

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CLAUDEMIR GODOY DE BITTENCOURT

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY EM UM SISTEMA
DE PRÉ-ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS EM
UNIDADES DE GERAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2011

CLAUDEMIR GODOY DE BITTENCOURT

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY EM UM SISTEMA
DE PRÉ-ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS EM
UNIDADES DE GERAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto.

PATO BRANCO

2011

Este trabalho de conclusão de curso é dedicado à minha mãe Rotilde Godoy de Bittencourt, e aos demais familiares, colegas e professores, e em memória à minha avó Juvita Bittencourt.

AGRADECIMENTOS

Certamente esses pequenos parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase da minha vida. Portanto, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas fazem parte do meu pensamento e admiração.

Agradeço a todos os colegas e professores de graduação que contribuíram de alguma forma para minha formação acadêmica, contribuindo no meu aprendizado.

Agradeço fortemente a minha família que me deu força e apoio durante esta etapa da minha vida.

Agradeço ao Dr. Miguel Moreto pela orientação deste trabalho e pelos momentos de aprendizado.

Agradeço aos pesquisadores e professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

RESUMO

BITTENCOURT, Claudemir G. Aplicação da Lógica *Fuzzy* em um Sistema de Pré-análise de Oscilografias em Unidades de Geração 2011. 80f. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco – PR, Outubro 2011.

Atualmente verifica-se a presença dos registradores digitais de perturbação na maioria das instalações dos sistemas elétricos de potência (SEPs). Estes equipamentos realizam um monitoramento constante do sistema registrando eventuais distúrbios significativos em grandezas como tensões e correntes. A análise da grande quantidade de dados fornecida por estes equipamentos tem se tornado um desafio para os engenheiros analistas, os quais devem priorizar parte dos registros uma vez que não há tempo hábil para que todos os dados sejam verificados. Sendo assim, este trabalho apresenta um estudo para verificar a aplicabilidade da lógica *fuzzy* (nebulosa) na solução deste problema, onde o objetivo proposto é a adaptação de um módulo de tomada de decisão, que compõe um sistema de pré-análise automática de oscilografias já existente. Espera-se com este trabalho dotar o módulo de tomada de decisões com capacidade de lidar com informações inexatas, baseando-se no raciocínio humano. Os testes realizados com dados obtidos a partir de registros reais de perturbações demonstram que o sistema desenvolvido atende aos objetivos propostos.

Palavras-chave: Registradores digitais de perturbação, oscilografia, lógica *fuzzy*, diagnóstico automático.

ABSTRACT

BITTENCOURT, Claudemir G. Aplicação da Lógica *Fuzzy* em um Sistema de Pré-análise de Oscilografias em Unidades de Geração 2011. 80f. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco – PR, Outubro 2011.

Nowadays it is a common practice to have digital fault recorders installed in most electric power systems (SEPs) installations. These devices perform a continuous monitoring function recording any disturbances related to significant quantities such as voltages and currents. The analysis of the large amount of data provided by these devices has become a challenge for engineers analysts who have to prioritize the most relevant records because there is no able time to verify all the data. This work presents a study to verify the applicability of fuzzy logic to solve this problem, where the proposed objective is the adaptation of an existing decision making module from an automated oscillography analysis scheme. It is expected that this work would provide the decision-making module the ability to deal with inaccurate information, based on the human reasoning process. Tests performed with real disturbance records shows that the proposed methodology fulfills the stated objectives.

Keywords: Digital Fault Recorders, disturbance, oscillography, fuzzy logic, automated diagnosis.

LISTAS DE SIGLAS

CDA	CENTRO DE ÁREA (GRAVIDADE)
EC	EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS
FLT	FUZZY LOGIC TOOLBOX
GPS	SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL
IC	INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL
MDM	MÉDIA DOS MÁXIMOS
MAX	CRITÉRIO DO MÁXIMO
MTD	MÓDULO DE TOMADA DE DECISÃO
ONS	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO
RC	REGISTRO DE CURTA DURAÇÃO
RDPS	REGISTRADORES DIGITAIS DE PERTURBAÇÃO
RF	REGISTRO DE LONGA DURAÇÃO OU FASORIAL
SEP	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
SIN	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
SPERT	SISTEMA INTEGRADO DE ANÁLISE DE PERTURBAÇÕES
UTFPR	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de registro de forma de onda.....	17
Figura 2 - Registro fasorial, onde o gráfico mostra apenas o módulo dos fasores.....	17
Figura 3 - Funções de pertinência para a variável temperatura.....	20
Figura 4 - Função de pertinência triangular.....	21
Figura 5 - Funções de pertinência para a variável estatura.....	22
Figura 6 - Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	26
Figura 7 - Métodos de Defuzzificação.	29
Figura 8 - Diagrama de blocos do esquema proposto.	31
Figura 9 - Registro de transitório mostrando os intervalos pré-perturbação e pós-perturbação.	32
Figura 10 - Registro Fasorial de Desenergização.....	33
Figura 11 - Registro Fasorial de Desligamento Forçado.....	34
Figura 12 - Sistema <i>fuzzy</i> proposto.....	35
Figura 13 - Tela inicial e de configuração básica do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB. .	36
Figura 14 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Tensão Pós-Transitório”.	39
Figura 15 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Tensão Pré-Transitório”.	39
Figura 16 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Corrente Pós- Transitório”.....	40
Figura 17 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Corrente Pré- Transitório”.....	40
Figura 18 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Variação de Corrente”.	41
Figura 19 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Energização”.....	41
Figura 20 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Desligamento Forçado”. .	42
Figura 21 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Desenergização”.	42
Figura 22 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Corte de Carga”.	43
Figura 23 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Operação Normal”.....	43
Figura 24 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “ Fora de Serviço”.	44
Figura 25 - Determinação e Inserção das Regras <i>Fuzzy</i> para o Sistema.	45
Figura 26 - Visualização gráfica das regras <i>fuzzy</i>	46

