

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIONATAN AUGUSTO GUIMARÃES CIESLAK

**DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA
ELÉTRICA UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

DIONATAN AUGUSTO GUIMARÃES CIESLAK

**DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE UNIDADES GERADORAS DE
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA**, do aluno **DIONATAN AUGUSTO GUIMARÃES CIESLAK** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **50** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Dr. Miguel Moreto

Dr. Cesar ClaireTorrico

Me. Ósis Eduardo Silva Leal

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus pela força e energia concedida durante esses cinco anos.

Agradeço profundamente aos meus pais pelo apoio incondicional depositado em mim. Pessoas fundamentais que sempre possuíam as palavras certas para me encorajar nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus colegas de graduação que ao longo desses cinco anos foram se tornando cada vez mais parte de uma família e que sempre nos momentos de dúvida, de algum, sempre emergia uma solução.

Ao professor Dr. Miguel Moreto pelos ensinamentos, conselhos e diálogos que sempre me foram úteis e que com certeza levarei para a vida.

Ao seletor de grupo de professores de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Pato Branco, que contribuíram muito para o crescimento intelectual, mas essencialmente honraram o título que carregam e provaram que o conhecimento só é útil quando é repassado.

EPÍGRAFE

“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.”

Epícuro de Samos (341 a.C. – 270 a.C.)

RESUMO

CIESLAK, Dionatan Augusto Guimarães. Diagnóstico Automático de Unidades Geradoras de Energia Elétrica Utilizando Lógica Nebulosa. 2014. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

Este trabalho apresenta uma metodologia de pré-análise de oscilografias de unidades geradoras de energia elétrica baseada em lógica nebulosa. A partir dos registros oscilográficos são extraídas informações de tensão e corrente. Essas informações são as entradas de um sistema de inferência *fuzzy*. O sistema *fuzzy* é responsável por relacionar os dados de entrada com um conjunto de regras pré-determinadas que são baseadas no conhecimento humano. Por fim, os dados de saída da máquina de inferência são defuzzificados e analisados de maneira analítica. Esse sistema permite que registros de oscilografia de unidades de geração sejam pré-classificados ajudando os engenheiros de modo a focar a atenção nos casos mais importantes. Estudos mostram que em empresas concessionárias de geração, aproximadamente 95% dos registros de oscilografia podem ser arquivados, pois são decorrentes de situações corriqueiras. Os resultados obtidos comprovam a eficácia e generalização do método proposto.

Palavras-chave: Perturbações, Oscilografias, Lógica *Fuzzy*, Diagnóstico, Registradores Digitais de Perturbação, Faltas, Geração.

ABSTRACT

CIESLAK, Dionatan Augusto Guimarães. Automatic Diagnosis of Generating Units Based on Fuzzy Logic. 2014. 64 f. Course Final Project (Graduation on Electrical Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

This paper presents a methodology based on fuzzy logic that classifies relevant events from generating units. From the waveform records, are extracted values of current and voltage and these values are the inputs of fuzzy inference system. This fuzzy inference system is responsible for relating the inputs to a set of rules based on human knowledge. The outputs of the inference machine are defuzzified and analyzed analytically. This fuzzy system allows that the waveform records are classified, helping the engineers and enabling an optimization of work. The results indicate the effectiveness of this paper.

Keywords: Disturbance, Waveform Records, Fuzzy Logic, Diagnosis, Digital Fault Recorders, Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo entre a Lógica Clássica e a Lógica Fuzzy.	19
Figura 2 - Funções de Pertinência A e B.....	23
Figura 3 - Intersecção entre A e B.....	24
Figura 4 - União entre A e B.....	24
Figura 5 - Complemento de A.....	25
Figura 6 - Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	26
Figura 7 - Modelos de Funções de Pertinência.....	27
Figura 8 - Método do Centro de Gravidade.....	29
Figura 9 - Método do Centro de Gravidade.....	30
Figura 10 - Método do Centro de Gravidade.....	31
Figura 11 - Método do Centro de Gravidade.....	32
Figura 12 - Método do Centro de Gravidade.....	33
Figura 13 - Sistema Fuzzy Proposto.....	35
Figura 14 - Função de Pertinência Trapezoidal.....	36
Figura 15 - Exemplo de Segmentação de Registro Oscilográfico.....	37
Figura 16 - Funções de Pertinência para as Tensões.....	39
Figura 17 - Funções de Pertinência para as Correntes.....	40
Figura 18 - Funções de Pertinência para os Estados Operacionais do Gerador.....	41
Figura 19 - Registro Oscilográfico de uma Energização no Gerador.....	47
Figura 20 - Registro Oscilográfico de uma Desenergização no Gerador.....	49
Figura 21 - Registro Oscilográfico (Operação Normal).....	55
Figura 22 - Registro Oscilográfico (Desenergização).....	56
Figura 23 - Registro Oscilográfico (Corte de Carga).....	57
Figura 24 - Registro Oscilográfico (Desenergização).....	58
Figura 25 - Registro Oscilográfico (Várias Saídas).....	59
Figura 26 - Registro Oscilográfico (Várias Saídas).....	60
Figura 27 - Registro Oscilográfico (Várias Saídas).....	61
Figura 28 - Registro Oscilográfico (Energização).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Isomorfismo entre Lógica Clássica, <i>Booleana</i> e n-valente.	21
Tabela 2 - Resultados para a Lógica de Zadeh Trivalente.	22
Tabela 3 - Limites das Funções de Pertinência das Entradas do Sistema <i>Fuzzy</i>	38
Tabela 4 - Limites das Funções de Pertinência da Saída do Sistema <i>Fuzzy</i>	38
Tabela 5 - Extração de Resultados da Oscilografia.	47
Tabela 6 - Saída do Sistema <i>Fuzzy</i>	48
Tabela 7 - Extração de Resultados da Oscilografia.	49
Tabela 8 - Saída do Sistema <i>Fuzzy</i>	50
Tabela 9 - Comparação entre Sistemas de Diagnóstico.	51
Tabela 10 - Comparação entre Sistemas de Diagnóstico Referentes a um Mês Inteiro de Eventos. ...	52
Tabela 11 - Interpretação das Saídas <i>Fuzzy</i> para Registros Oscilográficos com Erros de Medição.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Regras do Sistema <i>Fuzzy</i>	43
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CGOI	Grupo Coordenador para Operação Interligada.
EC	Módulo de Extração de Características.
MAS	<i>Multi-Agent System</i> (Sistema Multi-Agentes).
RDP	Registradores Digitais de Perturbação.
SDSE	Sistema de Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
SIF	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> .

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Revisão Bibliográfica	14
3. Revisão Teórica.....	17
3.1 Lógica <i>Fuzzy</i>	17
3.2 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	18
3.3 Operações entre Conjuntos <i>Fuzzy</i>	20
3.3.1 Intersecção entre Conjuntos <i>Fuzzy</i>	23
3.3.2 União entre Conjuntos <i>Fuzzy</i>	24
3.3.3 Complemento de um Conjunto <i>Fuzzy</i>	25
3.4 Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i>	25
3.4.1 Módulo de Fuzzificação.....	26
3.4.2 Módulo de Inferência.....	27
3.4.3 Módulo de Defuzzificação	28
4. Metodologia Proposta	35
4.1 Sistema <i>Fuzzy</i> Proposto.....	35
4.2 Fuzzificação	35
4.3 Regras de Inferência.....	43
4.4 Defuzzificação	44
4.5 Implementação	44
5. Resultados e Discussões.....	46
5.1 Estudo de Caso: Energização	46
5.2 Estudo de Caso: Desenergização	48
5.3 Estudo Geral Comparativo.....	51
6. Conclusões	64
7. Referências.....	66

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Perez (2010), um sistema elétrico de potência (SEP) é uma estrutura composta por centenas de milhares de componentes elétricos e por ser tão grande, muitas vezes cobre áreas gigantescas, podendo até pertencer a diferentes países. Essa obra gigantesca deve ser devidamente sincronizada, operada e coordenada. A complexidade de um SEP se justifica quando se analisa a importância do mesmo, ou seja, a de garantir o acesso à energia elétrica a todo país. Atualmente a preocupação com a integridade do sistema elétrico é tão relevante que se faz uso dos mais diversos tipos de tecnologias para garantir um ótimo monitoramento do sistema.

Um desses sistemas de monitoramento é baseado nos registros oscilográficos de grandezas (tensões, correntes e potências). Esses registros oscilográficos (oscilografias) consistem na representação da forma de onda das grandezas, mostrando assim seus comportamentos num intervalo temporal. O monitoramento ocorre tanto na geração, quanto na transmissão e distribuição. O equipamento responsável por esse registro é chamado de registrador digital de perturbações (RDP). Os RDPs são responsáveis pela gravação da forma de onda das grandezas continuamente, portanto, na ocorrência de um evento nocivo ao sistema (faltas, etc.) o RDP registrará o comportamento das grandezas frente ao distúrbio.

Após um distúrbio, os RDPs são verificados e seus dados são extraídos para análise. Essa tarefa cabe a um engenheiro analista, responsável por analisar esses registros e assim ter conhecimento de o que desencadeou o evento. Esse procedimento é importante, essencialmente, para a elaboração de relatórios de ocorrências. Para os atuais sistemas de potência, a quantidade de dados oscilográficos é muito grande, tornando laboriosa a tarefa do engenheiro analista (MORETO; ROLIM, 2010).

Frente a esse fato, vários estudos vêm sendo feitos visando automatizar o processo de análise. A maioria desses estudos se baseia na elaboração de sistemas de pré-análise, ou seja, algoritmos que, baseados em alguma estrutura pré-determinada (regras, por exemplo), desempenham um papel de primeira análise do evento, auxiliando assim o trabalho do engenheiro analista. A real relevância desses

algoritmos é vivenciada, por exemplo, em ocorrências simples aos SEPs. Em um evento simples, o algoritmo interpreta os dados dos RDPs e gera uma saída, expressando a causa da ocorrência (muitas vezes essa saída já é suficiente para a análise final do engenheiro analista). Já para situações nocivas ao sistema (um curto circuito, por exemplo) o algoritmo interpreta os dados e gera uma informação que tem como objetivo alertar e ser seletiva ao engenheiro analista, permitindo assim que o engenheiro desempenhe sua função baseado na prioridade do evento.

Várias dessas metodologias de estudo são dadas por sistemas especialistas (baseados em regras). Esse projeto se propõe a desenvolver um sistema de análise baseado em lógica nebulosa (*fuzzy*), voltado a unidades geradoras de energia elétrica. Basicamente, a grande diferença entre um sistema especialista baseado em regras e um sistema baseado em lógica *fuzzy* é o dinamismo do mesmo. Por exemplo, as regras de um sistema especialista são na maioria das vezes estruturas booleanas (lógica: verdadeiro ou falso). Já os sistemas *fuzzy* possuem uma flexibilidade maior do que sistemas booleanos. Esse fato é resultante da utilização da semântica (palavras e funções de pertinência) ao invés de números, como regra.

Devida essa diferença notória entre sistemas baseados em lógica *fuzzy* e sistemas baseados em lógica clássica (verdadeiro ou falso), a utilização de sistemas *fuzzy* apresenta maior relevância, uma vez que, segundo Moreto e Rolim (2010), um aspecto de difícil quantificação é o da determinação dos limiares que fundamentam as regras dos sistemas especialistas para esse tipo de análise, uma vez que esses valores são oriundos da experiência e do conhecimento dos engenheiros analistas. Por isso, a lógica *fuzzy* e sua estruturação baseada na semântica se torna mais eficaz para esse tipo de aplicação.

Sendo assim, esse trabalho baseia-se no desenvolvimento de um algoritmo para análise automática de registros oscilográficos em unidades de geração considerando incertezas através da utilização da lógica nebulosa (*fuzzy*). Para isso, alguns aspectos específicos devem ser atingidos:

- i. Definir as funções de pertinência do sistema *fuzzy* adequadas às grandezas extraídas dos sinais medidos pelos registradores de perturbação;

- ii. Obter um conjunto de regras *fuzzy* que visam modelar o conhecimento para tomada de decisões;
- iii. Avaliar os resultados obtidos com base em dados de registros reais de oscilografia e simulações;
- iv. Validar o sistema *fuzzy* com base em sistemas de análise automática já existentes.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: O tópico dois traz uma breve contextualização de métodos existentes de análise de distúrbios. Na sequência, o tópico três apresenta os conceitos teóricos utilizados nesse trabalho. A metodologia proposta por esse trabalho é apresentada no tópico quatro. No quinto tópico são discutidos os resultados obtidos e, por fim, as conclusões do trabalho estão no tópico seis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados conceitos relevantes para a compreensão dos métodos de análise de distúrbios, bem como sistemas de análise já existentes. Nesse contexto, são abordadas publicações referentes a métodos de diagnósticos e análise bem como um enfoque principal a um sistema já existente utilizado como base para o desenvolvimento desse trabalho.

O primeiro conceito relevante para a compreensão do desenvolvimento deste trabalho é o entendimento de o que são e para o que servem os registros oscilográficos. Basicamente, para um sistema elétrico de potência, uma oscilografia é uma 'fotografia' da situação do sistema em um determinado espaço temporal, ou seja, é a representação, de grandezas elétricas (tensão, corrente, etc.). Pode-se fazer uma analogia da oscilografia com os registros das "caixas pretas" utilizadas em aviões.

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.

Alguns anos antes, na década de 50, surgiram as primeiras oscilografias de falhas em sistemas elétricos, essas mesmas, eram adquiridas por meio de equipamentos eletromecânicos a tinta (análogo 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, muito relacionado à explosão tecnológica em relação a *hardwares* e *softwares* (TCHEOU, 2005). Evidentemente, a importância dos registros oscilográficos é caracterizada pelo fato de que os mesmos mostram o comportamento do sistema elétrico tanto em operação normal, quanto na ocorrência de um distúrbio nocivo ao sistema elétrico.

No que diz respeito à importância e a utilização dos registradores digitais de perturbação Yue, Liao e Huang (2010) afirmam que os RDPs registram os sinais senoidais das grandezas elétricas (tensão, corrente, etc.), bem como possibilitam

também a gravação dos sinais gerados pelos dispositivos de proteção, por exemplo, o sinal de disparo de um disjuntor devido à atuação de um relé de proteção, ou a própria abertura de um disjuntor.

Outro tópico de grande importância é a utilização dos registros oscilográficos para a detecção de faltas em sistemas elétricos de potência. Inúmeros estudos se desenvolveram e vem sendo desenvolvidos no que diz respeito aos métodos de detecção de faltas, seja na geração e na transmissão (incluindo sub-transmissão e subestações). Por exemplo, Costa e Souza (2010) desenvolveram um método de detecção de falta via análise da energia janelada dos coeficientes *Wavelet* das tensões e das correntes, além de detectar faltas evolutivas e de múltiplos distúrbios transitórios (uma falta seguida de um religamento automático, por exemplo), o método é também capaz de distinguir alguns eventos relacionados à qualidade da energia elétrica.

Em relação à qualidade da energia elétrica, vale ressaltar que devido as atuais tecnologias empregadas na construção dos RDPs, os mesmos permitem além de registros oscilográficos, os registros de diversas outras informações, como a atuação dos dispositivos de proteção e principalmente em relação à qualidade da energia, variações nos sinais e índices para classificação desse tipo de distúrbio.

No trabalho de Costa et al (2011), os autores desenvolvem um *software*, chamado Sistema de Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência – SDSE, que é baseado nos conceitos da Transformada *Wavelet*. O sistema além de detectar, classificar e localizar a falta faz uma minuciosa análise em relação à qualidade de energia dos sistemas elétricos (afundamentos de tensão, energização de bancos de capacitores – e seus efeitos no sistema, etc.). Mostrando assim a flexibilidade de análise que os registros oscilográficos, e por consequência os registradores digitais de perturbação, permitem.

Uma metodologia baseada em Sistemas Multi-agentes (do inglês *Multi-agent-system* – MAS) é proposta por Kabilan e Manohar (2013). Segundo os autores, a aplicabilidade dos sistemas multi-agentes é extremamente abrangente, por exemplo, no sistema proposto, o MAS é capaz de monitorar, diagnosticar, restaurar o sistema de energia elétrica e também efetuar o controle de rede e automação. Devido suas características estruturais, o MAS desempenha um papel dinâmico no sistema, permitindo assim, sua vasta aplicação. Um sistema multi-agente é composto por vários agentes autômatos, cada um desses agentes possui

um conjunto de capacidades comportamentais que definem assim suas competências e seus objetivos. O sistema mostrou um eficaz desempenho principalmente no monitoramento e diagnóstico, sendo assim uma ótima ferramenta para sistemas complexos onde se faz necessário o controle e supervisão de comportamentos dinâmicos.

A motivação desse trabalho é dada fundamentalmente no trabalho elaborado por Moreto (2011). O autor propõe um sistema especialista para análise de oscilografias primordialmente voltada para sistemas de geração. Esse sistema especialista é basicamente dividido em dois módulos principais: o módulo de extração de características e o módulo de tomada de decisões. O sistema demonstrou ser eficiente para análises oscilográficas e classificação de distúrbios, tornando-se assim uma ferramenta útil para uso dos engenheiros especialistas.

