrbio.

Submetendo cada uma das unidades ao SIF I obtém-se a situação operacional de cada uma das demais máquinas. Tais estados operacionais são apresentados na Tabela 18 (onde I representa o estado de operação normal da unidade e H o estado fora de serviço da unidade - de acordo com a Tabela 7)

Como dito, a quantidade de registros reais referentes a casos de desligamento forçado é relativamente baixa. Desta forma, os demais testes com o SIF II se basearam

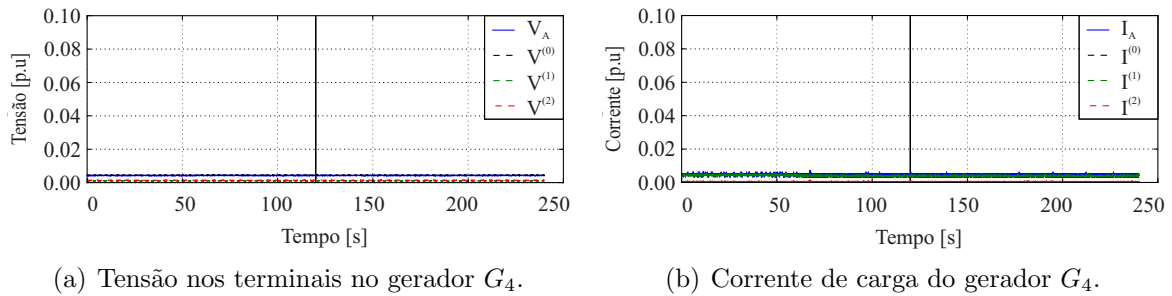


Figura 45: Comportamento da unidade G_4 mediante o distúrbio.

Tabela 18: Estado operacional de G_1 , G_3 e G_4 mediante o distúrbio.

Unidade	Estado Operacional	Grau de Pertinência
G_1	I	100%
G_3	I	100%
G_4	H	100%

na simulação de registros oscilográficos de longa duração. Como na sequência, onde é apresentado um caso de uma falta bifásica aterrada no lado de baixa tensão do transformador.

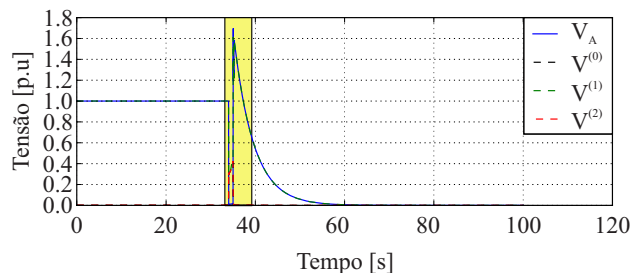
5.3.2 Estudo de caso: Falta bifásica aterrada

Um caso simulado que representa a ocorrência de uma falta bifásica aterrada é mostrado na Figura 46.

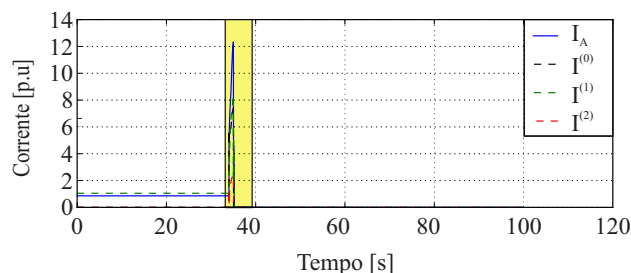
No instante da falta, a corrente no gerador se eleva para valores extremamente altos (na ordem de $12p.u.$) e, a tensão sofre uma diminuição abrupta. Na simulação, implantou-se uma lógica que objetiva emular o comportamento dos dispositivos de proteção de uma unidade real, sendo assim, para o caso em avaliação, após a percepção do distúrbio a unidade é removida do restante do sistema (caso típico de um desligamento forçado real). Sendo assim, tanto a tensão quanto a corrente decaem para valores nulos após o distúrbio.

Nota-se, pela Figura 46, que a janela de segmentação não condiz fielmente a duração do transitório. Propositalmente, esse fato foi induzido de modo a demonstrar que mesmo para uma segmentação não tão precisa, os valores segmentados do registro permitem ao sistema *fuzzy* uma análise coerente do evento.

A Tabela 19 apresenta os valores médios extraídos de cada segmento do registro avaliado.



(a) Tensão nos terminais no gerador - Fase A e suas componentes simétricas.



(b) Corrente de carga do gerador - Fase A e suas componentes simétricas.