Figura 27 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: energização.	49
Figura 28 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.887).	50
Figura 29 - Variável de saída e significado do valor de saída (0.887).	51
Figura 30 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: Desligamento Forçado.	52
Figura 31 - Registro fasorial da corrente referente ao estado operativo do gerador: Desligamento Forçado.	52
Figura 32 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.984).	54
Figura 33 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.984).	55
Figura 34 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: Desenergização.	56
Figura 35 - Registro fasorial da corrente referente ao estado operativo do gerador: Desenergização.	56
Figura 36 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.887).	58
Figura 37 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.887).	59
Figura 38 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: Corte de Carga.	60
Figura 39 - Registro fasorial da corrente referente ao estado operativo do gerador: Corte de Carga.	60
Figura 40 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.677).	62
Figura 41 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.677).	63
Figura 42 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.889).	65
Figura 43 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.984).	66
Figura 44 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.894).	68
Figura 45 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.984).	69

LISTAS DE SÍMBOLOS

$\mu_A(x)$	Valor da função de pertinência do conjunto nebuloso A correspondente ao elemento x
X	Universo de discurso
A	Conjunto <i>Fuzzy</i>
A, B e C	Termos linguísticos associados aos conjuntos nebulosos
f_A	Função característica
a	Conjunto da função de Pertinência
b	Conjunto da função de Pertinência
c	Conjunto da função de Pertinência
d	Conjunto da função de Pertinência
C_1, C_2, C_3	Conjuntos <i>Fuzzy</i>

SUMÁRIO

1 – Introdução	8
1.1 Motivação	9
1.2 Objetivo	10
1.3 Proposta	10
1.4 Justificativa.....	10
1.5 Organização do Trabalho.....	11
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1 Estado da Arte	12
3. Registradores Digitais de Perturbação.....	14
3.1 Introdução.....	14
3.2 Função dos RDPs	14
3.3 Oscilografias	15
4. Lógica <i>Fuzzy</i>	18
4.1. Introdução.....	18
4.2. Conjuntos <i>Fuzzy</i>	18
4.3 Variáveis Linguísticas	20
4.4 Função de Pertinência.....	21
4.4.1 Funções de pertinência triangulares	23
4.4.2 Funções de pertinência trapezoidal.....	24
4.5 Sistema <i>Fuzzy</i>	25
4.5.1 Inferência (método de mandani) e Defuzzificação (CDA).....	27
4.5. Conclusão	30
5. Metodologia.....	31
5.1 Modelagem do sistema fuzzy	35
5.1.1 Variáveis e Conjuntos <i>fuzzy</i>	37
5.1.2 Regras Fuzzy	44

5.1.3 Defuzzificação	47
6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1 Estudo de caso: Energização	48
6.2 Estudo de caso: Desligamento forçado.....	51
6.3 Estudo de caso: Desenergização.....	55
6.4 Estudo de caso: Corte de carga.....	59
6.5 Estudo de caso: Operação normal.....	63
6.6 Estudo de caso: Fora de serviço	66
6.7 Análise dos Resultados	69
7. Conclusões.....	72
8. Referências	74

1 – INTRODUÇÃO

Em um sistema elétrico de potência (SEP) os geradores são componentes essenciais, devendo ser monitorados constantemente para manter sua correta operação, minimizando os custos decorrentes de uma eventual parada. Esse monitoramento, além dos diversos dispositivos de proteção, é executado pelos registradores digitais de perturbação (RDPs), conhecidos também como oscilógrafos digitais, os quais estão sempre monitorando grandezas predefinidas do gerador, como tensões e correntes, além dos estados de dispositivos de proteção (MORETO e ROLIM, 2007).

O registro (gravação) dos sinais é feito caso alguma das grandezas monitoradas ultrapasse um limiar pré-estabelecido, ou caso ocorra a atuação de funções de proteção ou chaveamentos. A maioria dos RDPs atuais possui conexão para sincronismo temporal com sistema de posicionamento global (GPS). Com isso os sinais amostrados são sincronizados em uma base de tempo absoluta, possibilitando a correlação de registros de diferentes RDPs (VARELA et al., 2009).

Os RDPs utilizados atualmente em sistemas de geração permitem então que todos os registros oscilográficos sejam concentrados em um centro de operação. Estes sistemas são chamados de redes de oscilografia e são regulamentados pelos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2002b). O ONS também regulamenta a forma como os dados são registrados nos RDPs. São definidos dois tipos de registros: o Registro de curta duração (RC) e o Registro de longa duração ou fasorial (RF). O primeiro é voltado para a aquisição das formas de onda de tensões e correntes para fins de análises de distúrbios rápidos, como curtos-circuitos. Este registro permite a execução do cálculo de conteúdo harmônico das grandezas registradas bem como a sua decomposição em componentes simétricas. Normalmente o RC tem duração de alguns segundos. O Registro de longa duração ou fasorial (RF) é voltado para o registro dos valores eficazes das tensões e correntes de sequência positiva e dos ângulos relativos para fins de análises de distúrbios lentos (ONS, 2002a). O uso de uma taxa de amostragem elevada neste caso se mostra impraticável devido à duração do RF, que é da ordem de minutos, necessitando de grande quantidade de memória para armazenar cada registro (MORETO e ROLIM, 2007).

Após uma perturbação no sistema (faltas, descargas atmosféricas, falhas em equipamentos, etc.) podem ser gerados diversos registros oscilográficos provenientes de diferentes RDPs. Com o intuito de determinar uma possível causa da perturbação e verificar a

integridade dos equipamentos após a falta, o analista responsável deve fazer a conferência dos dados provenientes de todos RDPs envolvidos, verificando os dados das oscilografias. Em todo o processo de análise, o tempo de coleta dos dados e filtragem dos registros relevantes pode durar algumas horas. Somado a isto está o fato de que diversas ocorrências podem ser registradas por dia em uma empresa de geração. (VARELA et al., 2009)

Uma das consequências da popularização dos RDPs são as dificuldades encontradas em 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, por exemplo.