Levando em conta uma visão geral em relação aos problemas referentes à faltas e distúrbios nos sistemas elétricos de potência (supervisão, monitoramento, detecção e classificação de faltas) Cardoso, Rolim e Helmut (2004) fazem um *review* dos diversos métodos de diagnóstico de faltas nos SEPs. Dando uma breve conceituação em relação aos modos de aquisição de dados e também da importância de um diagnóstico de faltas confiável. Também tratam de maneira abrangente as metodologias para resolução dos problemas referentes à análise de dados, por exemplo, utilização dos sistemas especialistas (bem como suas vantagens e desvantagens em relação aos demais métodos), das redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, redes de Petri e finalmente, a utilização (e características) da lógica difusa (lógica *fuzzy*).

Além do mais, a utilização da lógica *fuzzy* em sistemas inteligentes, se faz cada vez mais presente, devido principalmente à sua versatilidade de lidar com informações. Os aspectos relevantes em relação à lógica *fuzzy* serão abordados no tópico três.

3. REVISÃO TEÓRICA

Nesta seção será abordado o estado da arte acerca da lógica *fuzzy*. Sua fundamentação matemática e lógica.

3.1 Lógica *Fuzzy*

Para Campos (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 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. Conseqüentemente, a observação, a aquisição e a representação dos conhecimentos irão conduzir inevitavelmente a uma perda de informações em relação ao sistema real.

Tais aspectos culminaram no início do século XX com o desenvolvimento de uma nova maneira de se tratar informações, aceitando de maneira consciente as incertezas e aprendendo a trabalhar com as mesmas. Essa nova filosofia, no ponto de vista funcional, é conhecida como lógica *fuzzy*.

Formalmente fundamentada em 1965 por Lofti Zadeh, a lógica *fuzzy* (muitas vezes traduzida como nebulosa, difusa) tem como principal premissa a de lidar com informações imprecisas. A principal mudança no tratamento de informações na lógica *fuzzy*, em relação à lógica Aristotélica (verdadeiro ou falso – não podendo assumir dualidade) é a de tratar os dados de maneira semântica, ou seja, substituindo números por palavras, 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).

3.2 Conjuntos *Fuzzy*

Como dito no item 3.1, a lógica *fuzzy* é fundamentada principalmente nos conceitos de conjuntos *fuzzy*. Para explicar o que são os conjuntos *fuzzy*, se faz relevante uma comparação entre a lógica clássica e lógica *fuzzy*.

Do ponto de vista da lógica clássica, um método para se escrever um dado conjunto é mostrado a seguir:

*“Um conjunto é definido por uma função, geralmente chamada de **função característica**, que declara quais elementos de um universo X pertencem ou não ao conjunto.”*

Dado um conjunto A , a função característica χ_A que o define é:

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

Ou seja, a função característica χ_A mapeia no universo X elementos para o conjunto $[0,1]$, assim:

$$\chi_A : X \rightarrow [0,1]$$

Para cada $x \in X$, quando $\chi_A(x) = 1$, x é dito membro do conjunto A . Em contrapartida, quando $\chi_A(x) = 0$, x é dito não membro do conjunto A (KLIR; YUAN, 1995).

Fica evidente que, a pertinência dentro da lógica clássica é totalmente binária, ou seja, ou o elemento pertence a um conjunto ou não pertence.

Já na lógica *fuzzy* há uma quebra de paradigmas, como dito anteriormente, a lógica *fuzzy* lida muito bem com a dualidade. De forma sintética, pode-se dizer que, do ponto de vista da lógica *fuzzy*:

“Um elemento x **pertence muito pouco** ao conjunto A ” ou “Um elemento x **pertence totalmente** ao conjunto A ” ou ainda “Um elemento x **não pertence** ao conjunto A ”.

Evidenciando assim um conceito fundamental da lógica *fuzzy*, que diz que dentro de um intervalo definido (por exemplo, $[0,1]$), existem infinitos elementos (ZADEH, 1965).

De forma análoga, um conjunto *fuzzy* é definido por uma função de pertinência (μ).

Desta forma, dado um conjunto A , $\mu_A(x)$ é a função de pertinência que determina com que grau x pertence ao conjunto A :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \therefore x \text{ **pertence totalmente** ao conjunto } A \\ 0 & \therefore x \text{ **não pertence** ao conjunto } A \\ 0 < \mu_A(x) < 1 & \therefore x \text{ **pertence parcialmente** ao conjunto } A \end{cases}$$

Levando em conta esses aspectos, deve-se ressaltar que a álgebra entre conjuntos *fuzzy* é diferente da álgebra dos conjuntos clássicos.

Zadeh (1965) demonstra que para os conjuntos *fuzzy* as operações de união e intersecção de um conjunto com seu complementar não resultam em 1 e \emptyset (conjunto vazio), respectivamente. Fatos esses que levam à determinação de operações entre conjuntos específicos para os conjuntos *fuzzy*.

A Figura 1 apresenta, de forma simplificada, a diferença entre a lógica clássica e a lógica *fuzzy*.

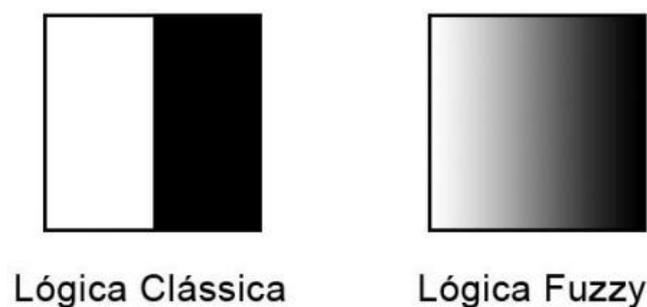


Figura 1 - Comparativo entre a Lógica Clássica e a Lógica Fuzzy.
 FONTE: (KOHAGURA, 2007, p. 6).

3.3 Operações entre Conjuntos *Fuzzy*

O entendimento das operações em conjuntos *fuzzy* se faz necessária para compreender a operacionalidade, como um todo, da lógica *fuzzy*.

Como dito anteriormente, antes de Zadeh, alguns pensadores já buscavam uma compreensão do universo através de uma lógica multinível.

Na verdade, através de uma análise cronológica, é possível notar que os conceitos de lógica multinível foram sendo expandidos, sempre partindo da lógica clássica.

Por exemplo, a lógica *booleana* é um exemplo claro de lógica bivalente (fundamentada fortemente através da lógica Aristotélica), ou seja, a lógica *booleana* é formalmente tratada como lógica clássica. Para a lógica clássica, o resultado é sempre **ou** verdadeiro **ou** falso.

Entretanto, como o passar do tempo, muitos pensadores sentiram a necessidade de expandir essa bivalência da 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**.

Motivado por essa evolução no tratamento de informações, nos anos de 1930, Lukasiewicz iniciou os trabalhos abordando uma lógica n-valente (permitindo $n = \infty$).

Para muitos, a lógica *fuzzy* é um gênero da lógica n-valente (muitas vezes conhecida como lógica Zadeh- Lukasiewicz com $n = \infty$).

Para atingir a compreensão da teoria de conjuntos formulada por Zadeh, inicialmente é relevante revisar alguns itens da lógica clássica, *booleana* e da lógica n-valente (neste caso, com $n = 2$). A Tabela abaixo mostra a analogia isomórfica entre as lógicas citadas.

Tabela 1 - Isomorfismo entre Lógica Clássica, *Booleana* e n-valente.
 FONTE: (CHEN; PHAM, 2001, p. 64)

Lógica Clássica	Lógica <i>Booleana</i>	Lógica n-valente ($n = 2$)
\cup	$+$	\vee
\cap	\cdot	\wedge
$-$	$-$	$-$
1	1	1
\emptyset	0	0
\subset	$<$	\Rightarrow
$=$	$=$	\Leftrightarrow

Para desenvolver a teoria acerca das operações com conjuntos *fuzzy*, Zadeh utilizou os conceitos de lógica n-valente com $2 \leq n \leq \infty$ 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, definindo as seguintes operações lógicas primárias:

$$\bar{a} = 1 - a \quad (1)$$

$$a \wedge b = \min \{a, b\} \quad (2)$$

$$a \vee b = \max \{a, b\} \quad (3)$$

$$a \Rightarrow b = \min \{1, 1 + b - a\} \quad (4)$$

$$a \Leftrightarrow b = 1 - |a - b| \quad (5)$$

Exemplificando a utilização das Equações 1 a 5, a Tabela 2 mostra os resultados lógicos para valores de a e b quando $n = 3$.

Tabela 2 - Resultados para a Lógica de Zadeh Trivalente.
FONTE: (CHEN; PHAM, 2001, p. 65)

a	b	\wedge	\vee	\Rightarrow	\Leftrightarrow
0	0	0	0	1	1
0	$1/2$	0	$1/2$	1	$1/2$
0	1	0	1	1	0
$1/2$	0	0	$1/2$	$1/2$	$1/2$
$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	1
$1/2$	1	$1/2$	1	1	$1/2$
1	0	0	1	0	0
1	$1/2$	$1/2$	1	$1/2$	$1/2$
1	1	1	1	1	1

Porém, assumem-se três operações que são consideradas as operações básicas dos conjuntos *fuzzy*, são elas:

- i. Intersecção: $A \cap B = \min \{\mu_A, \mu_B\}$
- ii. União: $A \cup B = \max \{\mu_A, \mu_B\}$
- iii. Complemento (ou Negação): $\bar{A} = 1 - \mu_A$

Para exemplificar as três operações citadas acima, inicialmente, devemos considerar as seguintes funções de pertinência:

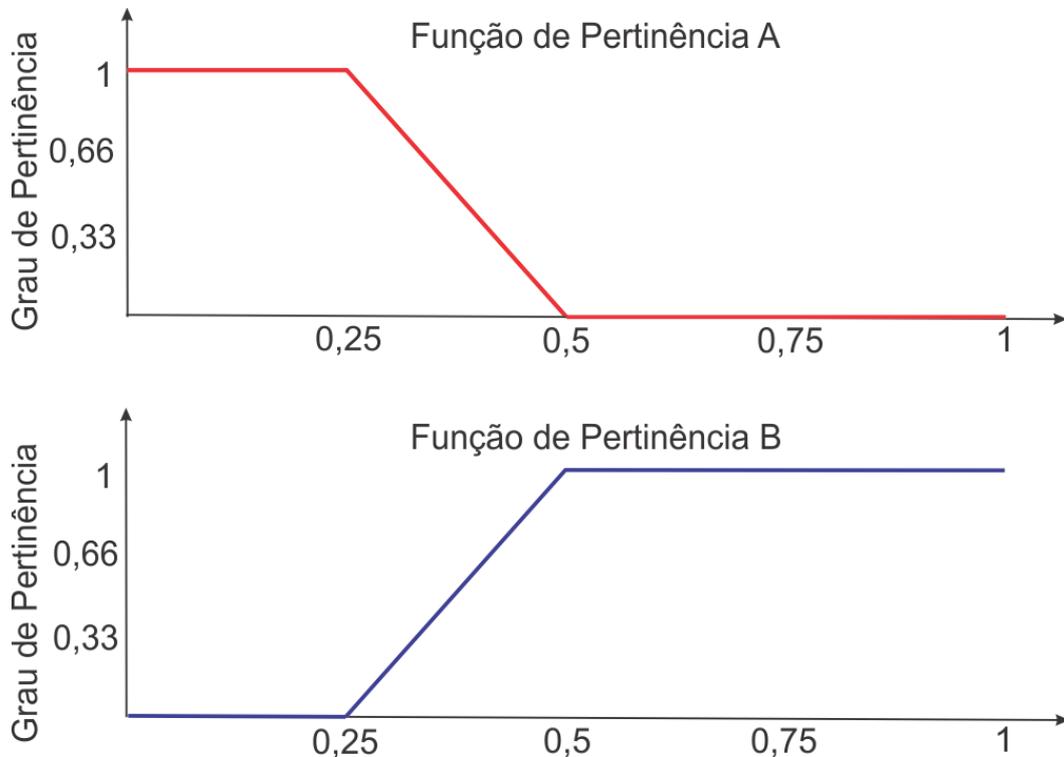


Figura 2 - Funções de Pertinência A e B.
 FONTE: Autoria Própria.

Na Figura 2 são mostradas duas funções de pertinência: A e B. Sendo daqui em diante denotadas como μ_A e μ_B .

3.3.1 Intersecção entre Conjuntos Fuzzy

Primeiramente considera-se a operação da **Intersecção** entre conjuntos fuzzy. A intersecção entre dois conjuntos (ou funções de pertinência) fuzzy A e B, dentro de um universo S é definida como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min \{ \mu_A, \mu_B \}, \forall x \in S$$

Para sistemas de inferência fuzzy (que serão abordados no item 3.4), a operação de intersecção entre conjuntos é conhecida como operador lógico **AND**.

A Figura 3 mostra a intersecção entre as funções de pertinência A e B.

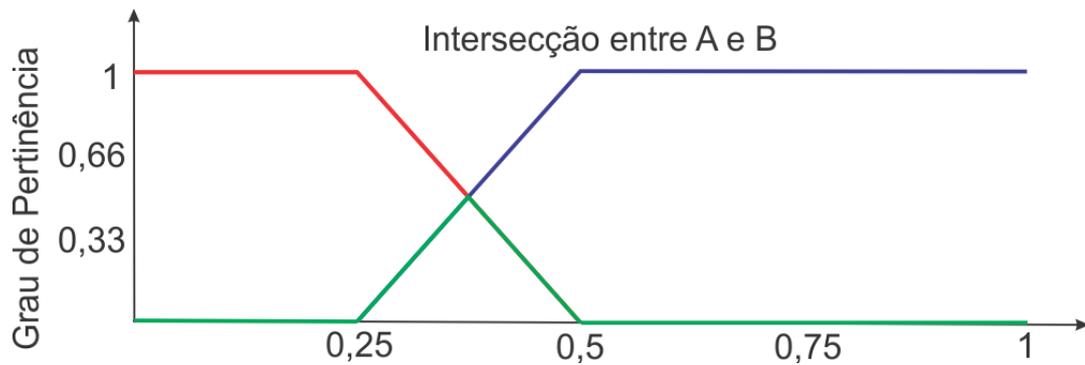


Figura 3 - Intersecção entre A e B.
FONTE: Autoria Própria.

Da Figura 3 nota-se que a intersecção das funções A e B (ou o mínimo valor entre A e B) aparece em verde.

3.3.2 União entre Conjuntos *Fuzzy*

Já a **União** entre conjuntos *fuzzy* é definida como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max \{ \mu_A, \mu_B \}, \forall x \in S$$

Em sistemas de inferência *fuzzy* a operação da união é conhecida como operador lógico **OR**.

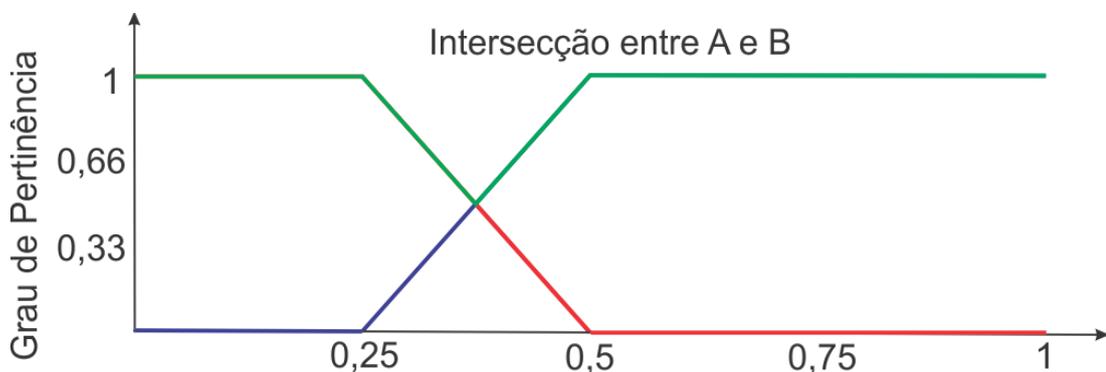


Figura 4 - União entre A e B.
FONTE: Autoria Própria.

Em verde, nota-se a função resultante da união entre as funções A e B.

3.3.3 Complemento de um Conjunto *Fuzzy*

Por fim, a operação de **Complemento** ou **Negação** é definida como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in S$$

Em sistemas de inferência, essa operação é conhecida como operador lógico **NOT**.