Figura 46: Registro oscilográfico simulado referente a uma falta bifásica aterrada na unidade.**Tabela 19: Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso da falta bifásica aterrada.**

Grandeza	Pré-transitório [p.u.]	Transitório [p.u.]	Pós-transitório [p.u.]
$V^{(0)}$	0.00113	0.11139	0.00011
$V^{(1)}$	1.00046	0.92837	0.05289
$V^{(2)}$	0.00113	0.11476	0.00011
$I^{(0)}$	0.00052	1.85528	7.35953×10^{-7}
$I^{(1)}$	1.05040	3.42533	0.000824
$I^{(2)}$	0.00052	0.54435	7.30417×10^{-7}

Um modo de tornar mais precisa a segmentação (quando houver necessidade de incoerência na classificação) é alterando o tamanho da janela de segmentação, como visto na Equação 46.

Tomando os valores da sequência positiva da tensão e da corrente e avaliando-os em relação as variáveis de entrada do SIF I (Figuras 23 e 24) e buscando a regra na Tabela 7 que melhor descreve o evento, percebe-se que o mesmo trata-se de um caso claro de desligamento forçado da unidade (regra 9). Sendo assim, com base nos valores extraídos do registro, o SIF I gera o seguinte diagnóstico:

*SE $V_{pré}$ é **Nominal** E $V_{pós}$ é **Nula** E $I_{pré}$ é **Nominal** E $I_{pós}$ é **Nula** ENTÃO Estado Operacional é **Desligamento Forçado** com 100% de pertinência.*

Uma vez que a saída gerada pelo SIF I é referente a um desligamento forçado, esse evento é o responsável pela inicialização do SIF II, sendo assim, parte-se para a análise do distúrbio que ocasionou o desligamento forçado.

Inicialmente, avalia-se a variação (Equações 48 e 49) das grandezas mediante o transitório (esse passo serve também como comprovação do desligamento forçado).

Deste modo, quantificam-se as variações como segue:

$$\Delta V = |0.05289 - 1.00046| = 0.94757p.u \quad (65)$$

$$\Delta I = |0.000824 - 1.05040| = 1.04957p.u \quad (66)$$

Comparando as Equações 65 e 66 com as variáveis ΔV e ΔI apresentadas na Figura 27, observa-se que ambas as variações se enquadram como sendo uma variação **alta** das grandezas, sendo assim, comprova-se que de fato ocorreu o desligamento da unidade.

Uma vez comprovado o desligamento, busca-se a identificação da natureza da falta. Para isso, através da Equação 57 avalia-se a relação dos valores médios durante o transitório das componentes de sequência. Concomitantemente, avaliando o transitório do registro na Figura 47, nota-se que as componentes de sequência da tensão são praticamente iguais durante o transitório, satisfazendo assim a Equação 56.

Deste modo, de acordo com a Equação 57, temos que:

$$\psi = \frac{|V_{transitório}^{(0)}|}{|V_{transitório}^{(2)}|} = \frac{0.11139}{0.11476} = 0.9706 \cong 1 \quad (67)$$

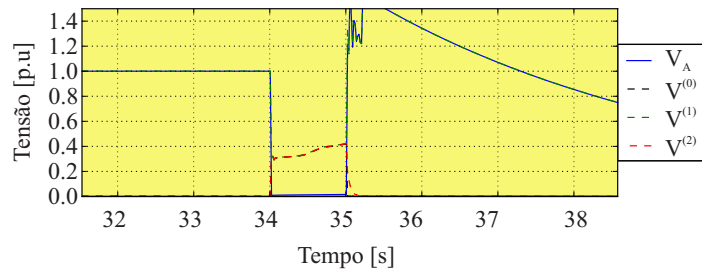
Finalmente, a saída do SIF II para o evento que ocasionou o desligamento forçado na unidade é:

*SE ΔV é **Alta** E ΔI é **Alta** E ψ é **Unitário** E $V_{transitório}^{(2)}$ é **Baixa** ENTÃO
Tipo da Falta é **Falta Bifásica Aterrada** com 100% de pertinência.*

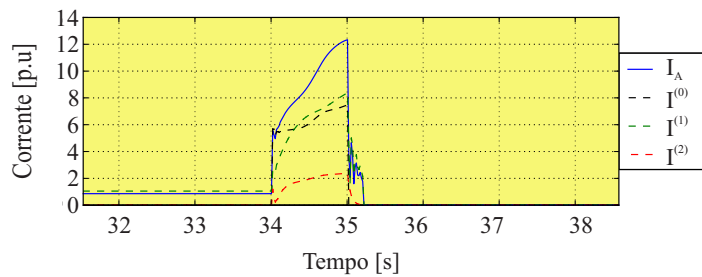
5.3.3 Estudo de caso: Falta trifásica

Por fim, o SIF é avaliado mediante ocorrência de um distúrbio de natureza trifásica. O registro simulado da falta é apresentado na Figura 48.