O estudo da lógica fuzzy, aplicada em um sistema de pré-análise já existente, é apresentado neste trabalho. O sistema de lógica fuzzy é executado após a extração das características dos dados gerados pelos RDPs. Nesta etapa estão sendo utilizados somente dados do registro de longa duração. O intuito é determinar o estado de operação do(s) gerador(es) durante o período de tempo correspondente a duração do registro. Através desta análise de longa duração ou fasorial é possível decidir se a oscilografia é importante e deve ser analisada com mais cuidado ou se já pode ser arquivada por não ser necessária uma análise posterior. Com este objetivo a *Lógica Fuzzy* é a principal ferramenta usada, neste trabalho, como ferramenta para tomada de decisão. Trata-se de um fundamento empregado em sistemas de incerteza e imprecisos, apresentando resultados de grande exatidão, graças ao uso de seus conjuntos nebulosos, aliados às funções de pertinência (JANÉ, 2004) e (CAMPOS e SAITO, 2004).

1.1 MOTIVAÇÃO

A complexidade e quantidade dos dados verificados durante o processo de análise de uma ocorrência são os principais motivadores para que sejam desenvolvidos sistemas computacionais de análise automática de oscilografias. No entanto o sistema existente utilizado como base neste trabalho de conclusão de curso não leva em conta a incerteza, ou seja, as regras de classificação são definidas com base em valores fixos, não considerando resultados aproximados, podendo gerar erros, devido a imprecisão dos dados. Portanto esta é

a principal motivação de aplicar lógica *fuzzy* neste sistema existente, deixando-o mais confiável e robusto com o intuito de produzir uma eficiente análise automática.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicabilidade da lógica *fuzzy* em um sistema de análise de oscilografias já existente buscando determinar o estado de operação do gerador e o tipo de distúrbio detectado na oscilografia. A principal razão de aplicar a lógica *fuzzy* neste sistema é diminuir os erros de análise filtrando os registros oscilográficos e arquivando os casos irrelevantes, com intuito de diminuir o tempo de análise.

1.3 PROPOSTA

O sistema já existente de análise automática de oscilografias é baseado em módulos de tomada de decisão, onde cada módulo baseia-se em regras usando sistema especialista. O intuito deste trabalho de conclusão de curso é adaptar este sistema, ou seja, adaptar as regras do sistema especialista para utilizar lógica *fuzzy*.

1.4 JUSTIFICATIVA

A crescente utilização de sistemas de informação para supervisão e controle dos sistemas elétricos aumentou a segurança e a confiabilidade dos sistemas de energia elétrica. No entanto, dificuldades encontradas em armazenar, gerenciar e classificar a grande quantidade de dados que são disponibilizados diariamente em uma rede de oscilografia tem sido uma tarefa difícil e trabalhosa.

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, com base nisso e no tempo que engenheiros analistas utilizam para estas análises é que se justifica, analisar e adequar um sistema já existente de modo a utilizar lógica *fuzzy*.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho segue uma sequência de organização, onde primeiramente no capítulo 2 mostra-se o estado da arte do assunto, apresentando alguns estudos relacionados a análise de oscilografias e utilização da lógica *fuzzy*. No capítulo 3 é mostrado o conceito básico do funcionamento dos RDPs e o conceito de oscilografias. Posteriormente, no capítulo 4, verifica-se a principal ferramenta a ser utilizada neste trabalho, a lógica *fuzzy*, mostrando conceitos e exemplos de sua aplicação. Dando sequência no trabalho o capítulo 5 mostra a metodologia, citando a sistemática a ser seguida para a modelagem do sistema, variáveis *fuzzy*, as regras para a tomada de decisão e a defuzzificação. Já no capítulo 6 são apresentados os principais estudos de caso e a classificação do estado de operação do gerador. Para finalizar no capítulo 7 são mostradas as conclusões deste trabalho, relacionando-o com vantagens e objetivos propostos. Esta sequência de organização pretende auxiliar o leitor a um melhor entendimento do que está sendo proposto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte em relação ao problema de análise automática de oscilografias voltadas para geração e também a aplicação da lógica *fuzzy*. Neste contexto, são abordadas as publicações sobre métodos de análise baseados em técnicas usadas na literatura e mostra-se sucintamente o funcionamento do sistema de análise de oscilografias já existente usado como base neste trabalho.

Os conceitos fundamentais à Lógica *Fuzzy* e a mecanismos de inferência *fuzzy* aqui abordados são do tipo inicialmente concebido por Zadeh e outros pesquisadores, entre os quais E.H. Mamdani, que deu início a aplicações de caráter prático na década de 70. Em virtude disso, este tipo de sistema de inferência é muitas vezes referenciado, hoje em dia, como sendo do tipo Mamdani (MAMDANI, 1974).

Após os trabalhos iniciais de Mamdani e associados, surgiram inúmeras outras aplicações de lógica *fuzzy* em controle, inclusive em escala industrial. Uma das mais bem sucedidas vem sendo utilizada até hoje em plantas de produção de cimento, onde controladores *fuzzy* são usados para fornecer sinais de referência para controladores do tipo PID, ou seja, aqueles não atuam diretamente sobre a planta, mas em um nível hierárquico superior. O sucesso desta aplicação deveu-se em muito ao fato de os operadores humanos (especialistas) terem sido capazes de traduzir consistentemente, em termos de regras linguísticas, as atitudes que tomavam no ajuste dos sinais de referência para os controladores PID. (TERANO *et al.*, 1991)

Conforme citado anteriormente, os sistemas de inferência *fuzzy* tiveram suas aplicações iniciais concentradas na área de controle, onde se procurava modelar por meio de regras linguísticas o modo aproximado de raciocínio, tentando imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e imprecisão. Posteriormente, o ramo de aplicações cresceu consideravelmente, principalmente quando os sistemas de inferência *fuzzy* se tornaram também capazes de lidar com o conhecimento objetivo expresso em dados numéricos, por exemplo.