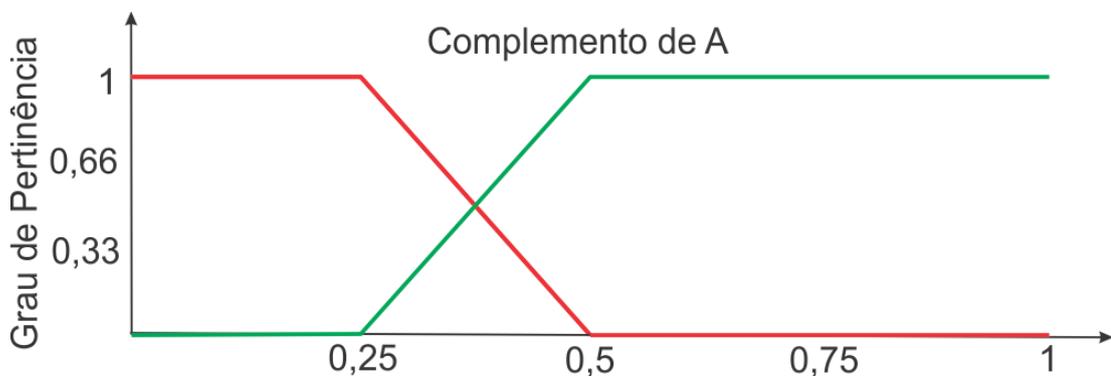


Figura 5 - Complemento de A.
FONTE: Autoria Própria.

O complemento da função A é a função em verde descrita na Figura 5.

3.4 Sistemas de Inferência *Fuzzy*

Segundo Sousa (2011), um Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF) é um mecanismo capaz de gerar saídas precisas a partir de um conjunto de regras e valores precisos de entrada.

A Figura 6 mostra de forma genérica o funcionamento de um sistema de inferência *fuzzy*.

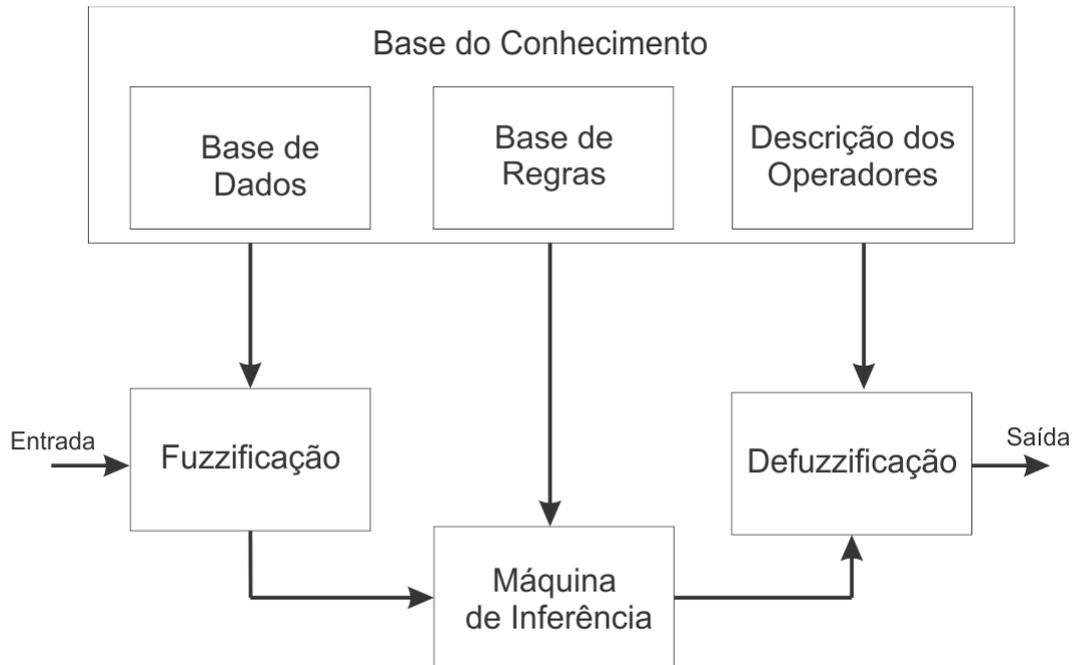


Figura 6 - Sistema de Inferência Fuzzy.
FONTE: (SOUSA, 2011, p. 32)

Basicamente, um SIF, é caracterizado fundamentalmente por receber entradas não-*fuzzy* e tratá-las dentro das premissas dos conjuntos *fuzzy*.

A seguir, serão apresentados os módulos que formam um SIF, são eles: Módulo de Fuzzificação, Módulo de Inferência e Módulo de Defuzzificação.

3.4.1 Módulo de Fuzzificação

A primeira etapa do sistema é a etapa de fuzzificação, que é a modelagem matemática das informações contidas nas entradas numéricas por meio de conjuntos *fuzzy*. Esse módulo tem extrema importância, pois, cada variável numérica de entrada passa a receber um valor linguístico, e a cada um desses valores é associado um conjunto *fuzzy* por meio de uma função de pertinência. Existem diversas formas de se modelar essas informações, sendo que as mais comuns se baseiam no conceito de figuras geométricas (funções triangulares, trapezoidais), entretanto, também há a possibilidade de se modelar essas informações de outras maneiras (funções gaussianas, funções poligonais, funções Z, funções π , entre outras).

A Figura abaixo apresenta alguns modelos típicos de funções de pertinência utilizados em aplicações *fuzzy*.

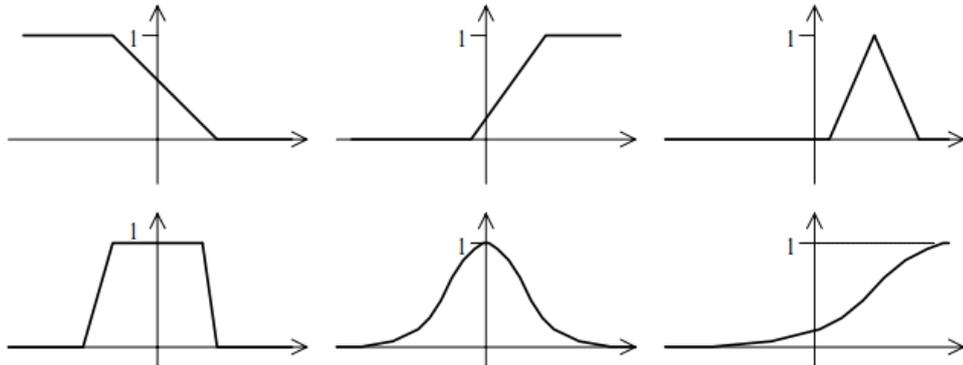


Figura 7 - Modelos de Funções de Pertinência.
FONTE: (CHEN; PHAM, 2001, p. 9)

Nesse estágio também ocorre à ativação das regras do sistema, regras essas que são responsáveis pela classificação das variáveis linguísticas (BITTENCOURT, 2011).

3.4.2 Módulo de Inferência

Tendo as variáveis de entrada fuzzificadas, se faz necessária uma modelagem de regras e aplicação de métodos de inferência sob essas variáveis. Na etapa da inferência é feito um mapeamento dos conjuntos *fuzzy* relacionando-os com as variáveis fuzzificadas por meio de regras do tipo SE-ENTÃO (KOHAGURA, 2007).

Por exemplo, considerando um conjunto *fuzzy* qualquer onde estão sendo avaliadas características físicas de um grupo de pessoas e **Obeso (a)** é uma variável de entrada e **Emagrecer** é uma variável saída, uma possível resposta desse sistema *fuzzy* poderia ser:

“SE Fulano de Tal é **Obeso**, ENTÃO ele precisa **Emagrecer**.”

Ou seja, a regra do SE-ENTÃO pode ser compreendida da seguinte maneira:

< **SE** antecedente **ENTÃO** consequente >

Onde o termo **antecedente** é composto por um conjunto de condições e o termo **consequente** é composto por um grupo de ações ou diagnósticos.

3.4.3 Módulo de Defuzzificação

Para Chen e Pham (2001), o processo de defuzzificação é basicamente o inverso do processo de fuzzificação. Ele converte todos os termos *fuzzy* criados pela máquina de inferência em valores numéricos, sendo esses valores numéricos as saídas do sistema *fuzzy* para o mundo físico.

Assim como existem diversos métodos de fuzzificação, também existem diversas maneiras de se defuzzificar uma informação *fuzzy*. Alguns delas são:

- Método do Centro de Gravidade (Centróide);
- Método do Bissetor;
- Método da Média dos Máximos;
- Método do Maior dos Máximos;
- Método do Menor dos Máximos.

Entretanto, o método mais utilizado em aplicações convencionais, é o Método do Centro de Gravidade (muitas vezes chamado de Método de Mamdani).

O Método do Centro de Gravidade consiste basicamente em calcular o centro de massa da figura resultante ao processo de inferência utilizando as operações de máximo e de mínimo entre funções de pertinência (operadores AND e OR).

Na sequência, será explicado de forma detalhada o processo de defuzzificação utilizando o Método do Centro de Gravidade.

Inicialmente (Figura 8), ocorre a análise dos termos antecedentes. Existem duas funções de pertinência em análise, uma para a qualidade do serviço e outra para a qualidade da comida (essas são as entradas do sistema *fuzzy*).

Nota-se que tanto a Entrada 1, quanto a Entrada 2 possuem um valor numérico. Portanto, cada um desses valores é relacionado com um respectivo grau de pertinência dentro da função em que cada um está relacionado. Por exemplo, a

Entrada 1 (que corresponde à qualidade do serviço) tem um valor 3, que corresponde na função de pertinência 'Serviço Excelente' à uma pertinência 0. Ou seja, quando o serviço recebe qualificação 3, ele não é considerado excelente.

Na Entrada 2, o valor de entrada é 8. Esse valor reflete na função de pertinência 'Comida Deliciosa' com um grau de pertinência 0,7.

A operação utilizada entre as funções de pertinência é a operação da união ou do máximo valor entre funções de pertinência (operador OR):

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max \{ \mu_A, \mu_B \} = \max \{ 0, 0, 0,7 \} = 0,7$$

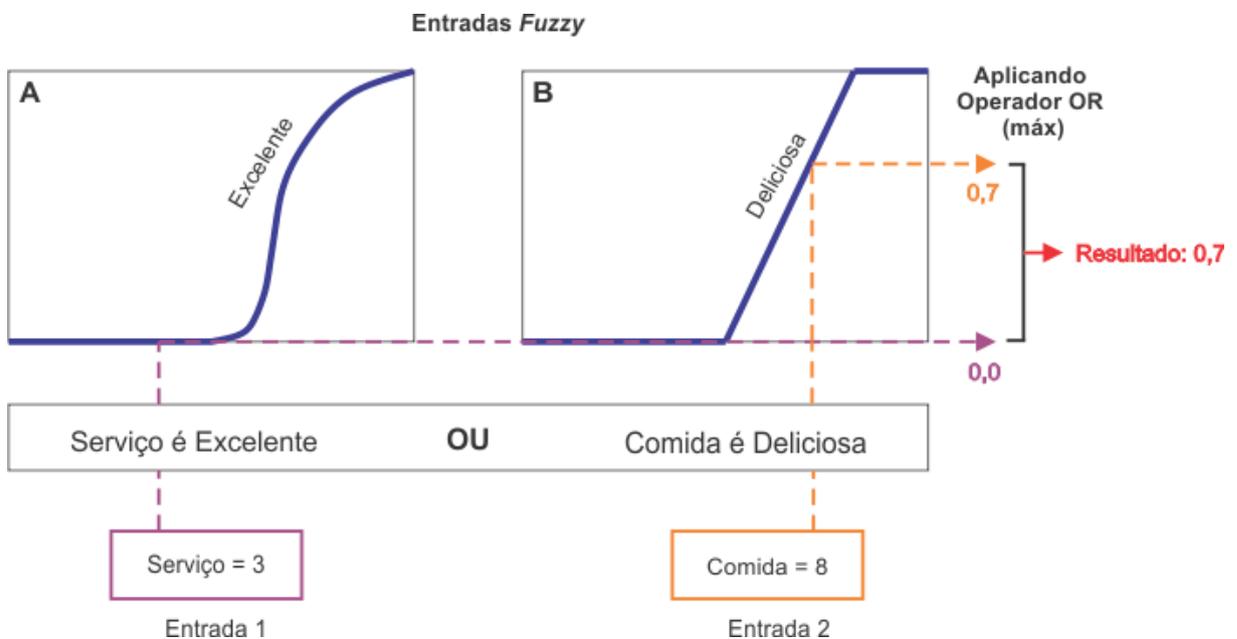


Figura 8 - Método do Centro de Gravidade.

Disponível em: http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/fuzzyinf/main_en.htm

Aplicado o método de junção entre as variáveis de entrada, é necessário relacionar o valor resultante da entrada com uma saída. Ou seja, falta a análise do termo consequente.

A Figura 9 apresenta como o resultado dos termos antecedentes se relaciona com a informação do termo consequente.

Nota-se que a saída do sistema *fuzzy* é referente à quantidade da gorjeta (que depende invariavelmente da qualidade do serviço **OU** da qualidade da comida).

O operador de implicação utilizado é o operador de mínimo.

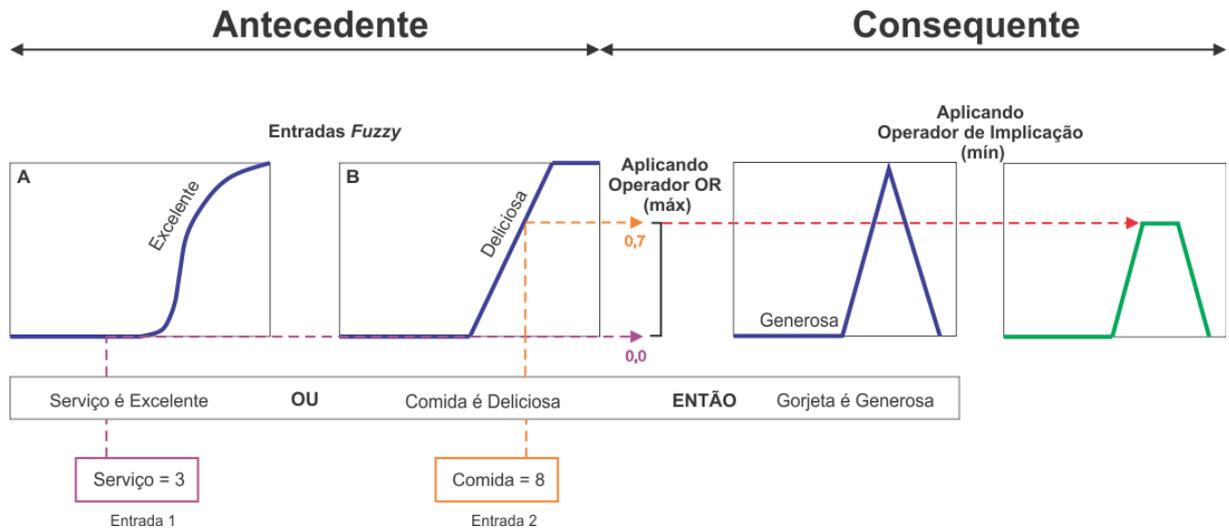


Figura 9 - Método do Centro de Gravidade.

Disponível em: http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/fuzzyinf/main_en.htm

A Figura 10 apresenta o mesmo processo citado acima para mais duas regras possíveis do sistema. Nota-se que na segunda regra a saída não depende da condição da comida, ou seja, o simples fato do serviço ser considerado bom, já implica em uma gorjeta mediana.

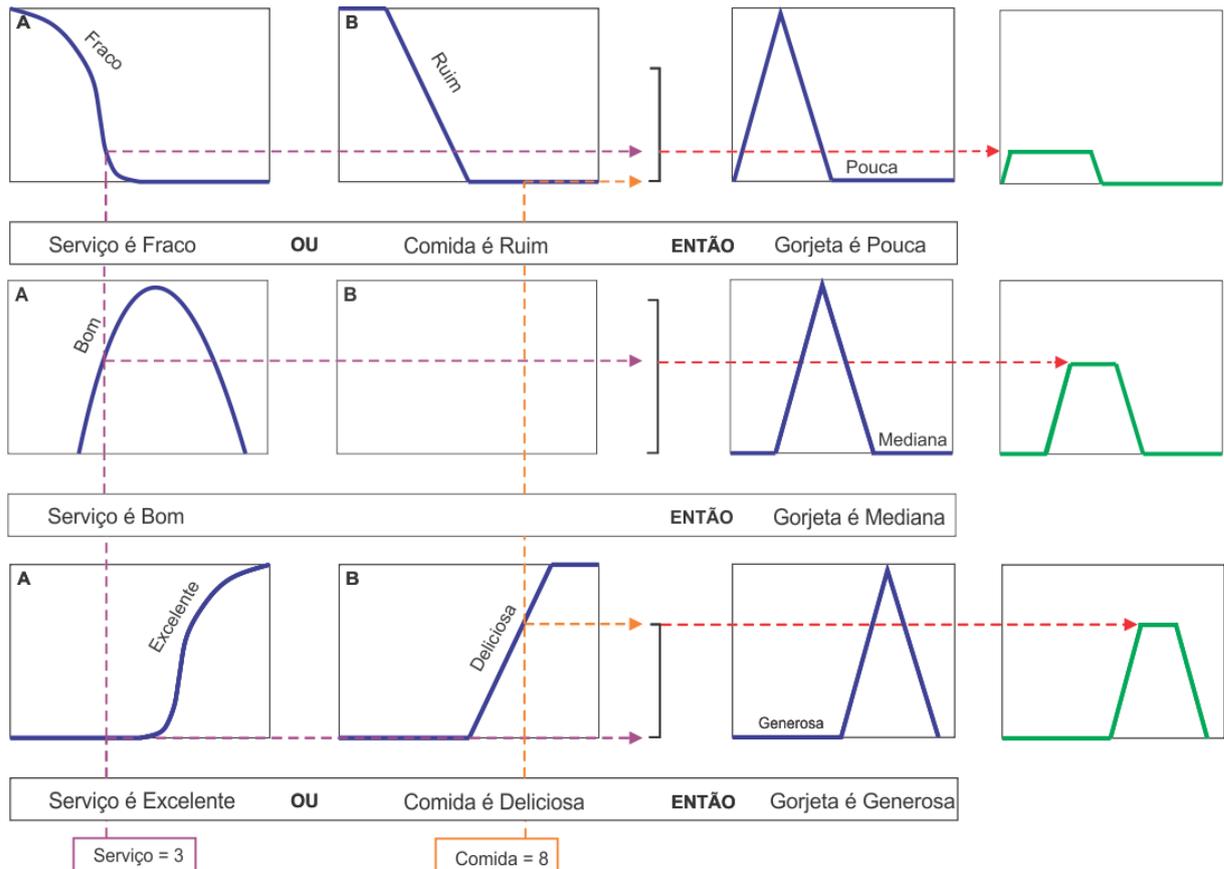


Figura 10 - Método do Centro de Gravidade.