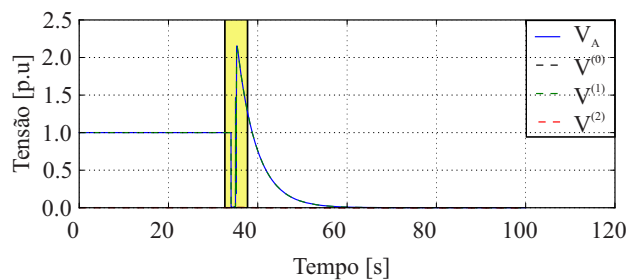
Um detalhe do instante do transitório do registro é mostrado na Figura 49.



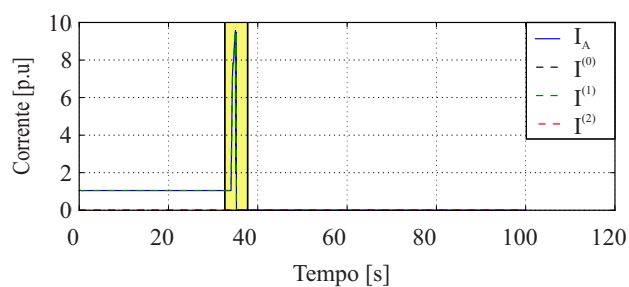
(a) Tensão nos terminais no gerador - Fase A e suas componentes simétricas.



(b) Corrente de carga do gerador - Fase A e suas componentes simétricas.

Figura 47: Detalhe do registro oscilográfico: falta bifásica aterrada na unidade.

(a) Tensão nos terminais no gerador - Fase A e suas componentes simétricas.

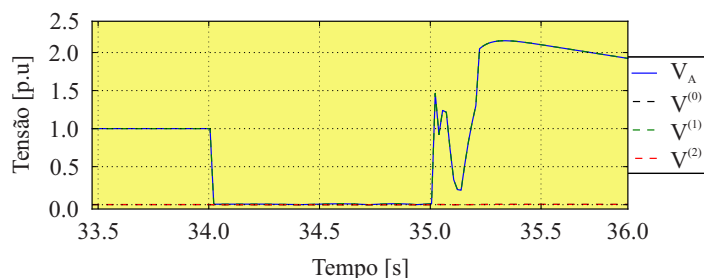


(b) Corrente de carga do gerador - Fase A e suas componentes simétricas.

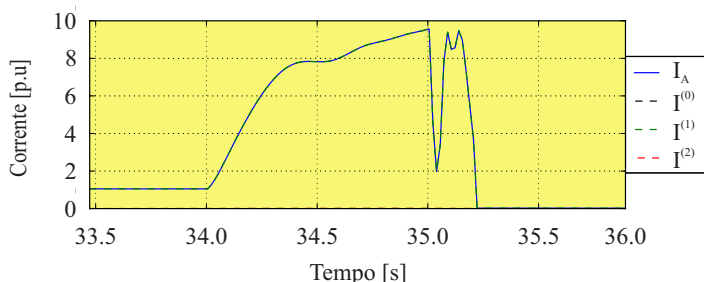
Figura 48: Registro oscilográfico simulado referente a uma falta trifásica na unidade.

Nota-se que, durante o transitório, por se tratar de uma falta equilibrada, os valores das componentes de sequência negativa e zero são praticamente nulas durante todo o registro. As informações relevantes extraídas do registro são apresentadas na Tabela 20:

Com base na Tabela 7, a saída do SIF I para tal evento é:



(a) Tensão nos terminais no gerador - Fase A e suas componentes simétricas.



(b) Corrente de carga do gerador - Fase A e suas componentes simétricas.

Figura 49: Detalhe do registro oscilográfico: falta trifásica na unidade.

Tabela 20: Valores extraídos do registro oscilográfico referente ao caso da falta trifásica.

Grandeza	Pré-transitório [p.u.]	Transitório [p.u.]	Pós-transitório [p.u.]
$V^{(0)}$	0.00099	9.09697×10^{-5}	8.36852×10^{-6}
$V^{(1)}$	1.00041	1.27077	0.05427
$V^{(2)}$	0.00098	9.13587×10^{-5}	8.14187×10^{-6}
$I^{(0)}$	2.32558×10^{-7}	5.07087×10^{-7}	2.34668×10^{-7}
$I^{(1)}$	1.03114	3.42533	0.00157
$I^{(2)}$	3.56911×10^{-7}	5.07956×10^{-7}	2.54311×10^{-7}

$SE V_{pré}$ é **Nominal** $E V_{pós}$ é **Nula** $E I_{pré}$ é **Nominal** $E I_{pós}$ é **Nula** ENTÃO Estado Operacional é **Desligamento Forçado** com 100% de pertinência.