Já no que diz respeito à análise automática de oscilografias voltadas para geração, muitos trabalhos relacionados já foram publicados, sendo que a maioria se aplica para

diagnóstico de faltas ou análise da qualidade de energia em sistemas de transmissão e faz uso de técnicas de inteligência computacional (IC). As mais utilizadas em sistemas de potência são as redes neurais artificiais, os sistemas especialistas, a lógica *fuzzy* e os algoritmos genéticos. Diversas são suas aplicações, especialmente no diagnóstico de faltas em equipamentos (KEZUNOVIC, 2004).

Nos trabalhos descritos na literatura, verifica-se que a principal finalidade dos sistemas de análise automática de oscilografias é realizar tarefas repetitivas que normalmente seriam feitas pelo engenheiro analista. Com a utilização de técnicas de processamento digital de sinais e algoritmos de inteligência computacional estes sistemas podem ser dotados de capacidade de identificar e classificar automaticamente as ocorrências mais comuns em sistemas de energia elétrica (MORETO e ROLIM, 2009). Estes sistemas consistem em ferramentas de auxílio, provendo meios para que o engenheiro especialista analise apenas as ocorrências de maior significância, como, por exemplo, desligamentos forçados e faltas.

O sistema especialista para pré-análise de oscilografias voltado para geração (MORETO e ROLIM, 2007) usado como base neste trabalho, é um sistema baseado em dois módulos principais, extração de características e tomada de decisão. Neste sistema o primeiro módulo a ser executado é o de extração de características, que, extrai características dos sinais do registro de longa duração ou fasorial. Na sequência o módulo de tomada de decisão utiliza os dados de saída obtidos para verificar a causa da ocorrência e se esta é relevante para uma análise por parte do engenheiro analista ou não. Uma melhor descrição deste sistema será apresentada no capítulo 5, que descreve a metodologia do trabalho proposto.

3. REGISTRADORES DIGITAIS DE PERTURBAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Nas usinas e subestações atuais de sistemas elétricos de potência (SEPs) é comum a presença de oscilógrafos para a monitoração de grandezas elétricas como correntes e tensões. Com o avanço da tecnologia digital estes equipamentos tornaram-se menores, mais práticos, mais versáteis e mais baratos do que os antigos oscilógrafos eletromecânicos.

3.2 FUNÇÃO DOS RDPS

Atualmente, os RDPs são uma ferramenta indispensável na análise de ocorrências em um SEP, tanto na geração de energia, quanto na transmissão e distribuição. Existem, inclusive, normas adotadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS) estabelecendo que um dos requisitos mínimos necessários em instalações pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) é o RDP (ONS, 2002).

A principal função dos RDPs é de registrar a operação do sistema elétrico e sua proteção durante eventos importantes, como faltas elétricas, oscilações de frequência, falhas operativas, dentre outros. Para isso, os RDPs são ajustados de forma bastante sensível, para garantir o registro do evento mesmo que este não seja suficiente para provocar a atuação dos sistemas de proteção. Desta forma, caso haja atuação indevida da proteção, o registro do RDP poderá ser utilizado para investigar esta atuação e promover medidas corretivas, como o reajuste dos relés de proteção.

Uma das características mais importantes dos RDPs é sua capacidade de ser acessado e configurado remotamente, através de redes de comunicação, geralmente *intranets*. Assim, podem ser formadas as chamadas redes de oscilografia, conforme será visto na seção 3.3, onde todas as oscilografias de instalações de uma mesma empresa podem ser concentradas em um único local na rede (MORETO e ROLIM, 2009).

3.3 OSCILOGRAFIAS

Oscilografia significa o registro das oscilações de grandezas elétricas do sistema, como tensões e correntes. Em torno da década de 50, a oscilografia era feita por equipamentos eletromecânicos que através de uma agulha móvel registravam as oscilações em um rolo de papel em movimento. A partir dos anos 70, o registro passou a ser feito em papel fotográfico por aparelhos analógicos. Só em meados dos anos 80 surgiram os primeiros oscilógrafos digitais, que foram então chamados de registradores digitais de perturbação (MORETO e ROLIM, 2009).

Os RDPs são equipamentos de aquisição digital de sinais, desenvolvidos especificamente para serem utilizados em instalações de sistemas elétricos de potência. Sua função principal é gravar continuamente em uma memória cíclica o valor amostrado das grandezas monitoradas. Estas podem ser tensões e correntes de fase ou linha, tensões e correntes de neutro e no caso de geradores, tensão e corrente de campo. Além destas grandezas analógicas, os RDPs também armazenam e monitoram grandezas calculadas, como potências.

A mudança de estado de entradas digitais que são ligadas em contatos auxiliares de relés, chaves e disjuntores também é verificada pelo RDP. O conteúdo da memória cíclica é gravado na memória de registros do RDP cada vez que este for disparado, indicando a ocorrência de uma perturbação. O disparo do oscilógrafo, ou *trigger*, pode se dar de diversas maneiras, que são programadas na configuração do equipamento. Os métodos mais comuns de *trigger* são (MARTINEZ *et al.*, 2008) e (MORETO e ROLIM, 2009) :

- *Disparo por limiar*: Ocorre se alguma das tensões ou correntes monitoradas atingir certo limiar pré-programado. Este limiar pode ser tanto superior quanto inferior.
- *Disparo por variação*: acontece quando a diferença entre os valores eficazes calculados em dois períodos consecutivos excede um limiar pré-configurado.
- *Disparo por desequilíbrio*: Este tipo de *trigger* pode ocorrer nos casos em que são medidas grandezas trifásicas. Se estas grandezas apresentarem desequilíbrio entre as fases, haverá o disparo do RDP.
- *Disparo sequencial*: verifica-se quando mais de um RDP está presente em uma mesma instalação. Neste caso, o disparo de um RDP ocasiona o disparo dos demais.
- *Disparo por evento digital*: O disparo do RDP também pode ocorrer em função da mudança de estado de alguma das entradas digitais. Assim, se as entradas digitais

estiverem conectadas a contatos auxiliares de relés de proteção, o RDP pode gerar um registro para cada atuação da proteção.