Disponível em: http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/fuzzyinf/main_en.html

Nota-se, na Figura 10 que cada implicação de termos antecedentes com termos consequentes gera uma saída distinta. Entretanto, falta a etapa de junção de todas as possíveis saídas para ser possível gerar uma saída geral do sistema *fuzzy*.

Para isso, utiliza-se um processo de agregação de saídas. Neste exemplo, é utilizado o operador de máximo, entretanto, existem outros meios possíveis (operador de soma, operador de soma probabilística, etc.).

O resultado da agregação é mostrado na Figura 11.

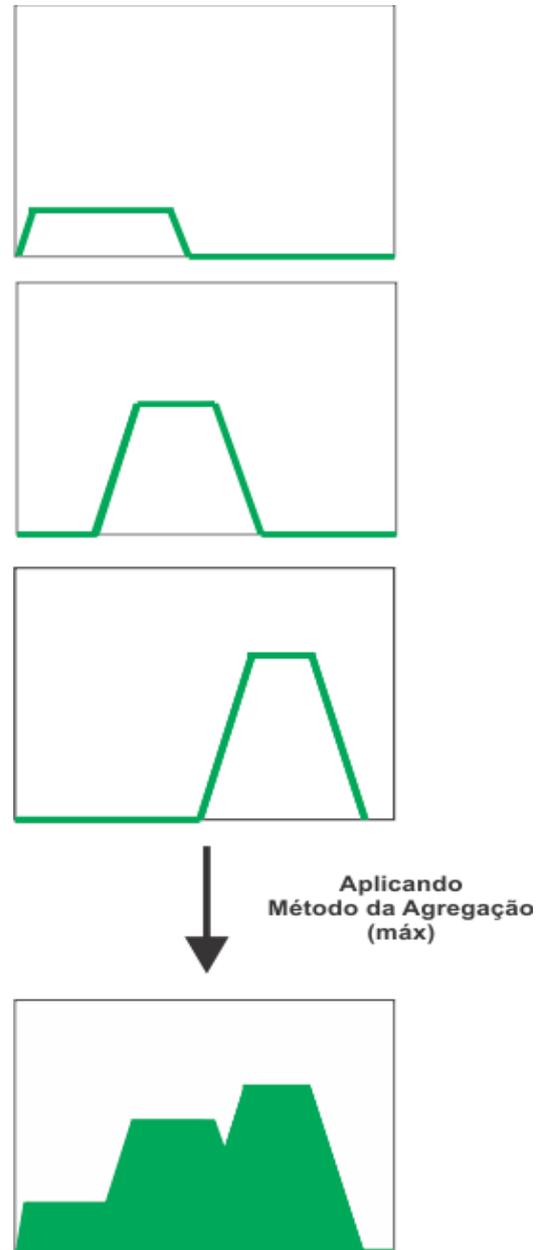


Figura 11 - Método do Centro de Gravidade.

Disponível em: http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/fuzzyinf/main_en.html

Feito todos esses passos, o sistema está pronto para gerar a saída final (saída numérica). Para isso, basta calcular o centro de gravidade da figura resultante ao método de agregação:

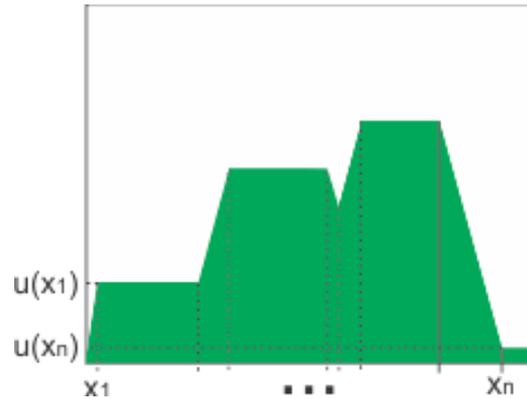


Figura 12 - Método do Centro de Gravidade.

Disponível em: http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/fuzzyinf/main_en.html

Para calcular o centro de gravidade da Figura 12 basta desenvolver a seguinte equação:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot u(x_i)}{\sum_{i=1}^n u(x_i)} \quad (6)$$

Nota-se que desenvolver a equação acima é o mesmo que realizar o somatório da variável multiplicada pelo grau de pertinência da variável, dividido pelo somatório do grau de pertinência (BITTENCOURT, 2011).

Para fim de compreensão, supõe-se que a Figura 12 foi dividida em 10 figuras geométricas auxiliares. E que para cada uma dessas figuras geométrica há um valor relacionado tanto no eixo x (valor da variável), quanto no eixo y (grau de pertinência da variável). Portanto, a equação do cálculo do centro de gravidade nos dá:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i \cdot u(x_i)}{\sum_{i=1}^{10} u(x_i)} = 23,7$$

Portanto:

$$Gorjeta = 23,7\%$$

Ou seja, o resultado do cálculo do centro de gravidade não nos dirá se devemos ou não dar uma gorjeta generosa, mediana ou pouca gorjeta. O resultado

informará o quão generosa, mediana ou quão pouca (em uma escala de 0 a 100%) a gorjeta deve ser.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Sistema Fuzzy Proposto

O sistema *fuzzy* adotado é mostrado na figura abaixo.

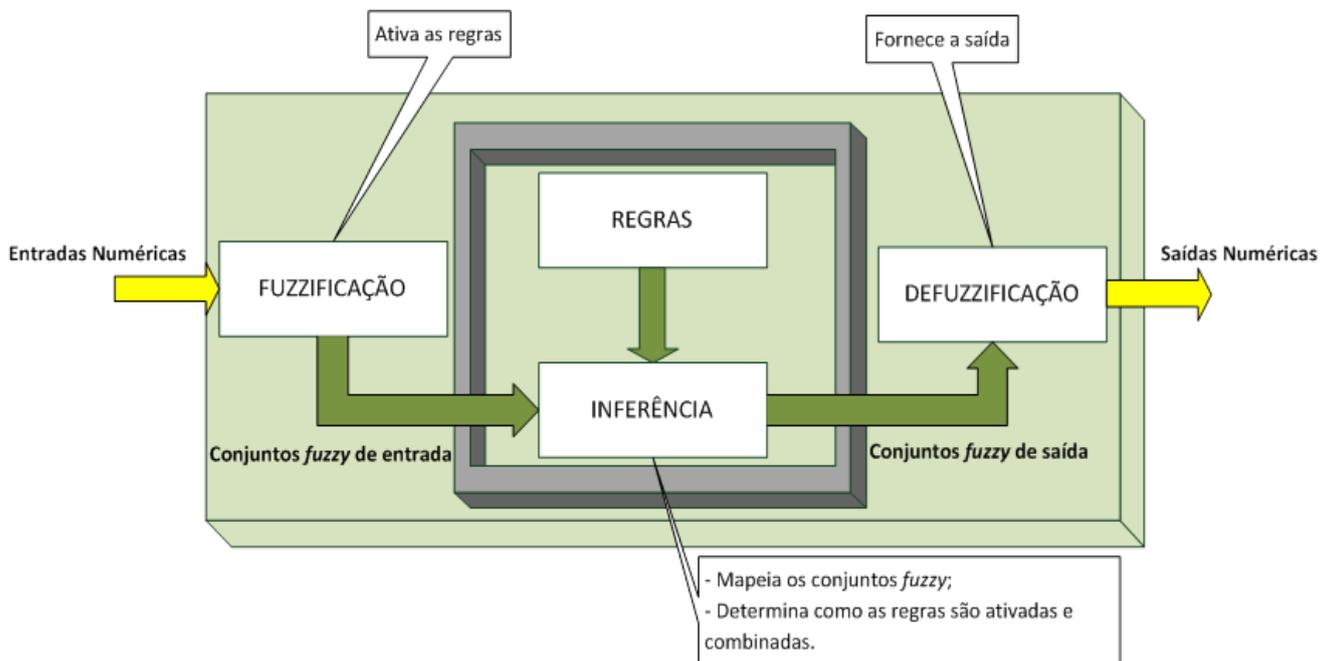


Figura 13 - Sistema Fuzzy Proposto.
FONTE: Autoria Própria.

Como foi abordado detalhadamente no tópico anterior, esse tópico abordará apenas aspectos pontuais do SIF proposto.

4.2 Fuzzificação

Para o sistema proposto, foi utilizado apenas um tipo de função de pertinência: a função de pertinência trapezoidal. A escolha dessa forma geométrica é motivada principalmente pelo fato de que para defuzzificá-la será utilizado o método do Centro de Gravidade, e é sabido que para essa figura elementar o cálculo do centro de gravidade é trivial.

A função de pertinência trapezoidal (Figura 14) é representada por um conjunto de quatro valores (a, b, c, d) . Da mesma forma, o eixo horizontal corresponde à variável em estudo e o eixo vertical ao grau de pertinência (BITTENCOURT, 2011).

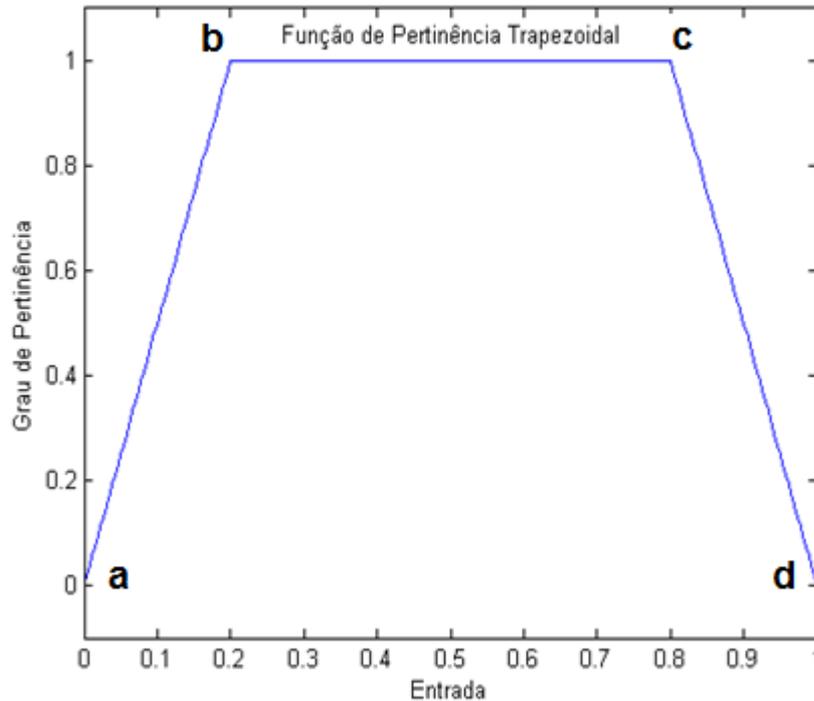


Figura 14 - Função de Pertinência Trapezoidal.
FONTE: Autoria Própria.

As entradas numéricas do sistema fuzzy são obtidas por meio de uma metodologia de segmentação de oscilografias proposta por Moreto (2011). Nesse trabalho, o autor desenvolve um procedimento que segmenta as oscilografias em instantes pré e pós-distúrbio, obtendo assim (em *pu*) o respectivo valor médio da grandeza elétrica.

A Figura 15 mostra um exemplo de segmentação de um registro oscilográfico correspondente à tensão no gerador.

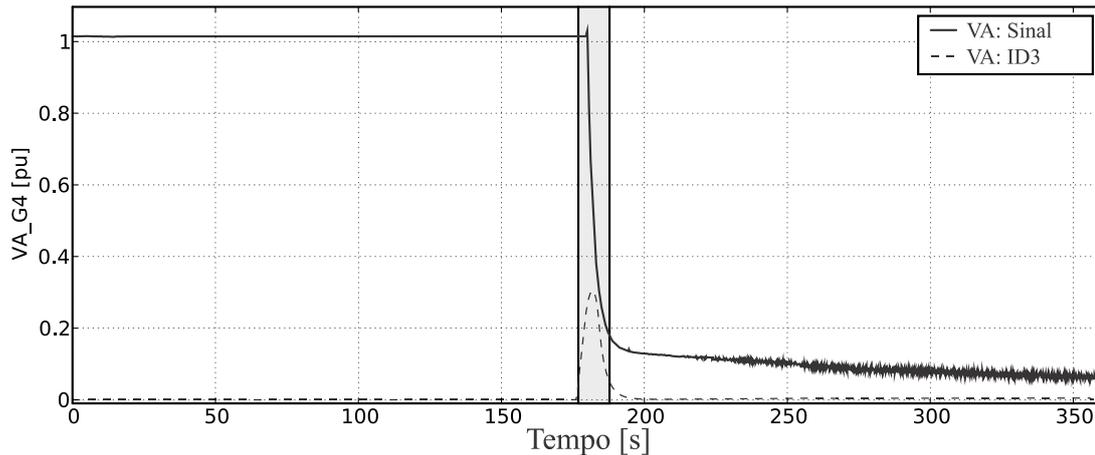


Figura 15 - Exemplo de Segmentação de Registro Oscilográfico.
FONTE: (MORETO, 2011, p. 74)

As grandezas elétricas analisadas pelo sistema proposto são tensão nos terminais do gerador e corrente que flui para a rede. Após a segmentação e extração de valores, os dados das oscilografias que serão fuzzificados são:

- Tensão de sequência positiva Pré-Transitório [*pu*];
- Tensão de sequência positiva Pós-Transitório [*pu*];
- Corrente de sequência positiva Pré-Transitório [*pu*];
- Corrente de sequência positiva Pós-Transitório [*pu*].

Da mesma forma, as possíveis saídas definidas para o sistema *fuzzy* são:

- Energização;
- Desenergização;
- Desligamento Forçado;
- Corte de Carga;
- Tomada de Carga;
- Fora de Serviço;
- Operação Normal.

Esses são os possíveis estados operacionais do gerador mediante um distúrbio.

De acordo com o que foi proposto por Moreto (2011) e Bittencourt (2011) a Tabela 3 mostra os valores que modelam as funções de pertinência de entrada do

sistema *fuzzy* e a Tabela 4 mostra os valores limite das funções de pertinência de saída do sistema *fuzzy*.

Tabela 3 - Limites das Funções de Pertinência das Entradas do Sistema *Fuzzy*.

FONTA: Autoria Própria.

Variáveis de Entrada	Funções de Pertinência	Limites das Funções de Pertinência (<i>a, b, c, d</i>)			
Tensão Pré-Transitório	Tensão Nula	0	0	0,1	0,9
	Tensão Nominal	0,1	0,9	1	1
Tensão Pós-Transitório	Tensão Nula	0	0	0,1	0,9
	Tensão Nominal	0,1	0,9	1	1
Corrente Pré-Transitório	Corrente Nula	0	0	0,05	0,5
	Corrente Nominal	0,05	0,5	1	1
Corrente Pós-Transitório	Corrente Nula	0	0	0,05	0,5
	Corrente Nominal	0,05	0,5	1	1

Tabela 4 - Limites das Funções de Pertinência da Saída do Sistema *Fuzzy*.

FONTA: Autoria Própria.

Variável de Saída	Funções de Pertinência	Limites das Funções de Pertinência (<i>a, b, c, d</i>)			
Estado do Gerador	Energização	0	0,7	1	1
	Desligamento Forçado	0	0,7	1	1
	Desenergização	0	0,7	1	1
	Corte de Carga	0	0,7	1	1
	Tomada de Carga	0	0,7	1	1
	Fora de Serviço	0	0,7	1	1
	Operação Normal	0	0,7	1	1

Como base na Tabela 3 as funções de pertinência das tensões pré e pós-transitório, bem como as correntes pré e pós-transitórios foram modeladas e são mostradas na Figura 16 e na Figura 17.