Já em relação ao SIF II, considerando que $\Delta V = 0.94614 p.u.$, $\Delta I = 1.02957 p.u.$, $V_{transitório}^{(2)} = 9.13587 \times 10^{-5} p.u.$ (lembrando que para o diagnóstico da falta trifásica o valor de ψ não se faz necessário, uma vez que trata-se de uma falta equilibrada), tem-se (de acordo com a Tabela 9):

$SE \Delta V$ é **Alta** $E \Delta I$ é **Alta** $E V_{transitório}^{(2)}$ é **Baixa** ENTÃO Tipo da Falta é **Falta Trifásica** com 100% de pertinência.

Desta forma, tanto o SIF I quanto o SIF II se mostraram eficazes na tarefa de diagnóstico automático de eventos. Fato esse que valida a metodologia proposta como uma ferramenta útil na tarefa de análise automática de registros oscilográficos, facilitando

e otimizando o trabalho dos engenheiros analistas no dia a dia da operação de uma planta geradora.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para diagnóstico e classificação automática de eventos em plantas de geração de energia elétrica. Embora contemple um problema específico (diagnóstico de equipamentos em SEPs), o trabalho envolve conhecimentos multidisciplinares, tais como proteção de sistemas elétricos de potência, modelagem e simulação, inteligência artificial e programação computacional.

A aplicação desta metodologia se faz evidente quando leva-se em conta o trabalho diário desempenhado por engenheiros analistas, que, lidam com um elevado número de informações (registros oscilográficos) provenientes de diversos RDPs e concentrados em uma central de informação. Soma-se à isso, o fato de que a grande maioria dos registros referem-se a situações operacionais do dia-a-dia de uma planta geradora, podendo ser então, desconsiderados como situações de contingência. Perante esses aspectos, a estruturação de uma metodologia automática de diagnóstico que busque efetuar uma triagem inicial no montante de registros oscilográficos se faz justificada, uma vez que tende a minimizar a sobrecarga operacional dos engenheiros responsáveis pela análise oscilográfica.

A metodologia proposta é composta por dois sistemas *fuzzy* específicos e um sistema *fuzzy* auxiliar. O primeiro sistema *fuzzy* desempenha o papel de identificador do estado operacional da máquina, ou seja, como a unidade operava e como passou a operar após o evento registrado pelo RDP. Já o segundo sistema *fuzzy* é acionado se e somente se o evento diagnosticado pelo primeiro sistema se referir ao desligamento da unidade, ou seja, se a unidade (após o evento) é removida do restante do sistema elétrico (caracterizando a atuação da proteção mediante uma situação de contingência), a execução desse último sistema *fuzzy* (SIF II) implica na execução de um sistema *fuzzy* que tem como função avaliar e correlacionar se os dispositivos de proteção operaram de maneira correta frente ao distúrbio. Permitindo assim, uma avaliação global dos dispositivos de proteção que são monitorados pelos canais digitais dos RDPs.

Ao decorrer do trabalho, a abordagem difusa se mostrou extremamente eficiente no tratamento de incertezas e, principalmente, na substituição de limiares rígidos na ativação das regras de inferência. Os conceitos semânticos que compõe um sistema

fuzzy tendem a tornar mais intuitiva a tarefa de identificação das transições de níveis das variáveis elétricas envolvidas no diagnóstico, pois se aproximam muito da linguagem natural desempenhada pelos analistas de oscilografias. Sendo assim, ao se observar o comportamento da máquina de inferência dos sistemas *fuzzy* propostos, é possível vislumbrar o próprio conhecimento humano sendo executado. Ainda em relação ao sistema *fuzzy*, a expansão do mesmo (em números de variáveis ou de regras, ou ambos) pode ser realizada de maneira trivial (sem necessidade de um conhecimento aprofundado nos conceitos difusos). Entretanto, a expansão do sistema deve ser desenvolvida tendo em mente o real funcionamento dos eventos que podem ocorrer em uma planta geradora, pois assim evita-se que existam informações que não condizem com a realidade do sistema elétrico.

No tocante da contribuição científica, a metodologia proposta visa solucionar problemas que não são apresentados com frequência na literatura. Exemplificando este fato, destaca-se aqui a aplicação de registros fasoriais de longa duração como ferramenta para diagnóstico de eventos e, principalmente, na classificação de faltas (aplicação não vista até o momento na literatura). Além disso, a proposição do fator de identificação de faltas é algo que unifica as características intrínsecas de cada falta em uma entidade única, o que facilita a abordagem e, por consequência, a compreensão do distúrbio. A aplicação da lógica *fuzzy* também se destaca pois substitui limites exatos de conclusão através de uma abordagem semântica, dando um dinamismo ao sistema e permitindo um tratamento de informações de uma maneira heurística.