- *Disparo manual*: Onde o registro das grandezas monitoradas é feito a partir de um comando manual do operador. Este comando pode ser executado local ou remotamente.

Uma vez que o RDP seja disparado de algum modo mencionado anteriormente, é gerado um registro de ocorrência contendo os valores medidos em um intervalo de tempo pré e pós-disparo, esse intervalo de tempo pré e pós ocorre pois o RDP está monitorando constantemente o sistema. Em cada registro, todos os canais monitorados pelo RDP são armazenados. As três formas mais comuns de registro das grandezas medidas são as seguintes (MORETO e ROLIM, 2009):

- *Curta duração*: Os registros de curta duração, também chamados de registros de forma de onda, apresentam um tempo de registro da ordem de segundos (em geral, até 20 segundos). Neste registro os sinais de corrente e tensão são amostrados a uma taxa de aquisição programável elevada, em média de 720 a 11520 amostras por segundo. Um exemplo deste tipo de registro pode ser visto na Figura 1.
- *Longa Duração*: Os registros fasoriais são aqueles que apresentam um tempo de registro da ordem de minutos e armazenam informações de módulo e ângulo da corrente e tensão adquiridas em uma taxa programável que em geral é de uma amostra por ciclo de frequência fundamental. Um exemplo pode ser visto na Figura 2, a qual apresenta um registro cuja duração é de 6 minutos. Estas informações permitem a realização de análises e o cálculo de fluxos de potência, sendo muito importantes para a análise de estabilidade do sistema de potência e para a visualização de oscilações de baixa frequência.
- *Medição contínua*: Um registro de medição contínua é composto dos valores médios de módulo e ângulo calculados em intervalos maiores, em geral, de 1 minuto, a partir dos sinais fasoriais de corrente e tensão medidos. Esses dados são armazenados em uma memória circular que contém as informações sobre os últimos dias.

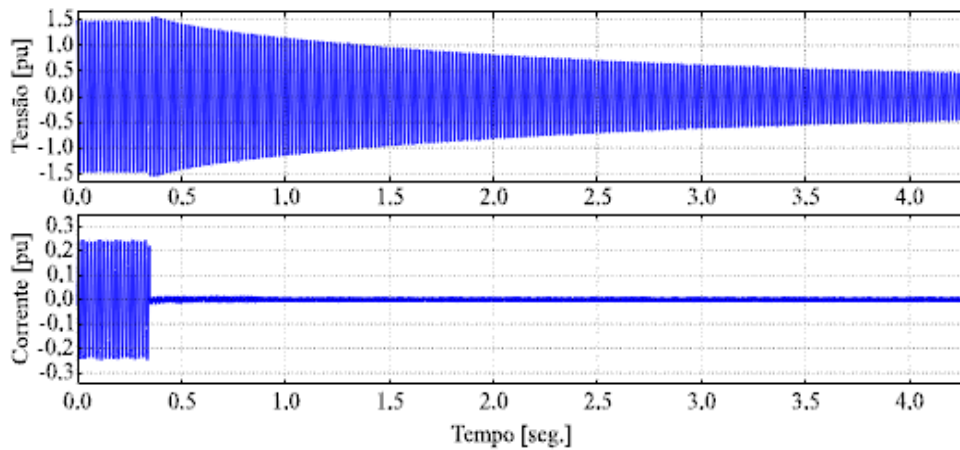


Figura 1 - Exemplo de registro de forma de onda.
Fonte (MORETO e ROLIM, 2009)

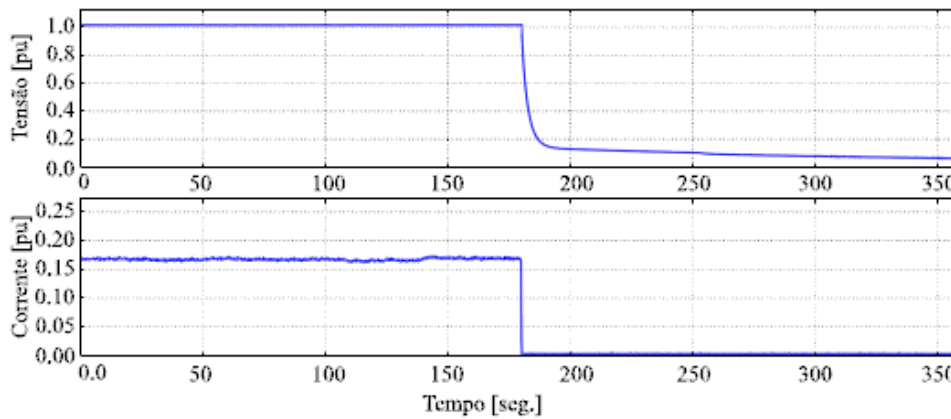


Figura 2 - Registro fasorial, onde o gráfico mostra apenas o módulo dos fasores ao longo do tempo.
Fonte - (MORETO e ROLIM, 2009)

Os RDPs podem ser acessados e configurados remotamente através de redes de computadores formando as chamadas redes de oscilografia. Nestas redes, todos os registros de oscilografia provenientes de diversos oscilógrafos são armazenados em um único servidor, localizados geralmente na sede da empresa (MORETO e ROLIM, 2009). Os analistas então podem acessar remotamente este servidor e verificar as oscilografias. Nesta configuração os analistas podem não ser capazes de verificar todas as oscilografias que diariamente são disponibilizadas no servidor em função da grande quantidade de registros.

4. LÓGICA FUZZY

4.1. INTRODUÇÃO

Seres humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximados. A estratégia adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e geralmente possível de ser expressa em termos linguísticos. A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e os Conceitos de Lógica *Fuzzy* podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma se ... então, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e Lógica *Fuzzy* fornecem o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas.