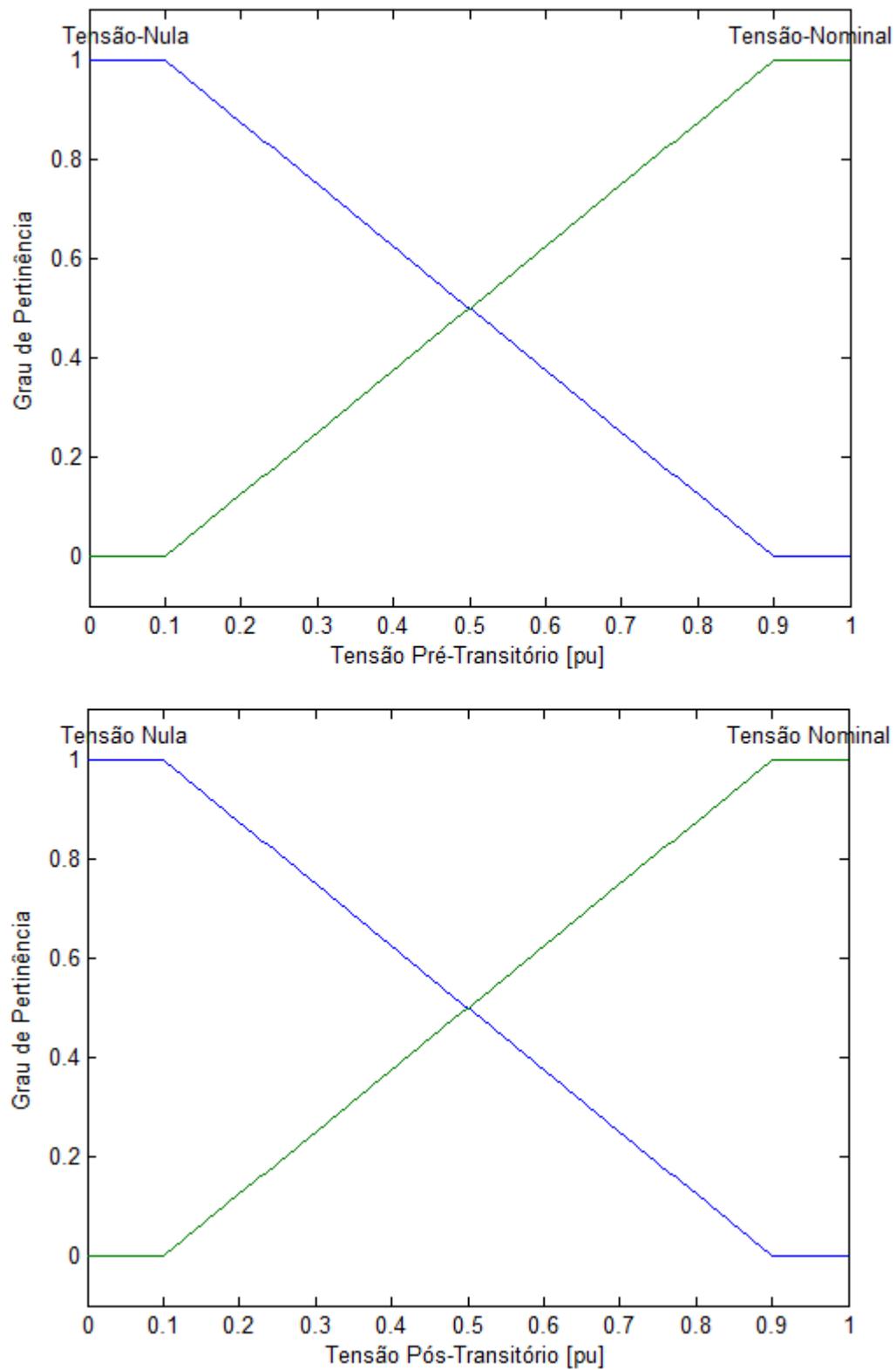


Figura 16 - Funções de Pertinência para as Tensões.
FONTE: Autoria Própria.

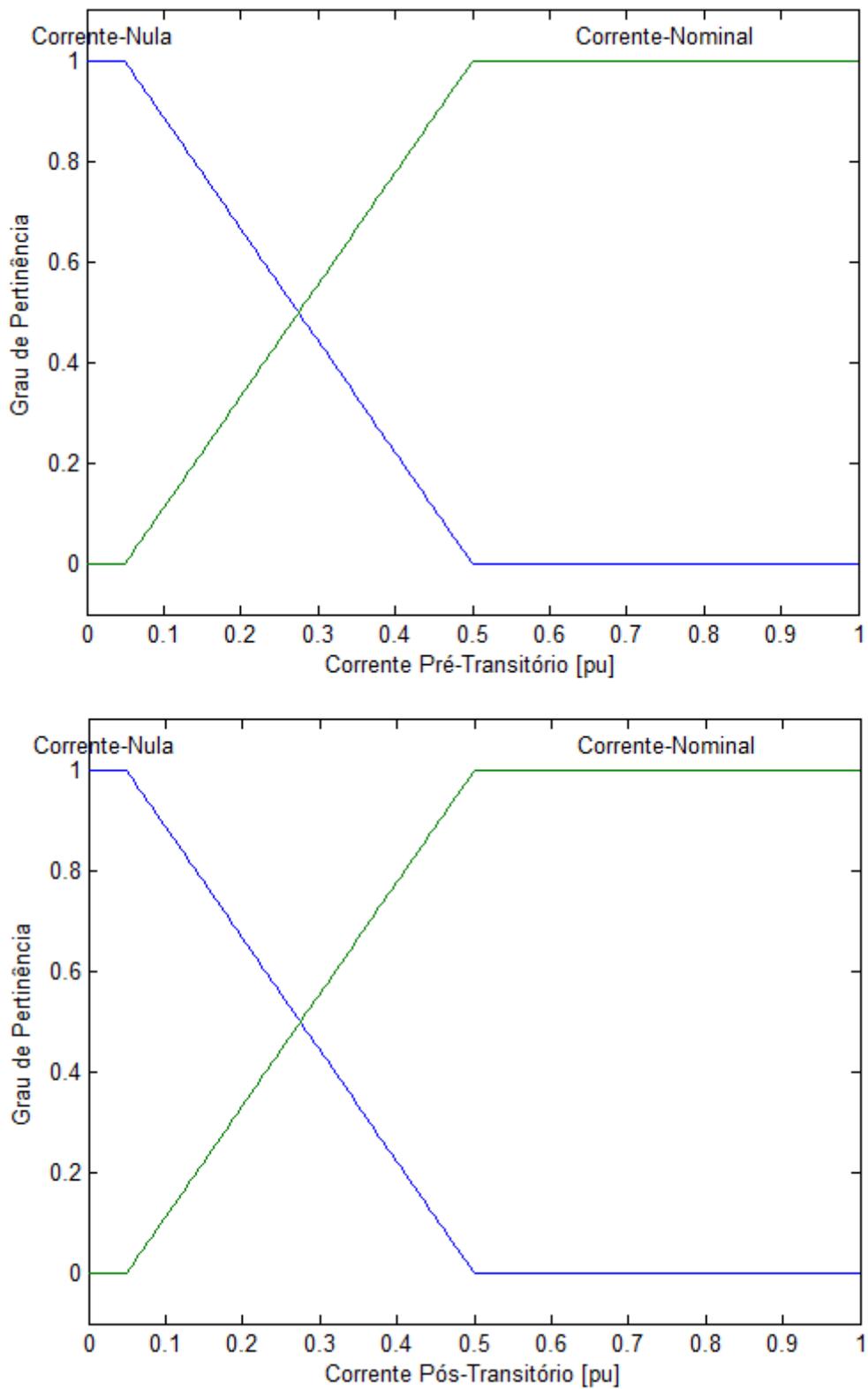


Figura 17 - Funções de Pertinência para as Correntes.
FONTE: Autoria Própria.

Por fim, com base na Tabela 4 foram modeladas as possíveis saídas do sistema *fuzzy* (ver Figura 18), que representam possíveis estados do gerador.

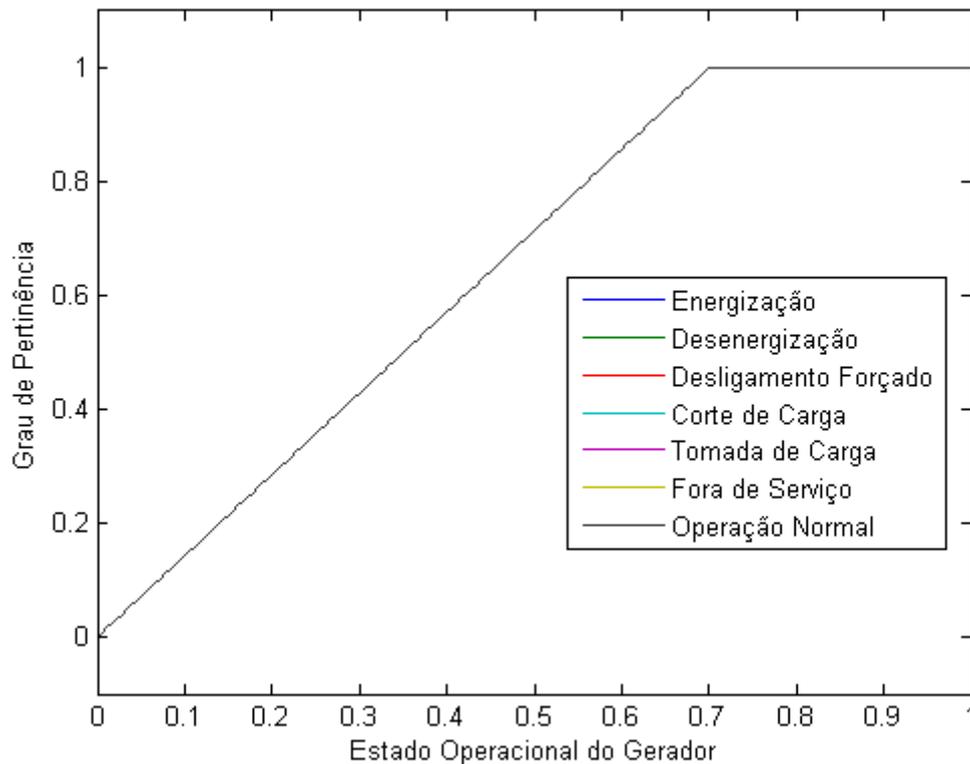


Figura 18 - Funções de Pertinência para os Estados Operacionais do Gerador.
FONTE: Autoria Própria.

Nota-se que todas as funções de pertinência da variável de saída do SIF são iguais, ou seja, possuem os mesmos parâmetros. Portanto, de acordo com o processo de inferência (ativação das regras *fuzzy*) a saída do SIF corresponderá a uma ou mais funções de pertinência de saída, porém, cada uma com um grau de pertinência próprio. Esse grau de pertinência implicará na conclusão do sistema, ou seja, o quanto cada saída está relacionada aos parâmetros das variáveis de entrada.

De acordo com Moreto (2011), as possíveis saídas do sistema *fuzzy* podem ser compreendidas como sendo:

- **Energização:** Quando a tensão passa de um valor próximo de zero para um valor nominal enquanto a corrente se mantém próxima de zero ou há o acréscimo nesta, indicando uma tomada de carga em conjunto com a energização do gerador;

- *Desenergização: Quando a tensão passa de valores próximos do nominal para aproximadamente zero enquanto não há carregamento no gerador (corrente nula e sem variação);*
- *Desligamento Forçado: Caso correspondente à rejeição de carga caracterizada pela interrupção de corrente (redução do valor para valores próximos de zero) e também pela redução da tensão para valores próximos de zero;*
- *Corte de Carga: Caso caracterizado pela manutenção da tensão em valores nominais e decremento do valor da corrente, sendo que o valor inicial desta não seja nulo;*
- *Tomada de Carga: Caso caracterizado pela manutenção da tensão em valores nominais e incremento do valor da corrente, sendo que o valor inicial desta não seja nulo;*
- *Operação Normal: Quando a tensão apresenta valores nominais sem variação significativa, assim como a corrente;*
- *Fora de Serviço: Quando tanto a tensão quanto a corrente são nulas durante o registro, caracterizando o gerador desligado.*

4.3 Regras de Inferência

De acordo com o que foi abordado no item 3.4.2 (Módulo de Inferência), as regras que modelam o sistema *fuzzy* proposto baseiam-se nos conceitos da lógica SE-ENTÃO e são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Regras do Sistema *Fuzzy*.
FONTE: Autoria Própria.

Regra	Descrição
1	SE (v_pré = tensão_nula) E (v_pós = tensão_nominal) E (i_pré = corrente_nula) E (i_pós = corrente_nula) ENTÃO (saída_fuzzy = Energização).
2	SE (v_pré = tensão_nula) E (v_pós = tensão_nominal) E (i_pré = corrente_nula) E (i_pós = corrente_nominal) ENTÃO (saída_fuzzy = Energização).
3	SE (v_pré = tensão_nominal) E (v_pós = tensão_nula) E (i_pré = corrente_nominal) E (i_pós = corrente_nula) ENTÃO (saída_fuzzy = Desligamento Forçado).
4	SE (v_pré = tensão_nominal) E (v_pós = tensão_nula) E (i_pré = corrente_nula) E (i_pós = corrente_nula) ENTÃO (saída_fuzzy = Desenergização).
5	SE (v_pré = tensão_nominal) E (v_pós = tensão_nominal) E (i_pré = corrente_nominal) E (i_pós = corrente_nula) ENTÃO (saída_fuzzy = Corte de Carga).
6	SE (v_pré = tensão_nominal) E (v_pós = tensão_nominal) E (i_pré = corrente_nula) E (i_pós = corrente_nominal) ENTÃO (saída_fuzzy = Tomada de Carga).
7	SE (v_pré = tensão_nula) E (v_pós = tensão_nula) E (i_pré = corrente_nula) E (i_pós = corrente_nula) ENTÃO (saída_fuzzy = Fora de Serviço).
8	SE (v_pré = tensão_nominal) E (v_pós = tensão_nominal) E (i_pré = corrente_nula) E (i_pós = corrente_nula) ENTÃO (saída_fuzzy = Operação Normal).
9	SE (v_pré = tensão_nominal) E (v_pós = tensão_nominal) E (i_pré = corrente_nominal) E (i_pós = corrente_nominal) ENTÃO (saída_fuzzy = Operação Normal).

4.4 Defuzzificação

Como dito no item 4.2, o método de defuzzificação utilizado para o sistema *fuzzy* foi o Método do Centro de Gravidade, que se baseia no cálculo do centro de gravidade da figura geométrica resultado ao processo de inferência (ver item 3.4.3).

4.5 Implementação

A escolha da linguagem de programação para implementação do algoritmo de diagnóstico levou em conta alguns aspectos:

- Praticidade;
- Facilidade para manutenção e possíveis alterações;
- Linguagem de alto nível;
- Preferência por *softwares* livres (*open-source*).

Levando em conta esses aspectos, foi adotada para a implementação a linguagem de programação Python. Segundo Sousa (2011), a linguagem Python de programação além de ser gratuita, é orientada a objetos e de fácil manuseio, apresenta ainda alguns aspectos que facilitam qualquer implementação:

- **Tipagem Dinâmica:** Em Python, não se faz necessária a determinação dos tipos de variáveis a serem utilizadas, o Python as identifica automaticamente.
 - **Gerenciamento de Memória Automático:** O Python aloca e recupera automaticamente os objetos na memória. Ou seja, o programador não se preocupa com essa tarefa.
- **Tipos de Objetos Incorporados:** o Python oferece uma série de estruturas a serem utilizadas, tais como dicionários, listas, tuplas, *strings*. Todas essas estruturas foram otimizadas para que a utilização se torne mais rápida e eficaz.

Além do mais, na metodologia de extração de características proposta por Moreto (2011) citada no item 4.2, o autor também faz uso da linguagem Python para implementar as rotinas de extração. Dessa forma, o algoritmo de diagnóstico aqui proposto pode ser inserido juntamente ao algoritmo de extração de características. Tornando assim o processo automatizado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A validação do sistema aqui proposto pode ser confirmada após a comparação de seus resultados obtidos com os de outros sistemas de análise já existentes. Neste caso, o sistema *fuzzy* aqui desenvolvido será comparado com dados obtidos no trabalho de Moreto (2011).

Para extração de dados utilizados para os testes de validação (entradas para o sistema *fuzzy*) será utilizado o trabalho proposto por Moreto (2011), especificamente o módulo de Extração de Características (EC).

São feitos estudos detalhados para casos mais relevantes dentro de uma usina. Os demais casos são apresentados por meio de tabelas, comparando os resultados com o de sistemas de análise já existentes.