Sendo assim, conclui-se que a metodologia correspondeu de forma completa ao proposto nos capítulos introdutórios deste trabalho, pois se mostrou capaz de fornecer a possibilidade de priorização do trabalho aos engenheiros analistas. Devido ao seu mecanismo de inferência, se mostrou hábil a triar registros que não representem situações críticas ao sistema e, para aqueles casos onde ocorre a contingência, o sistema ainda é capaz de gerar informações relevantes (tal como a natureza da falta) ao engenheiro analista. Subsidiando e, principalmente, otimizando o trabalho de análise desenvolvido pelo mesmo.

7 TRABALHOS FUTUROS

Diversas são as opções para continuação e melhoria deste trabalho. Listam-se a seguir algumas delas:

1. Avaliar a utilização de outras funções de pertinência na modelagem das informações (por exemplo, utilizar funções não tão elementares e inferir sobre a real contribuição das mesmas em relação a abordagem proposta).
2. Aplicar outras técnicas de inteligência artificial para diagnóstico e classificação de distúrbios. Por exemplo, a aplicação de Redes Neurais ou Árvores de Decisão, substituindo os SIFs existentes.

REFERÊNCIAS

- BORGES, Luiz Eduardo. **Python para Desenvolvedores**. 2 . ed. [S.l.: s.n.], 2010.
- CAMPOS, Mario Cesar Mello Massa de; SAITO, Kaku. **Sistemas Inteligentes para Controle, Automação e Otimização de Processos**. [S.l.]: Ciência Moderna, 2004.
- CHANTLER, M.; POGLIANO, P.; ALDEA, A; TORNIELLI, G.; WYATT, T.; JOLLEY, A. The use of fault-recorder data for diagnosing timing and other related faults in electricity transmission networks. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 4, p. 1388–1393, Nov 2000. ISSN 0885-8950.
- CHEN, G.; PHAM, T.T. **Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2000. ISBN 9781420039818.
- COSTA, Flávio Bezerra; SOUZA, Benemar Alencar de; BRITO, Núbia Silva Dantas. Detecção de faltas evolutivas e múltiplos distúrbios em registros oscilográficos baseada na transformada wavelet discreta. **Sba: Controle & Automação**, scielo, v. 21, p. 173 – 184, 04 2010. ISSN 0103-1759.
- COX, Earl. **The Fuzzy Systems Handbook**. [S.l.]: Academic Press, Inc., 1994.
- DASH, P.K.; MISHRA, S.; SALAMA, M.M.A.; LIEW, A.C. Classification of power system disturbances using a fuzzy expert system and a fourier linear combiner. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 2, p. 472–477, Apr 2000. ISSN 0885-8977.
- DAVILA, H. Records from dfrs vs. records from microprocessor-based relays. In: **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T D-LA), 2010 IEEE/PES**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 635–644.
- DONGYUAN, Shi; XINGHUA, Wang; XIANZHONG, Duan. Road to the integrated protective relaying fault information system. In: **Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. –26 Vol. 1.
- DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Electric Power Systems Quality**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 2002.
- FALQUETO, J.; TELLES, M.S. Automation of diagnosis of electric power transformers in itaipu hydroelectric plant with a fuzzy expert system. In: **Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 577–584.

GOLI, Ravi Kumar; SHAIK, Abdul Gafoor; RAM, S.S Tulasi. A transient current based double line transmission system protection using fuzzy-wavelet approach in the presence of {UPFC}. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 70, n. 0, p. 91 – 98, 2015. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151500054X>>.

GUPTA, M.M.; QI, J. Theory of t-norms and fuzzy inference methods. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 40, n. 3, p. 431 – 450, 1991. ISSN 0165-0114. Fuzzy Logic and Uncertainty Modelling.

HOUAISS, A.; VILLAR, S. M.; FRANCO, M. M. F. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. [S.l.]: Instituto Antônio Houaiss de lexicografia, 2001.

IEEE. **IEEE Standart Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power System**. Piscataway, NJ, 1999.

KALIWODA, M.; KEUNE, B.; TOMIN, N.; REHTANZ, C. Fault detection, identification and localization in medium-voltage networks using fuzzy-logic. In: **Developments in Power System Protection (DPSP 2014), 12th IET International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.

KEZUNOVIC, M. Use of intelligent techniques for analysis of faults and protective relay operations. In: **Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–3. ISSN 1932-5517.

KEZUNOVIC, M.; SPASOJEVIC, P.; FROMEN, C.W.; SEVCIK, D.R. An expert system for transmission substation event analysis. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 4, p. 1942–1949, Oct 1993. ISSN 0885-8977.