A lógica *fuzzy* foi estruturada, em 1965, por Lofti A. Zadeh, da Universidade da Califórnia. Sua principal característica é a capacidade de manipular informações imprecisas, vagas, típicas do raciocínio humano, transformando-as em valores numéricos, que podem ser tratados em computadores. O objetivo da lógica nebulosa é construir um sistema com capacidade de tomar decisões baseadas em informações inexatas ou não, com base no raciocínio humano (BARROS, 2009).

A principal finalidade de se aplicar lógica *fuzzy* é fornecer os fundamentos para efetuar o raciocínio aproximado, com proposições imprecisas, usando, como ferramenta principal, a teoria de conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965).

4.2. CONJUNTOS FUZZY

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

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

Zadeh propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* A em um universo X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$, e representado por um conjunto de pares ordenados (ZADEH, 1965):

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad x \in X \quad (2)$$

Onde $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com o conjunto A . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, com diferentes graus de pertinência. Conjuntos *fuzzy* podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo X for discreto e finito, o conjunto *fuzzy* A é normalmente representado:

- por um vetor contendo os graus de pertinência no conjunto A dos elementos correspondentes de X ;
- por meio da seguinte notação:

$$\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (3)$$

Um subconjunto A de um conjunto U é considerado subconjunto *fuzzy* de U se for descrito como um conjunto de pares ordenados segundo o que segue:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in U \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (4)$$

Onde $\mu_A(x)$ é uma função de pertinência que determina com que grau x está em A :

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

Sendo assim, a álgebra entre os conjuntos *fuzzy* não segue a teoria clássica usual, em especial devido ao fato de que as operações de união e de intersecção de um conjunto e seu complementar são diferentes de 1 e vazio respectivamente, e portanto operações específicas entre os conjuntos *fuzzy* devem ser estabelecidas. (SILER e BUCKLEY, 2005), (TURKSEN, 1984)

Outro conceito essencial é o reconhecimento desta caracterização de variáveis que consiste uma base de regras entre as mesmas. Isto se estabelece a partir do conhecimento do especialista na forma de proposições do tipo “se E1 e/ou E2 então S1”, onde E1 e E2 referem-se a classificações linguísticas das variáveis de entrada e S1 a de saída, as quais, a partir do uso dessa teoria, se mostram como consequência das operações “e/ou” algébricas acima referidas, onde “e” designa união e “ou” intersecção. (SILER e BUCKLEY, 2005), (SILVA, 2005).

4.3 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a *temperatura* de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores *baixa*, *média*, e *alta*. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 3.

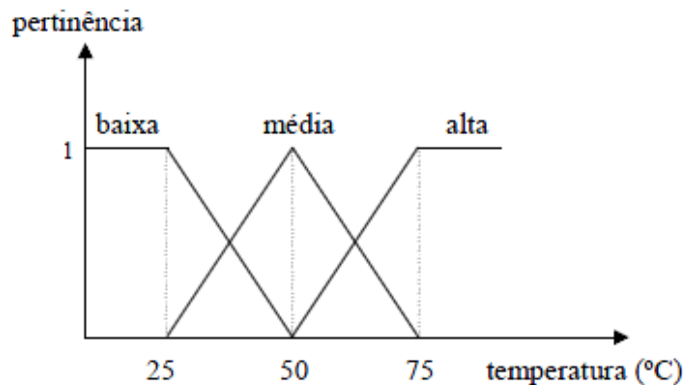


Figura 3 - Funções de pertinência para a variável temperatura.
Fonte: (BARROS, 2009)

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

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definida. Em essência, a

utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais. (BARROS, 2009)

4.4 FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinências podem assumir diferentes formas associadas com cada entrada e resposta de saída. É comum o uso das triangulares, sendo que as outras como trapezoidais gaussianas e exponenciais são utilizadas dependendo da preferência e experiência do projetista.

Na Figura 4 é apresentado uma função triangular. Através dela, pode ser observado que a altura ou magnitude é normalizada entre os valores 0 e 1.

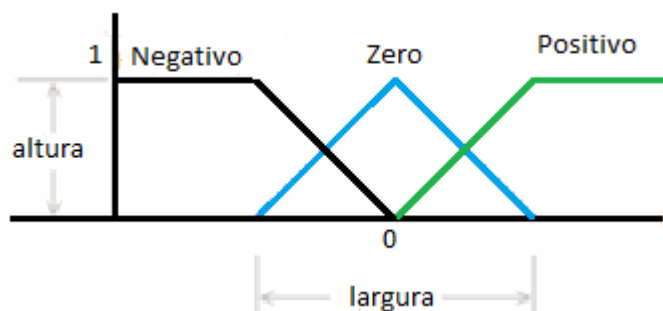


Figura 4 - Função de pertinência triangular.
Fonte - (JANÉ, 2004)

O grau de pertinência é determinado pela projeção vertical do parâmetro de entrada do eixo horizontal no limite mais alto da função de pertinência, o qual possui valores compreendidos entre 0 e 1 (JANÉ, 2004).

Para exemplificar o quanto o contexto é relevante na definição de funções de pertinência, considera-se a variável linguística “estatura” (de pessoas), constituída dos seguintes termos: $T(\text{estatura}) = \{\text{baixa, média, alta}\}$. A esses faz-se corresponder conjuntos *fuzzy* A, B e C, respectivamente, definidos por suas funções de pertinência. Uma escolha possível de funções de pertinência seria:

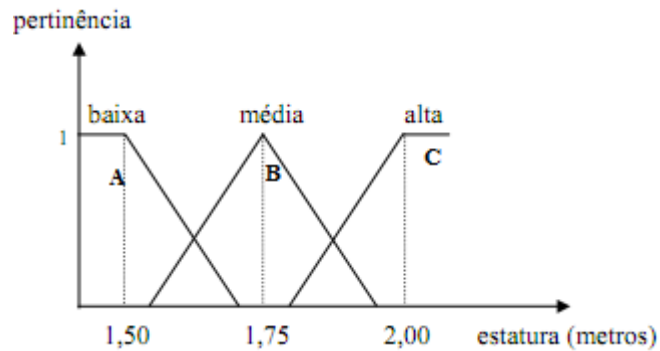


Figura 5 - Funções de pertinência para a variável estatura
Fonte : Autor.