5.1 Estudo de Caso: Energização

Segundo Moreto (2011), a energização da unidade pode ser diagnosticada de duas formas diferentes. Quando a tensão varia de praticamente zero à valores próximos ao nominal e quando não há variação de corrente (indicando que não houve acréscimo de carga na unidade) ou quando além da variação de tensão há também uma variação de corrente (indicando tomada de carga na unidade).

O registro oscilográfico de uma situação de energização pode ser visto na Figura 19.

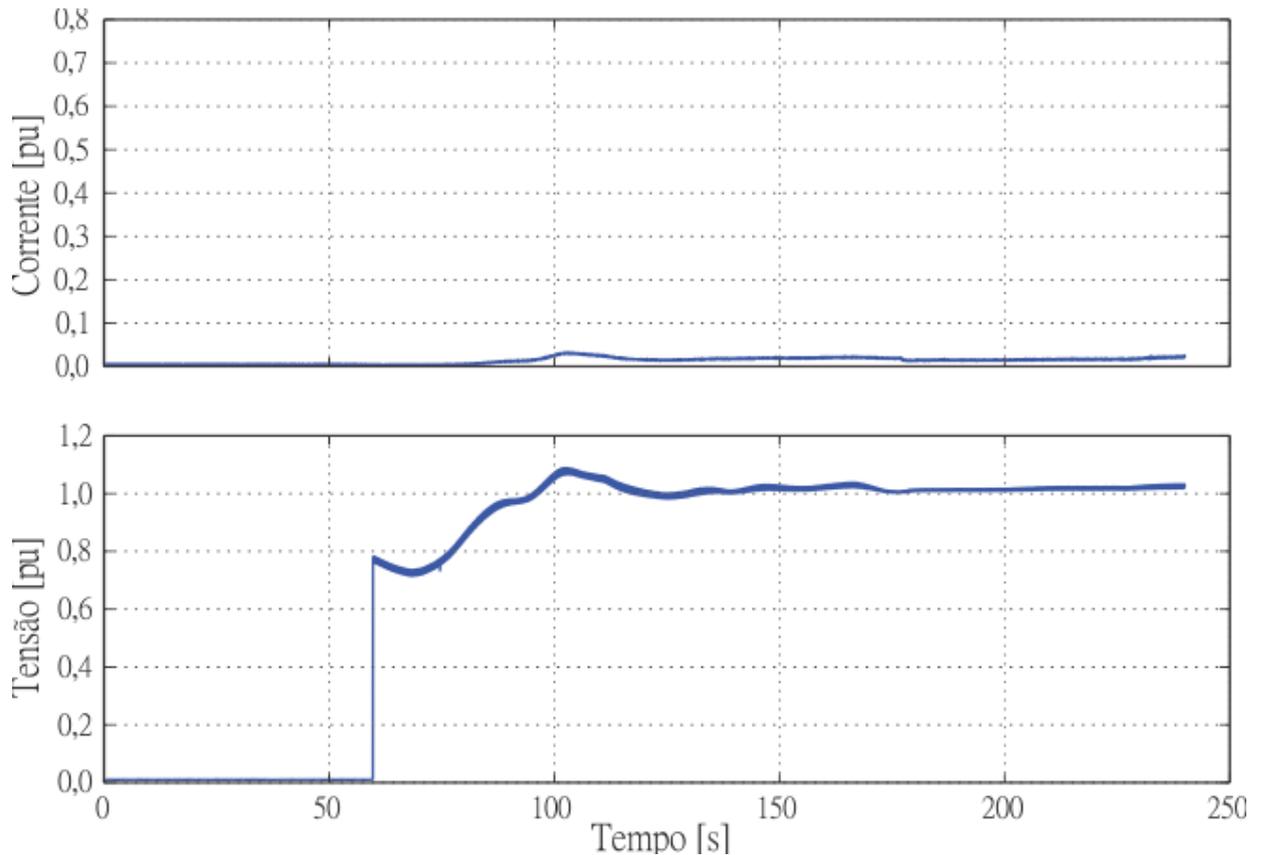


Figura 19 - Registro Oscilográfico de uma Energização no Gerador.
FONTE: (MORETO, 2011)

Nota-se que esse registro oscilográfico representa um caso de energização do gerador quando não há incremento significativo de carga, ou seja, a corrente permanece em valores próximos à zero.

Essa oscilografia foi submetida ao processo de extração de características citado no item 4.2 e os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 5 - Extração de Resultados da Oscilografia.
FONTE: Autoria Própria.

Extração de Resultados da Oscilografia	
Tensão Pré-Transitório	0,009pu
Tensão Pós-Transitório	0,989pu
Corrente Pré-Transitório	0,0095pu
Corrente Pós-Transitório	0,0184pu

Esses valores foram inseridos no SIF proposto e a saída gerada é mostrada a seguir:

Tabela 6 - Saída do Sistema Fuzzy.
FONTE: Autoria Própria.

Saída do Sistema Fuzzy	
Energização	100%
Desenergização	0%
Desligamento Forçado	0%
Corte de Carga	0%
Tomada de Carga	0%
Operação Normal	0%
Fora de Serviço	0%

Para avaliar a resposta do sistema *fuzzy* basta observar graficamente o comportamento das grandezas elétricas. Na Figura 19, nota-se que a tensão eleva-se de valores praticamente nulos para valores elevados (aproximadamente $1pu$ em regime permanente), caracterizando a tensão nominal na máquina. Da mesma forma, observa-se que a corrente no gerador não possui acréscimo significativo, indicando assim que não há inserção de carga no gerador. Sendo assim, de acordo com o Quadro 1, a regra número 1 é acionada e, portanto, a saída do sistema é Energização.

5.2 Estudo de Caso: Desenergização

A Desenergização de uma unidade é caracterizada pela redução da tensão de valores nominais para valores próximos de zero e sem algum carregamento no gerador, ou seja, corrente nula e sem variação (MORETO, 2011).

O registro oscilográfico referente a uma desenergização é mostrado a seguir:

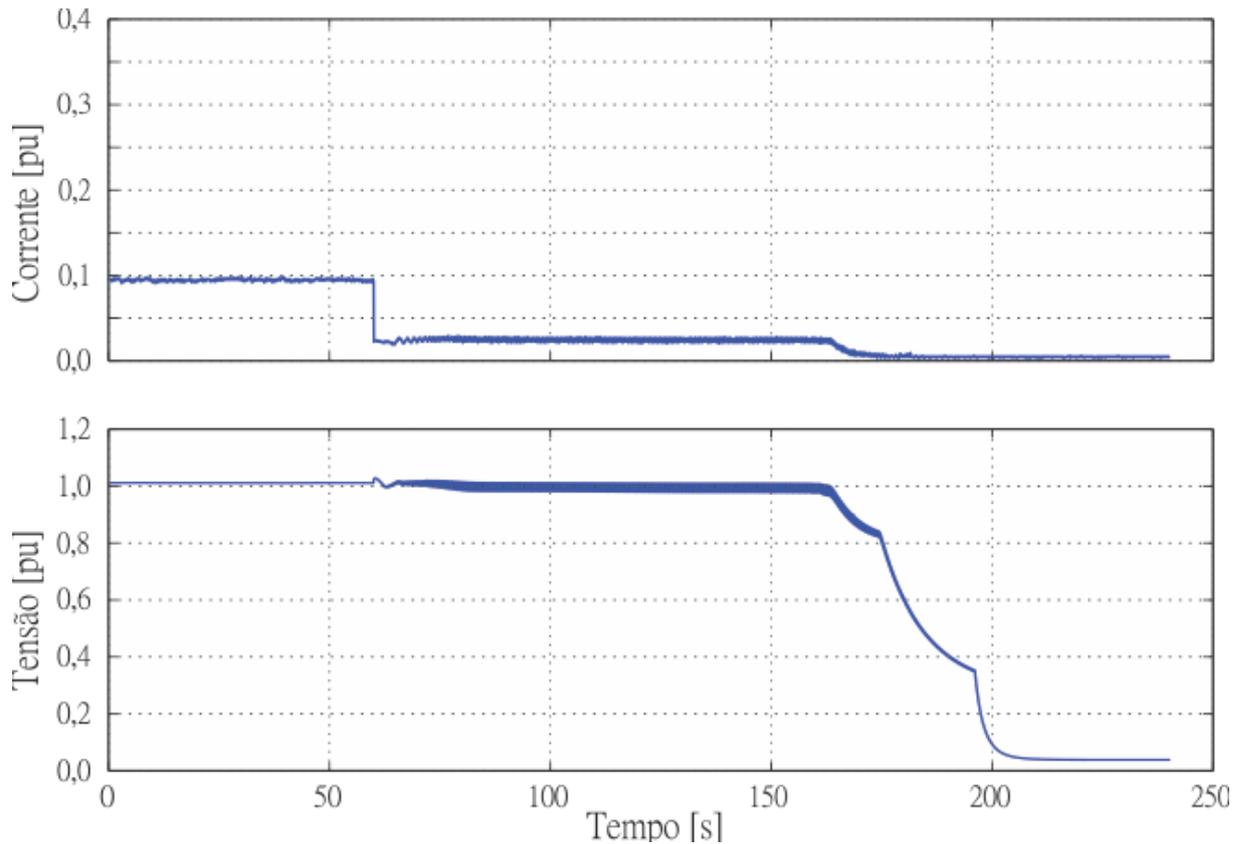


Figura 20 - Registro Oscilográfico de uma Desenergização no Gerador.
FONTE: (MORETO, 2011)

Da mesma forma, a oscilografia foi submetida à etapa de extração de características e os resultados são mostrados a seguir:

Tabela 7 - Extração de Resultados da Oscilografia.
FONTE: Autoria Própria.

Extração de Resultados da Oscilografia	
Tensão Pré-Transitório	0,9956pu
Tensão Pós-Transitório	0,0411pu
Corrente Pré-Transitório	0,0611pu
Corrente Pós-Transitório	0,0134pu

Ao serem inseridas no SIF, as entradas implicaram na seguinte saída *fuzzy*:

Tabela 8 - Saída do Sistema Fuzzy.
FONTE: Autoria Própria.

Saída do Sistema Fuzzy	
Energização	0%
Desenergização	97,5%
Desligamento Forçado	2,5%
Corte de Carga	0%
Tomada de Carga	0%
Operação Normal	0%
Fora de Serviço	0%

Analisando a Figura 20 percebe-se que houve uma variação significativa nos níveis de tensão (passando de valores nominais no período pré-transitório, para valores nulos no período pós-transitório). Entretanto, percebe-se também que houve uma redução nos valores da corrente (mas não assume-se que a corrente variou de um valor nominal para um valor nulo, porém, observando a Figura 17 nota-se que em $0,1pu$ há tanto pertinência para a função “Corrente Nula”, quanto para a função “Corrente Nominal”, logo, o valor da variável corrente começa a pertencer a duas funções de pertinência distintas). Desta forma, de acordo com o Quadro 1, tanto a regra 3 quanto a regra 4 foram ativadas.

Além do mais, esse valor de corrente presente no registro se deve aos procedimentos operacionais da usina em estudo. Por se tratar de uma unidade termoelétrica, o desligamento nesse tipo de unidades é dado na maioria das vezes por um método de reversão de potência, onde força-se a motorização da unidade para assegurar o correto fechamento das válvulas de admissão de vapor na turbina. Essa motorização forçada resulta em um pequeno valor de corrente sendo consumida e é esse valor de corrente que aparece no transitório da corrente. E também, o primeiro degrau de corrente presente no registro oscilográfico é devido ao procedimento de redução de carga ter sido feito de forma abrupta pelo operador. Sendo assim o percentual de 2,5% obtido não é um erro, mas sim mostra a capacidade do sistema proposto em fornecer uma saída mais abrangente do que um sistema baseado em lógica clássica.

5.3 Estudo Geral Comparativo

Para validação completa do sistema fuzzy aqui proposto faz-se necessária uma comparação com um volume maior de oscilografias. O sistema com o qual o sistema fuzzy será comparado com um sistema especialista de análise proposto por Moreto (2011). Nesse sistema, o autor propõe uma metodologia baseada em lógica clássica, ou seja, utilizado conceitos da lógica bivalente citada no item 3.3.

Tabela 9 - Comparação entre Sistemas de Diagnóstico.
FONTE: Autoria Própria.

Comparação entre Sistemas de Diagnóstico						
Caso	$V_{pré}$ [pu]	$V_{pós}$ [pu]	$I_{pré}$ [pu]	$I_{pós}$ [pu]	Sistema desenvolvido por Moreto (2011)	Sistema Fuzzy
1	1.0082	1.0082	0.5065	0.5061	Operação Normal	O. Norm. = 100%
2	1.0291	0.0344	0.2231	0.0051	Desenergização	Desenerg. = 68,5% D. Forçado = 31,5%
3	1.0072	1.0116	0.6037	0.3576	Corte de Carga	O. Normal = 68,4% C. Carga = 31,6%
4	1.0105	1.0044	0.3773	0.5823	T. Carga	O. Normal = 72,7% T. Carga = 27,3%
5	0.0090	0.9893	0.0095	0.0183	Energização	Energ. = 100%
6	0.0008	0.0008	0.0046	0.0047	Fora de Serviço	F. Serviço = 100%
7	1.0453	0.0252	0.5629	0.0032	Desligamento Forçado	D. Forçado = 100%

Antes de se analisar detalhadamente a Tabela 9 é imprescindível ressaltar que por se tratar de um sistema baseado em lógica fuzzy, a premissa inicial de todo sistema fuzzy é a de se lidar com incertezas. Portanto, a imprecisão de uma informação inicial não afeta em grandes proporções as conclusões de um sistema fuzzy. Na tabela acima para algumas análises a resposta do sistema fuzzy mostrou certa ambiguidade nas saídas (caso 2,3 e 4), entretanto, isso não um problema. Vale ressaltar, que o sistema no proposto por Moreto (2011), as regras tanto para “Corte de Carga”, quanto para “Tomada de Carga” se baseiam nos valores da variação da corrente entre os segmentos pré e pós-distúrbio. Já as regras do sistema *fuzzy* aqui proposto se baseiam na dependência da corrente nula, ou seja, a corrente precisa

decair para zero para caracterizar o “Corte de Carga”, ou então, aumentar a partir de zero para então caracterizar a “Tomada de Carga”. Portanto, conclui-se que não houve nenhum tipo de erro nas etapas que compõe o sistema, muito pelo contrário, essa ambiguidade nos valores é referente ao fato de que os dados de entrada do sistema podem possuir informações condizentes à situações não previstas na base de regras do sistema, porém, mesmo assim o sistema obteve conclusões. Essa dualidade nos resultados é uma característica importante dos sistemas *fuzzy*, pois com a lógica clássica, muito provavelmente não haveria saída para situações onde os dados de entrada fossem muito diferentes do que o conjunto de regras prevê. Portanto, não houve discordância em nenhum dos testes acima, ou seja, mesmo com certa incerteza, o sistema *fuzzy* se mostrou convergente aos resultados apresentados pela metodologia de análise proposta por Moreto (2011).

Por fim, um grande conjunto de oscilografias foi submetido ao sistema *fuzzy* de modo a quantificar a eficácia do mesmo quando comparado ao sistema baseado em lógica clássica.

Esses registros oscilográficos são provenientes de uma Usina Termoelétrica no estado do Rio Grande do Sul e são referentes a um mês inteiro de ocorrências, programadas ou não.

Tabela 10 - Comparação entre Sistemas de Diagnóstico Referentes a um Mês Inteiro de Eventos.

FONTE: Autoria Própria.

Comparação entre Sistemas de Diagnóstico				
Quantidade de Registros Oscilográficos	Diagnóstico Moreto (2011)	Incidência	Diagnóstico Fuzzy	Incidência
60	Energização	-	Energização	1
	Desenergização	1	Desenergização	2
	Desligamento Forçado	-	Desligamento Forçado	-
	Corte de Carga	1	Corte de Carga	2
	Tomada de Carga	1	Tomada de Carga	1
	Operação Normal	44	Operação Normal	44
	Fora de Serviço	5	Fora de Serviço	5
	Sem Evento	8	Sem Evento	-

Análise da Tabela 10:

Para as situações de Operação Normal e Fora de Serviço (Gerador Desligado) o sistema *fuzzy* se mostrou inteiramente convergente aos resultados

obtidos pelo sistema proposto por Moreto (2011). E para as demais situações o sistema *fuzzy* gerou mais de uma saída, entretanto, o grau de pertinência com maior peso continuou sendo referente às mesmas saídas obtidas no trabalho baseado em lógica clássica. Exemplificando:

- Para o evento “Desenergização”, o sistema *fuzzy* obteve as seguintes saídas: *Desenergização: 82% e Desligamento Forçado: 18%*;
- Para o evento “Corte de Carga”, o sistema obteve: *Corte de Carga: 58% e Operação Normal: 42%*;
- Para o evento “Tomada de Carga”, obteve: *Tomada de Carga: 73% e Operação Normal: 27%*.