KLIR, George J.; YUAN, Bo. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications**. [S.l.]: Prentice Hall, 1995.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1994.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. **International Journal of Human-computer Studies / International Journal of Man-machine Studies**, v. 7, p. 1–13, 1975.

MATLAB. **Fuzzy Logic Toolbox - User's Guide**. 2.2.20. ed. [S.l.], October 2014. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf>.

MCARTHUR, S.D.J.; DAVIDSON, E.M. Automated post-fault diagnosis of power system disturbances. In: **Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 6 pp.–.

MONEDERO, I.; LEON, C.; ROPERO, J.; GARCIA, A.; ELENA, J.M.; MONTANO, J. C. Classification of electrical disturbances in real time using neural networks. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 22, n. 3, p. 1288–1296, July 2007. ISSN 0885-8977.

- MORETO, Miguel. **Análise Automática de Registros Digitais de Perturbações em Unidades Geradoras**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- MORETO, Miguel; CIESLAK, Dionatan; ROLIM, Jacqueline G. Classification of disturbance records in power stations based on fuzzy reasoning. **18th Power Systems Computation Conference**, 2014.
- MORETO, M.; ROLIM, J.G.; VARELA, F.S. Automating the diagnosis of occurrences in power plants using data from dfr and sequence of events: an expert system based methodology. In: **Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. **Sba: Controle & Automação**, v. 21, n. 4, 2010.
- MUSTAFA, M.; EL-KHATTAM, W.; GALAL, Y. A novel fuzzy cause-and-effect-networks based methodology for a distribution system's fault diagnosis. In: **Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- ONS. **Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica**, (Procedimentos de rede, submódulo 3.6). Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009. Disponível em: <www.ons.org.br>.
- PAITHANKAR, Y.G; BHIDE, S.R. **Fundamentals of Power System Protection**. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2003.
- PODVIN, H. A fuzzy-logic-based fault recognition method using phase angles between current symmetrical components in automatic dfr record analysis. In: **Power Tech, 2005 IEEE Russia**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6.
- QIAN, Ma; YIHAN, Yang; ZHENG, Qi. A hybrid algorithm of on-line fault diagnosis. In: **Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 991–997 Vol.1.
- RAO, U.M.; REDDY, M.V.P.; JARIAL, R.K. Fuzzy logic based system to diagnose internal faults of power transformer. In: **Communication and Industrial Application (ICCIA), 2011 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5.
- REASON TECNOLOGIA S.A. **GERCOM-II Sistema de Gerenciamento de Oscilografias**. R008-mr-r2. [S.l.], 2005. Disponível em: [http: www.reason.com.br](http://www.reason.com.br).
- REAZ, M.B.I.; CHOONG, F.; SULAIMAN, M.S.; MOHD-YASIN, F.; KAMADA, M. Expert system for power quality disturbance classifier. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 22, n. 3, p. 1979–1988, July 2007. ISSN 0885-8977.

RODRÍGUEZ, Pedro Vicente Jover; ARKKIO, Antero. Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic. **Applied Soft Computing**, v. 8, n. 2, p. 1112 – 1120, 2008. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494607000981>>.

ROLIM, Jacqueline G.; ZÜRIN, Hans Helmut; JR, Ghendy Cardoso. Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: Definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Sba: Controle & Automação**, v. 15, n. 2, 2004.

ROSS, T.J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. [S.l.]: Wiley, 2009. ISBN 9780470748510.

SAADAT, Hadi. **Power System Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1999.

SAHA, S.; ALDEEN, M. Generic scalable fault diagnosis system for multima-
chine power grids. **International Journal of Electrical Power & Energy
Systems**, v. 59, n. 0, p. 36 – 57, 2014. ISSN 0142-0615. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514000398>>.

SAINI, Manish Kumar; KAPOOR, Rajiv. Classification of power quality events - a review. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 43, n. 1, p. 11 – 19, 2012. ISSN 0142-0615.

SAMANTARAY, S.R. Decision tree-initialised fuzzy rule-based approach for power quality events classification. **Generation, Transmission Distribution, IET**, v. 4, n. 4, p. 530–537, April 2010. ISSN 1751-8687.

SILVA, Kleber Melo e; SOUZA, Benemar Alencar de; BRITO, Núbia Silva Dantas; DANTAS, Karcus Marcelus Colaço; COSTA, Fláio Bezerra; SILVA, Sandra Sayonara Bispo da. Detecção e classificação de faltas a partir da análise de registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada wavelet. **Sba: Controle & Automação**, scielo, v. 18, p. 163 – 172, 06 2007. ISSN 0103-1759.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. [S.l.]: Editora Blucher, 2007.

STEVENSON, Jr. William D. **Elements of Power System Analysis**. Second. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1962.

STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2 . ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Ltda., 1986.

SUGENO, M; KANG, G.T. Structure identification of fuzzy model. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 28, n. 1, p. 15 – 33, 1988. ISSN 0165-0114.

TAIFENG, Kang; WENCHUAN, Wu; HONGBIN, Sun; BOMING, Zhang; XIAO, Qian. A hybrid fault event detection algorithm using fault recorder data. In: **Future Power and Energy Engineering (ICFPEE), 2010 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 38–41.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on**, SMC-15, n. 1, p. 116–132, Jan 1985. ISSN 0018-9472.

TCHEOU, Michal Pompeu. **Análise e Representação de Sinais de Oscilografia Usando Decomposições Adaptativas Redundantes**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

YOUSSEF, O.A.S. Applications of fuzzy inference mechanisms to power system relaying. In: **Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 560–567 vol.1.

YOUSSEF, O.A.S. Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 2, p. 582–589, April 2004. ISSN 0885-8977.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338 – 353, 1965. ISSN 0019-9958.

ZADEH, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. **Information Sciences**, v. 8, n. 3, p. 199 – 249, 1975. ISSN 0020-0255.

ZIN, AAM.; KARIM, S.P. Abdul. The utilization of digital fault recorders in protection system analysis on tenaga nasional berhad transmission system. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 22, n. 4, p. 2040–2046, Oct 2007. ISSN 0885-8977.

ZIN, Abdullah Asuhaimi Mohd; KARIM, Sazali P. Abdul. Protection system analysis using fault signatures in malaysia. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 45, n. 1, p. 194 – 205, 2013. ISSN 0142-0615.

ANEXO A - DIAGRAMA UNIFILAR DA PLANTA DE GERAÇÃO AVALIADA

Todas as análises operacionais propostas neste trabalho se baseiam em dados oscilográficos reais provenientes de uma usina termoeletrica formada por 4 unidades geradoras com potência nominal de 24 MVA, tensão terminal nominal de 6 kV e frequência de 50 Hz. O fato da usina operar em 50 Hz é resultado de que quanto a mesma entrou em operação (anos 60) o sistema elétrico Brasileiro não possuía o nível de interligação atual, sendo assim, alguns subsistemas mais antigos ainda operam com frequência de 50 Hz.

O crescimento do sistema elétrico implicou na padronização da frequência em 60 Hz, implicando, posteriormente na instalação de duas unidades eletromecânicas de conversão de frequência. Essas unidades, cada uma com capacidade de 35 MVA, são constituídas de duas máquinas síncronas acopladas diretamente. Uma de 10 pólos, alimentada em 13,8 kV (50 Hz) operando como motor síncrono e outra de 12 pólos também com tensão de 13,8 kV em 60 Hz. Com velocidade nominal de 600 rpm, a relação de pólos das duas máquinas permite a conversão apropriada de frequência. Um esquemático da usina térmica avaliada é apresentado na Figura 50.