Na definição acima, estaturas de até 1,5 metros apresentam grau de pertinência igual a 1 no conjunto A; o grau de pertinência neste conjunto decresce à medida que a estatura aumenta. Considera-se que uma estatura de 1,75 metros é "totalmente compatível" com o conjunto B, ao passo que estaturas acima de 1,8 metros (aproximadamente) apresentam grau de pertinência diferente de zero em C. Pessoas com estatura acima de 2 metros são "definitivamente" altas. Nota-se que, nesta definição das funções de pertinência, estaturas em um entorno de 1,75 metros têm grau de pertinência diferente de zero somente no conjunto B, o que poderia parecer inadequado para alguns observadores. Estes prefeririam que as funções de pertinência de A e B se interceptassem em 1,75 metros (ZADEH, 1965).

Além disso, diferentes pessoas, ou grupos de pessoas, podem ter noções distintas a respeito das estaturas de seus semelhantes. Um escandinavo provavelmente utilizaria funções de pertinência diferentes daquelas escolhidas por um representante de uma tribo de pigmeus, ou as distribuiria de outra forma ao longo do universo. Ou seja, o contexto é particularmente relevante quando da definição de funções de pertinência. Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal e Gaussiana. Em aplicações práticas as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados (BARROS, 2009).

Verifica-se, portanto que um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência que assume valores dentro do intervalo $[0,1]$. Enquanto na teoria de conjuntos clássica, a função de pertinência assume apenas os valores *zero* indicando que o elemento não pertence ao conjunto, ou *um* indicando que o elemento pertence ao conjunto, na teoria de conjuntos *fuzzy*, os elementos podem estar associados a graus de pertinência entre *zero* e *um* indicando que os mesmos podem pertencer parcialmente a um conjunto.

A princípio, qualquer função que associe valores entre zero e um a elementos de um dado conjunto, pode ser tomada como função de pertinência. Entretanto, na escolha de tais funções, deve-se levar em conta o contexto em que estas serão utilizadas na representação das variáveis linguísticas. Neste sentido, tanto o número quanto o formato das funções de pertinência devem ser escolhidos de acordo com o conhecimento sobre o processo que se quer estudar. (BRAGA,1995)

Uma vez selecionados o número e formato, deve-se determinar, para cada uma das funções de pertinência, os valores associados à máxima pertinência, onde a função de pertinência é igual a um, e os valores associados à mínima pertinência, onde o valor da função de pertinência é igual a zero. Os formatos mais comumente utilizados para funções de pertinência são os triangulares e os trapezoidais, mas existem outras, como funções gaussianas, funções sigmóides, funções polinomiais.

4.4.1 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TRIANGULARES

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma terna (a, b, c) , onde a e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função de pertinência é máxima. A Figura 6 exibe uma função de pertinência triangular onde são destacados a , b e c . Nessa Figura encontram-se no eixo vertical os valores da função de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável que se quer estudar.

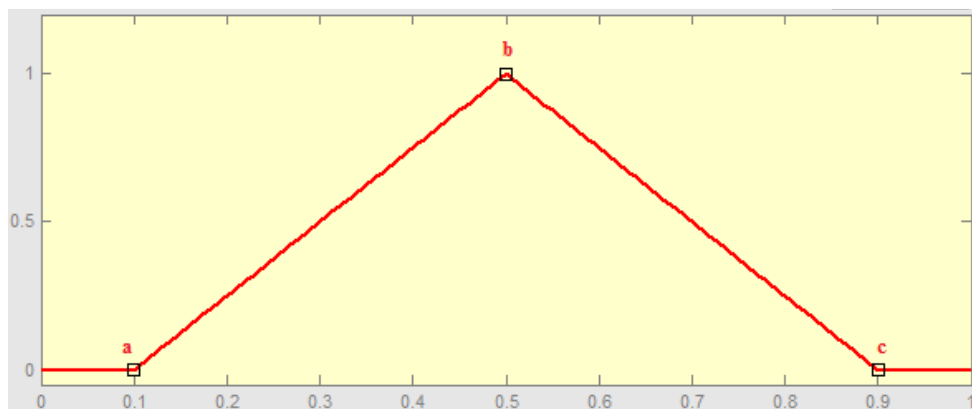


Figura 6- Função de pertinência triangular.

Na utilização de um software simulação matemática, o que o *toolbox* executa é a seguinte função:

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (5)$$

4.4.2 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TRAPEZOIDAL

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de a , b , c e d , onde a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1. A Figura 7 exhibe uma função de pertinência trapezoidal onde podem ser destacados os pontos a , b , c e d . Nesta Figura encontram-se no eixo vertical os valores da função de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável que se quer estudar.

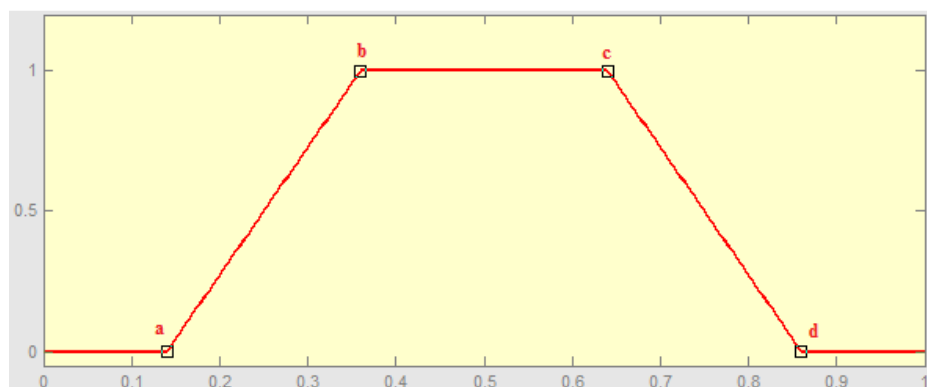


Figura 7 - Função de pertinência trapezoidal.