Além do mais, no sistema baseado em lógica clássica, houve alguns registros que não acionaram nenhuma regra e, portanto, não houve saída para esses registros. Esses registros, na sua maioria, são oriundos de erros de medição dos RDPs (por exemplo, os degraus no registro da corrente no gerador Figura 23). Na Tabela 10, para o sistema proposto por Moreto (2011), houve oito registros oscilográficos sem eventos e o sistema *fuzzy*, por sua vez, apresentou saídas para cada uma desses eventos, entretanto, é preciso cuidado ao avaliar essas informações, pois como se tratam de erros de medição, muito provável as saídas geradas pelo sistema *fuzzy* não possuem consistência plena. Novamente, o fato que garante que o sistema *fuzzy* apresente saídas mesmo para situações onde ocorreram erros de medição é proveniente da estruturação das regras de inferência (como citado anteriormente no item 5.3, as regras de inferência são baseadas nos valores de corrente e tensão dos instantes pré e pós-distúrbio).

Tabela 11 - Interpretação das Saídas Fuzzy para Registros Oscilográficos com Erros de Medição.

FONTE: Autoria Própria.

Registros Oscilográficos “Sem Evento” do Gerador		
Diagnóstico Moreto (2011)	Diagnóstico <i>Fuzzy</i>	Valores Segmentados ($V_{pré}, V_{pós}$) e ($I_{pré}, I_{pós}$) [pu]
S E M E V E N T O	Operação Normal: 100% (ver Figura 21)	(1.008, 1.006) e (0.049, 0.023)
	Desenergização: 100% (ver Figura 22)	(0.936, 0.037) e (0.008, 0.003)
	Corte de Carga: 84% Operação Normal: 16% (ver Figura 23)	(1.006, 1.045) e (0.680, 0.123)
	Desenergização: 87% Desligamento Forçado: 13% (ver Figura 24)	(1.015, 0.092) e (0.109, 0.003)
	Energização: 58,6% Operação Normal: 20,7% Fora de Serviço: 20,7% (ver Figura 25)	(0.274, 0.569) e (0.003, 0.003)
	Desenergização: 65% Fora de Serviço: 35% (ver Figura 26)	(0.615, 0.009) e (0.004, 0.004)
	Fora de Serviço: 69% Operação Normal: 31% (ver Figura 27)	(0.008, 0.345) e (0.003, 0.003)
	Energização: 100% (ver Figura 28)	(0.009, 0.989) e (0.009, 0.018)

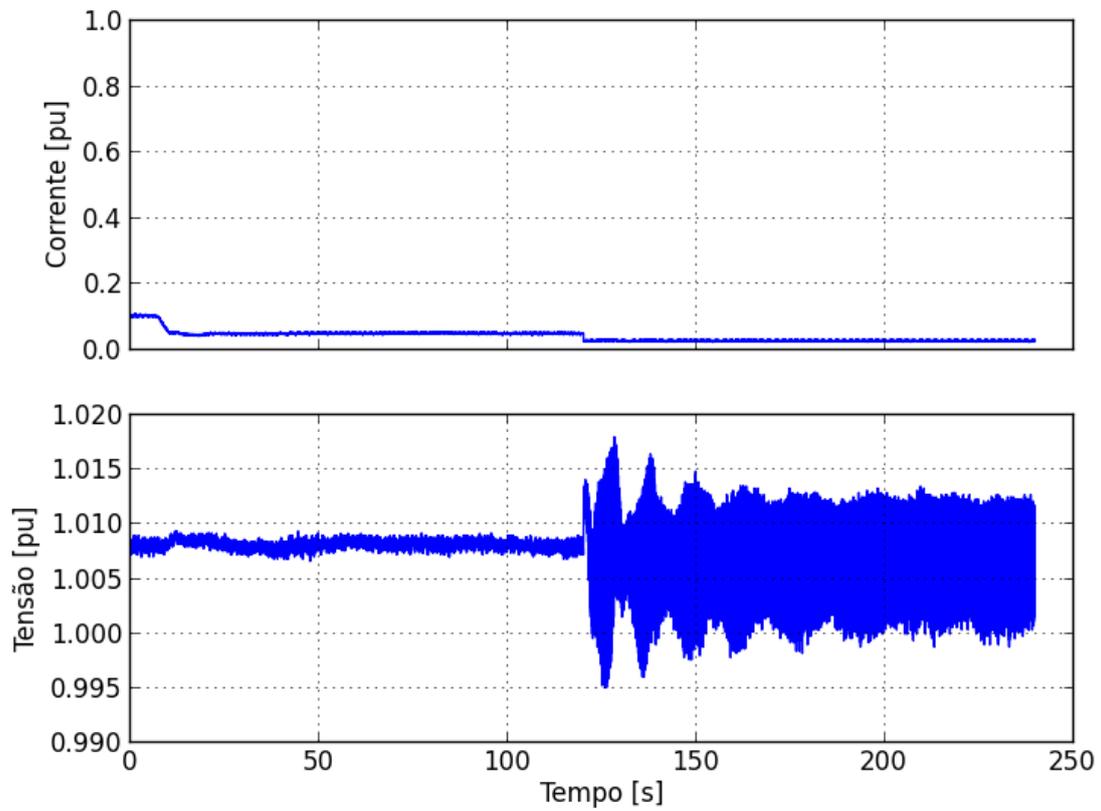


Figura 21 - Registro Oscilográfico (Operação Normal).
FONTE: (MORETO, 2011).

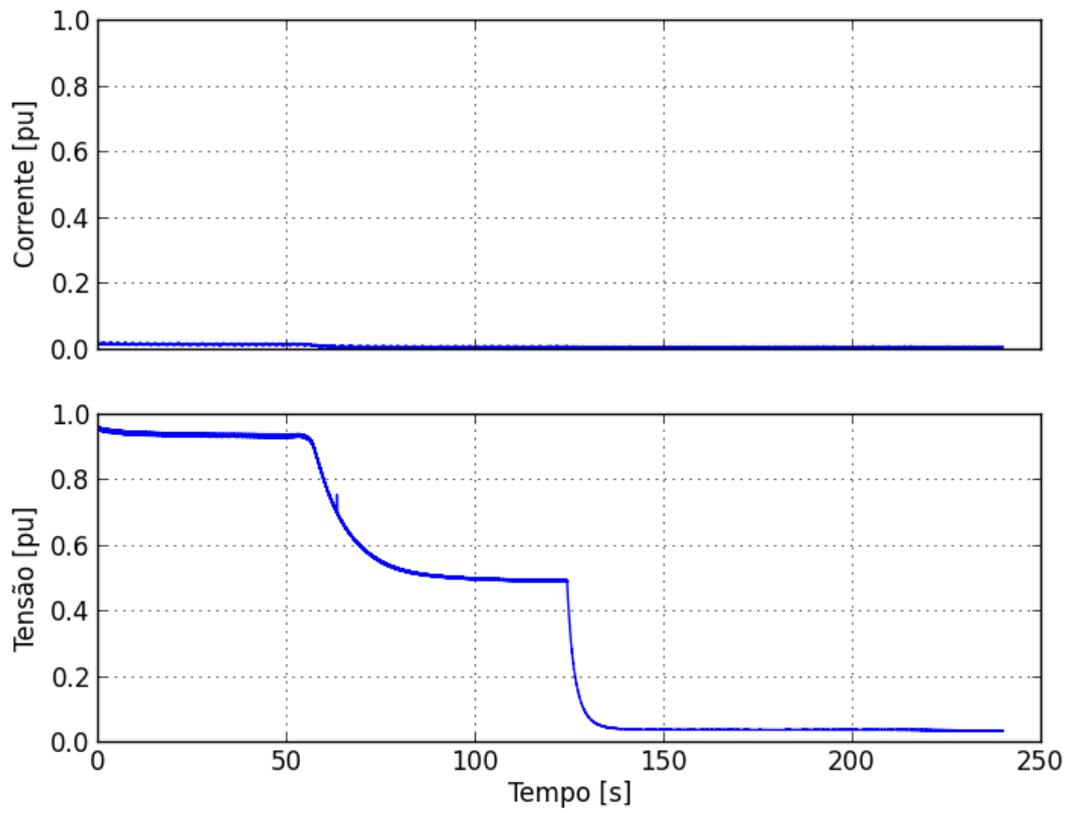


Figura 22 - Registro Oscilográfico (Desenergização).
FONTE: (MORETO, 2011).

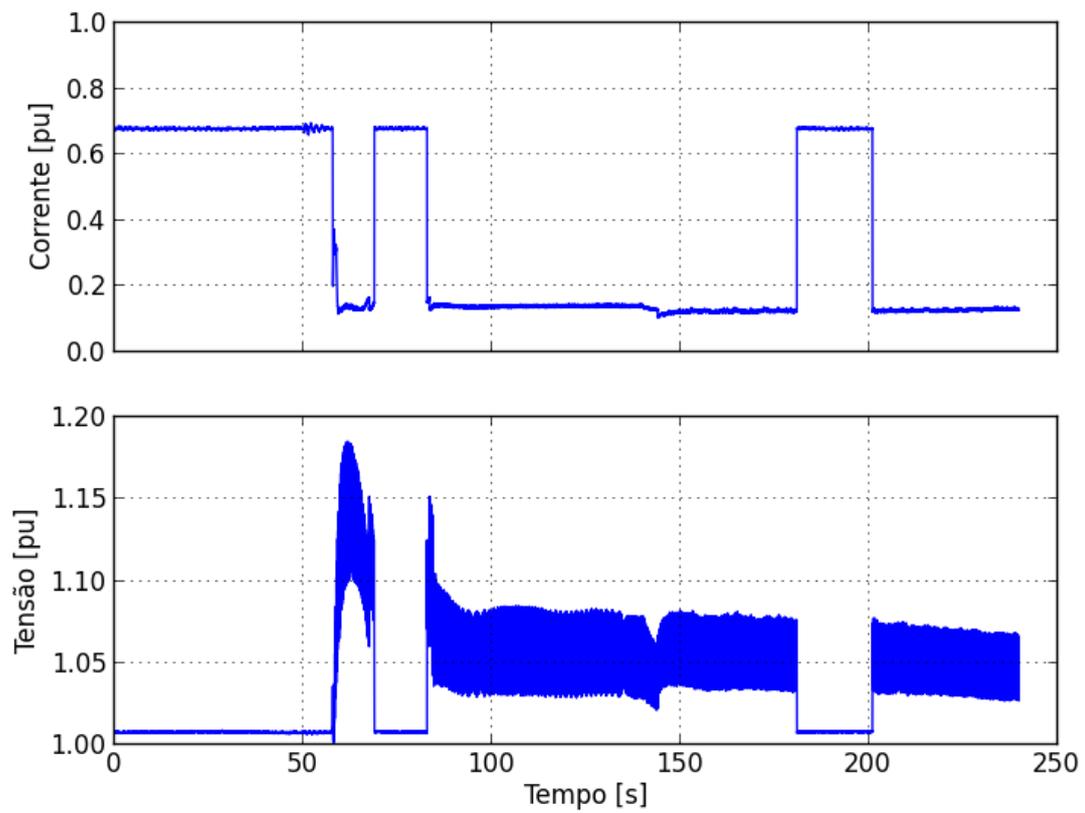


Figura 23 - Registro Oscilográfico (Corte de Carga).
FONTE: (MORETO, 2011).

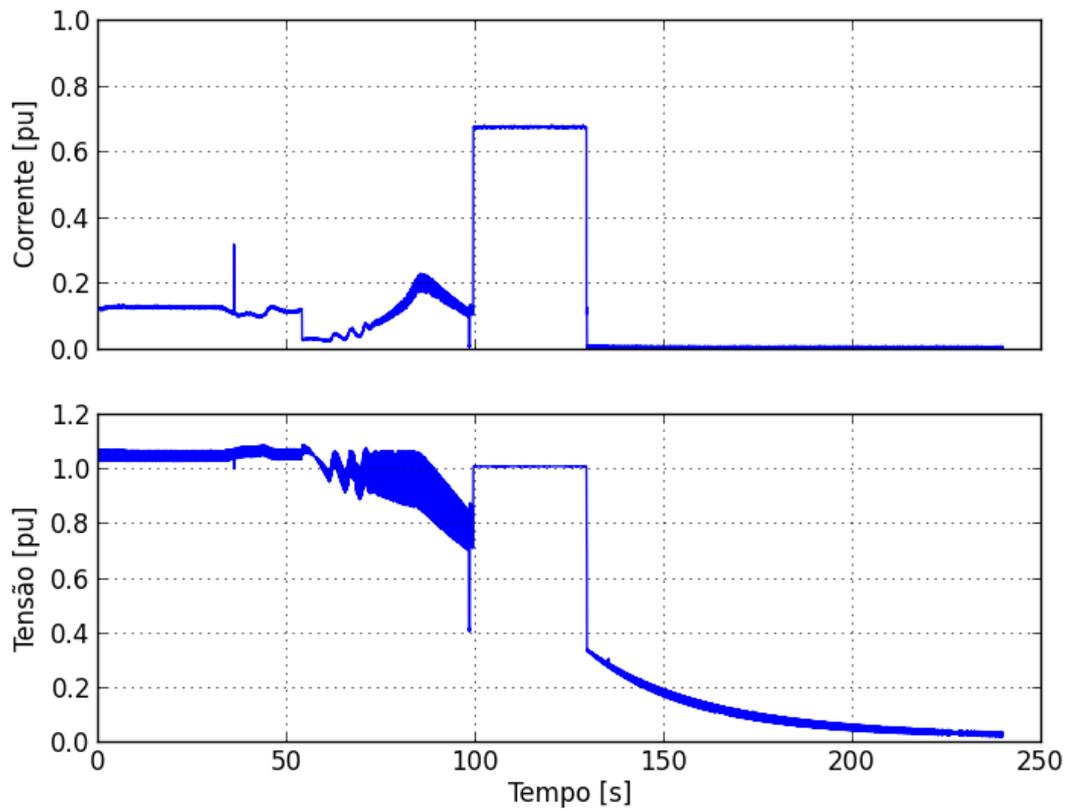


Figura 24 - Registro Oscilográfico (Desenergização).
FONTE: (MORETO, 2011).

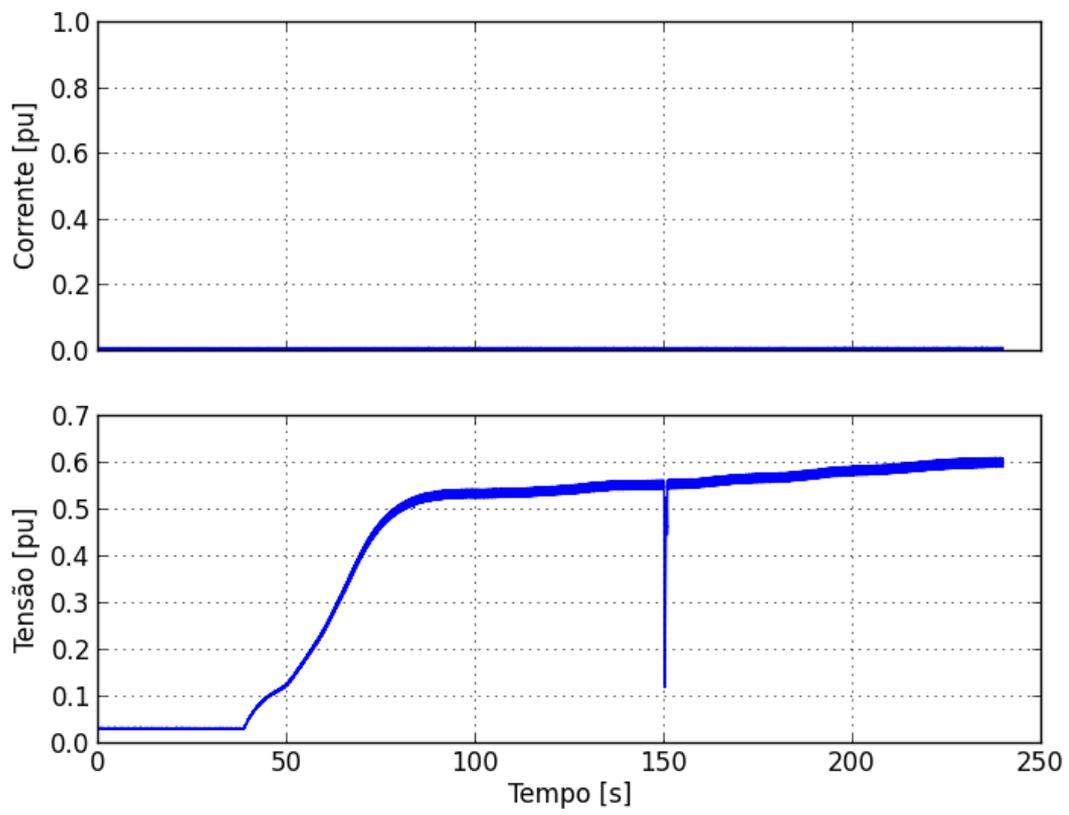


Figura 25 - Registro Oscilográfico (Várias Saídas).
FONTE: (MORETO, 2011).