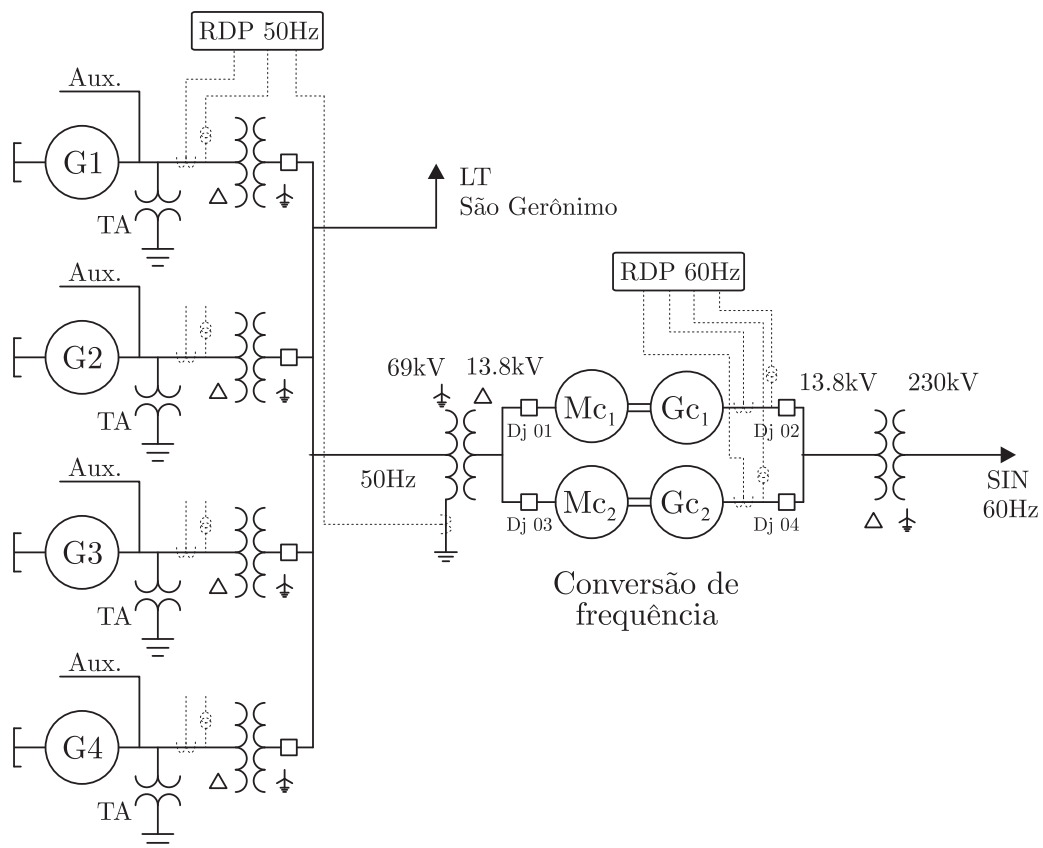


Figura 50: Diagrama unifilar da usina térmica.

ANEXO B - SISTEMA IMPLEMENTADO PARA SIMULAÇÕES

A Figura 51 apresenta a visão geral do modelo utilizado nas simulações de faltas.

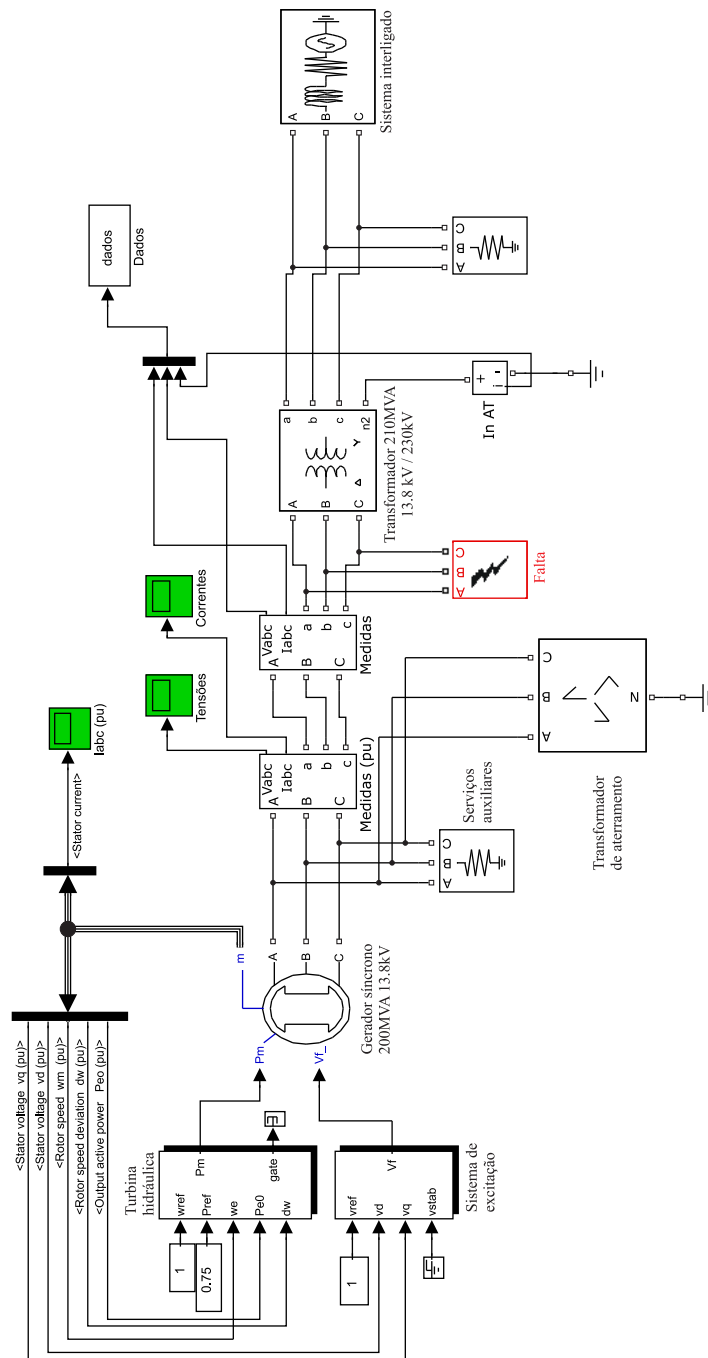


Figura 51: Diagrama de blocos do modelo simulado.