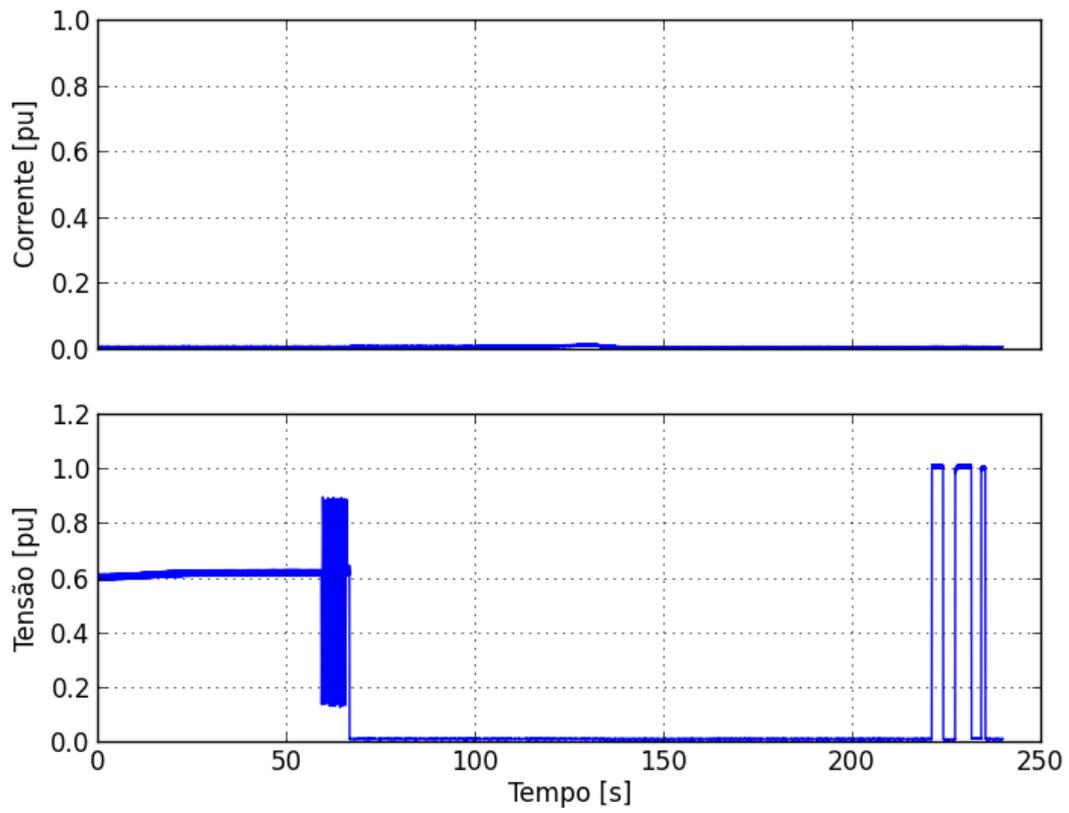


Figura 26 - Registro Oscilográfico (Várias Saídas).
FONTE: (MORETO, 2011).

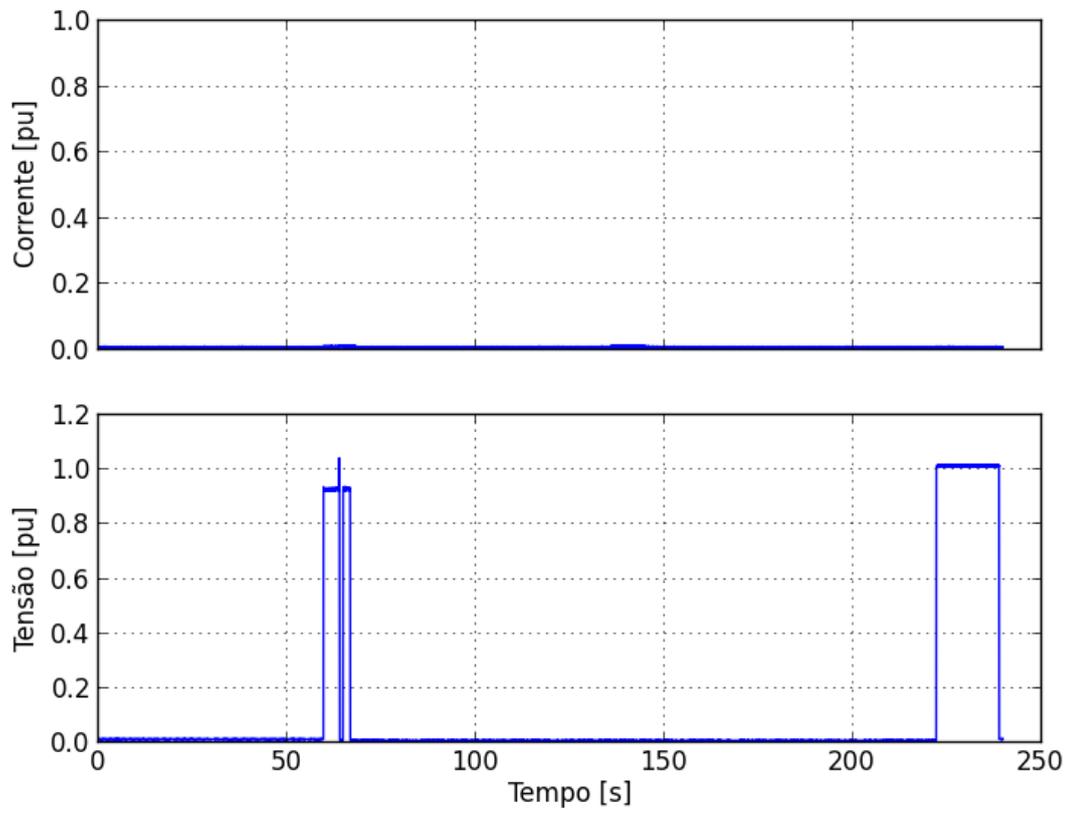


Figura 27 - Registro Oscilográfico (Várias Saídas).
FONTE: (MORETO, 2011).

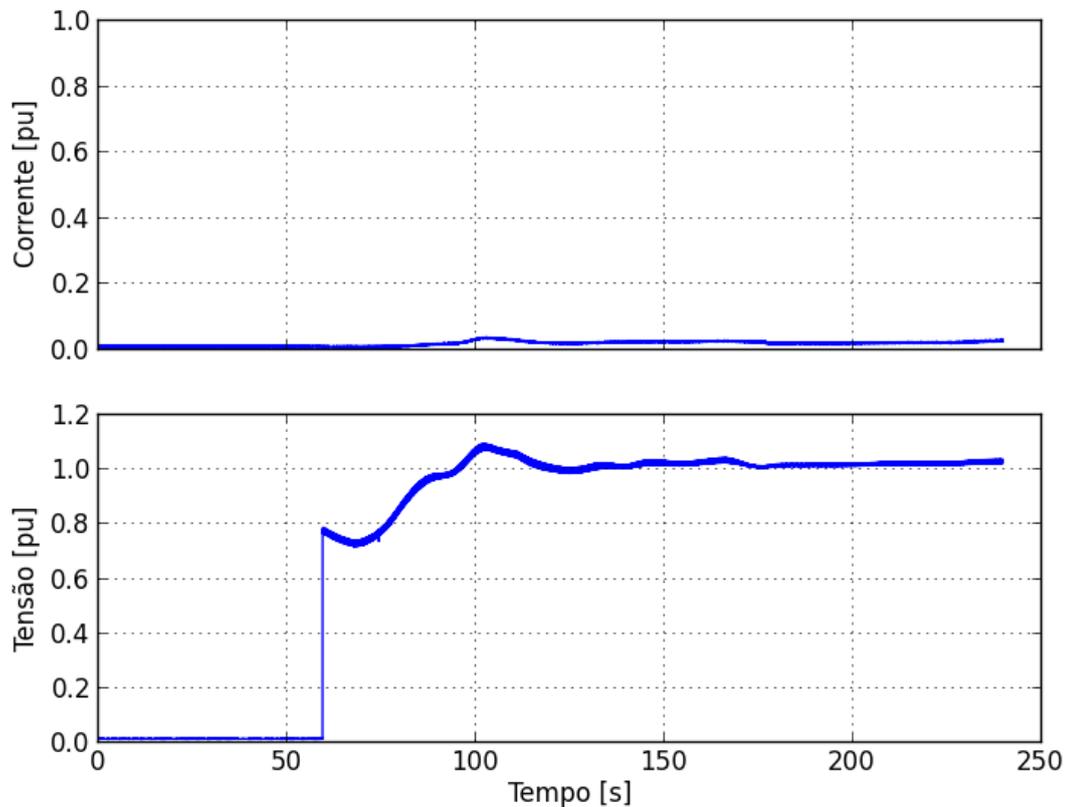


Figura 28 - Registro Oscilográfico (Energização).
FONTE: (MORETO, 2011).

Para todas as ocorrências apresentadas acima (Figura 21 até Figura 28) houve algum tipo de anomalia no registro dos RDPs. E isso é fácil de ser notado ao observar o comportamento das grandezas elétricas referentes aos eventos. Como dito anteriormente, o sistema *fuzzy* apresentou saídas para todos os registros (diferentemente do sistema baseado em lógica clássica), porém, o cuidado necessário para tirar uma conclusão com base no resultado do SIF se faz necessário nessas situações de anomalia, por exemplo, com base na Figura 23, o SIF gerou uma saída “Corte de Carga” para o evento ocorrido. Entretanto, ao avaliar a descrição de um evento de Corte de Carga apresentado no item 4.2, instintivamente conclui-se que o decaimento da corrente é feito de forma direta, uma vez que a carga é removida de forma direta, portanto, os súbitos picos de corrente apresentados no registro oscilográfico (Figura 23) que sucedem o primeiro transitório de corrente são oriundos de um erro no registro dos RDPs causado por um defeito na placa de aquisição de sinais. Além do mais, observando a Figura 25 e o resultado da segmentação apresentado na Tabela 11, nota-se que o registro feito

pelo RDP fez a aquisição dos dados do evento incompleto (pois observando a Figura 25 nota-se que a tensão estabiliza-se em um valor próximo a $0,6 pu$ e o valor segmentado na Tabela 11 é de $0,569 pu$, que é inferior ao valor de regime permanente), ou seja, pode-se afirmar que o RDP não conseguiu efetuar o registro completo da oscilografia, entretanto, mesmo assim o sistema *fuzzy* conseguiu obter uma saída para o registro incompleto (algo que não seria possível em um sistema baseado em lógica clássica).

Basicamente, todas as ocorrências presentes na Tabela 11 são oriundas de erros de registro durante testes de proteção e por má aquisição ou aquisição incompleta dos RDPs.

Para as demais ocorrências apresentadas na Tabela 11 as anomalias que geraram o erro na medição são ou oriundas de testes de proteção ou de faltas externas à usina ou de próprios erros dos RDPs.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia para diagnóstico de unidades geradoras de energia elétrica utilizando lógica *fuzzy*. Para tanto, conceitos referentes à lógica *fuzzy* foram abordados e desenvolvidos. Foi necessária uma modelagem das funções de pertinência para cada variável que seria tratada no sistema de diagnóstico. Não obstante, também foram estruturadas as regras de inferência do sistema *fuzzy*, uma vez que, a filosofia da lógica *fuzzy* é completamente diferente da lógica clássica.

Para validar fielmente o sistema de diagnóstico aqui proposto foram feitos testes com dados reais, de uma usina térmica operante. Todos esses resultados foram comparados um a um com um sistema de diagnóstico já existente, porém, baseado em lógica clássica.

A comparação com o sistema baseado em lógica clássica mostrou que o sistema *fuzzy* é bastante eficiente e que permite um dinamismo não encontrado em sistemas clássicos. Além do mais, o sistema de diagnóstico aqui desenvolvido é relativamente pequeno, pois conta com quatro variáveis de entrada (tensão e corrente pré e pós-perturbação), uma variável de saída (contendo sete funções que representam os estados operacionais do gerador) e nove regras de inferência. Portanto, uma maneira de tornar o sistema mais detalhista e minucioso, seria expandindo essas variáveis. Entretanto, ao passo que isso é feito, o número de regras de inferência cresce em maiores proporções, tornando assim, o sistema não tão trivial.

O sistema *fuzzy* apresentou vantagens em relação aos sistemas clássicos, por exemplo, lidar com informações de entrada imprecisas. É o caso da análise de registros oscilográficos incompletos (devido ao instante em que ocorre o disparo do RDP), onde mesmo com dados não completamente exatos o sistema consegue gerar saídas com grau de precisão aceitável. Esse mesmo fato não pode ser obtido em sistemas baseados em lógica clássica, uma vez que a filosofia da lógica clássica é completamente diferente da filosofia *fuzzy*, ou seja, o possível fato de os dados de entrada não serem iguais aos dados contidos na máquina de inferência (conhecimento do sistema), implicaria na não ativação das regras,

portanto, não haveria saída para caso onde as entradas não satisfizessem plenamente as regras.

Outro aspecto que foi almejado desde o início, foi o da praticidade na implementação. Ao fim do desenvolvimento, o objetivo de manter o sistema simples em operação foi atingido, além do mais, o bloco estrutural referente ao sistema *fuzzy* é de fácil manuseio e alteração, pois se baseia numa arquitetura muito similar à de linguagens de alto nível.

Por fim, como trabalhos futuros, alguns itens de relevância podem ser estudados. Tais como:

- Expansão do algoritmo e análise do impacto;
- Investigação do efeito da forma das funções de pertinência no desempenho do sistema;
- Aplicação de sistemas multi-agentes para diagnóstico de oscilografias;
- Integração de diagnósticos (unidades geradoras, equipamentos de proteção, etc.).

7. REFERÊNCIAS

BITTENCOURT, Claudemir. **Aplicação da Lógica Fuzzy em um Sistema de Pré-Análise de Oscilografias em Unidades de Geração**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2011.

CAMPOS, Mario M. D. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004.

CARDOSO, Ghendy; ROLIM, Jacqueline.G; HELMUT, Hans.Z. Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Potência: Definição do Problema e Abordagens Via Inteligência Artificial. **Revista Controle & Automação**, p. 15, 2004.

CHEN, Guanrong; PHAM, Trung T. **Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems**. New York: CRC Press, 2001.

COSTA, Flavio B. **Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para uso em Registradores Digitais de Perturbação**. 2010.[s.n.], Campina Grande, 2010.

COSTA, Flavio B.; SOUZA, Benemar A. D. Detecção de Falhas Evolutivas e Múltiplos Distúrbios em Registros Oscilográficos Baseada na Transformada Wavelet Discreta. **Revista Controle & Automação**, 2010.

COSTA, Flavio.B et al. **A Tool for Fault and Power Quality Disturbance Analysis in Oscillographic Records**. 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE). Leiria: [s.n.]. 2011. p. 6.

COX, Earl. **The Fuzzy Systems Handbook**. [S.l.]: AP Professional, 1994.

KABILAN , Dakshnamurthy; MANOHAR, Sankaran S. **MATLAB/Simulink Based Transmission Line Automation Using Multiagent System**. 4th International Conference on Intelligent Systems Modelling & Simulation (ISMS). Bangkok: [s.n.]. 2013. p. 5.

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

KOHAGURA, Tiago. **Lógica Fuzzy e suas Aplicações**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

MALUTTA, César. **Método de Apoio à Tomada de Decisão Sobre a Adequação de Aterros Sanitários Utilizando Lógica Fuzzy**. 2004. Tese - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MORETO, Miguel. **Análise Automática de Registros Digitais de Perturbação em Unidades Geradoras**. 2011. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. **Sistema Especialista para Pré-Análise de Oscilografias Voltadas para Geração**. Florianópolis - SC. 2007.

MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. Análise Automática de Oscilografias em Sistemas Elétricos de Potência. **Revista SBA: Controle e Automação**, Julho e Agosto 2010.

PEREZ, Joe. **A Guide to Digital Fault Recording Event Analysis**. 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers. Winnipeg: IEEE. Março 2010. p. 17.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Documentation. **Python**. Disponível em: <<http://www.python.org/>>. Acesso em: 26 jun. 2013.

SALEM, Mohammed.E et al. **Software Tool for Real Time Power Quality Disturbance Analysis and Classification**. 5th Student Conference on Research and Development, 2007. SCORed 2007.. Selangor: [s.n.]. 2007. p. 5.

SOUSA, Artur F. D. S. **SAI-RSS: Sistema de Auto-Inspeção de Resíduos de Serviço de Saúde**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

TCHEOU, Michel P. **Análise e Representação de Sinais de Oscilografia Usando Decomposições Adaptativas Redundantes**. 2005. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VAZ, Alessandro M. **Estudo das Funções de Pertinência para Conjunto Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos Fuzzy**. 2006. Dissertação - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

YUE, Ling; LIAO, Zhiwei; HUANG, Shaoxian. **Fault Diagnosis Based on Fault Recorder Data and Temporal Constraint Network in HV Transmission System**. International Conference on Green Circuits and Systems (ICGCS). Shanghai: [s.n.]. 2010. p. 6.

ZADEH, Lofti A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, p. 338-353, 1965.