Da mesma forma que as triangulares, o que o *toolbox* executa é a seguinte função:

$$\mu_A = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ se } x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} \text{ se } a < x \leq b \\ 1 \text{ se } b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c} \text{ se } c < x \leq d \\ 0 \text{ se } x > d \end{array} \right. \quad (6)$$

Os conjuntos *fuzzy* em formas trapezoidais ou triangulares são convencionalmente utilizados em modelos de engenharia. A forma trapezoidal é utilizada para mapear funções de pertinência nos domínios extremos. Enquanto a forma triangular atua nas regiões intermediárias destes mesmos domínios. Não existe uma topologia rígida para as formas dos conjuntos *fuzzy*.

4.5 SISTEMA FUZZY

O sistema *fuzzy* tem como objetivo modelar o raciocínio aproximado, permitindo o desenvolvimento de sistemas que emulam a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incertezas e imprecisão. Deste modo, a lógica *fuzzy* é uma ferramenta capaz de capturar informações imprecisas, em linguagem natural, e convertê-la em uma forma numérica (SILER e BUCKLEY, 2005), (SILVA, 2005).

Um Sistema de Inferência *Fuzzy* é mostrado na figura abaixo, onde estão identificadas as funções de cada bloco.

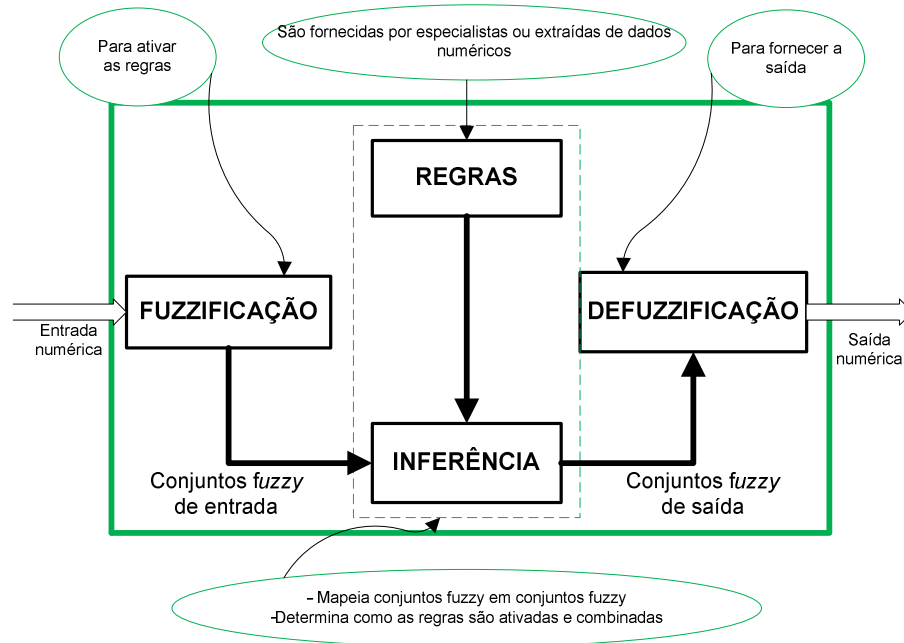


Figura 6 - Sistema de Inferência Fuzzy.
Fonte: Autor.

Nesse sistema de inferência *fuzzy*, consideram-se entradas não-*fuzzy*, ou precisas resultantes de medições ou observações. Em virtude disto, é necessário efetuar-se um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de fuzzificação, nesse estágio é feita a modelagem matemática da informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos *fuzzy*. É nesse módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável e, cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência. Neste estágio ocorre também a ativação das regras que constitui o núcleo do sistema, regras essas que são responsáveis pela classificação das variáveis linguísticas, relevantes para uma dada situação.

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência, que define quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras, ou seja, é desse processo que depende o sucesso do sistema *fuzzy* já que ele fornecerá a saída *fuzzy* a ser obtido pelo sistema a partir das entradas.

Já no estágio de defuzzificação é efetuada uma interpretação dessa informação, que traduz o estado da variável de saída *fuzzy* para um valor numérico. Isto se faz necessário, pois em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. No caso de um sistema de controle, por exemplo, em que o controle é efetuado por um sistema de inferência *fuzzy*, este deve fornecer à planta dados ou sinais precisos, já que a "apresentação" de um conjunto *fuzzy*

à entrada da planta não teria significado algum. Existem vários métodos de defuzzificação na literatura, dois dos mais empregados são o centro de gravidade e a média dos máximos. Nesse último, a saída precisa é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do consequente. Com o centro de gravidade, a saída é o valor no universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais, este método a ser utilizado nesse trabalho será visto com maiores detalhes na seção 4.5.1 (CAMPOS e SAITO, 2004) e (SILVA, 2005).

As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*.

Novamente tomando o exemplo de um controlador *fuzzy*, este só terá um bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle forem consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo *se ... então*, pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que eles sejam do problema em questão. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos (CAMPOS e SAITO, 2004).

Um aspecto importante é a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada e à(s) de saída, pois o desempenho do sistema de inferência dependerá do número de conjuntos e de sua forma. Pode-se efetuar uma sintonia "manual" das funções de pertinência dos conjuntos, mas também podem ser empregados métodos automáticos. Os processos de inferência e defuzzificação serão descritos em maiores detalhes a seguir.

4.5.1 INFERÊNCIA (MÉTODO DE MANDANI) E DEFUZZIFICAÇÃO (CDA)

Em geral, um sistema *fuzzy* faz corresponder a cada entrada *fuzzy* uma saída *fuzzy*.

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

Como a maioria das aplicações de interesse possui sistemas convencionais de aquisição e atuação baseados em grandezas numéricas, o modelo de Mamdani inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos *fuzzy* equivalentes e,

posteriormente, as variáveis *fuzzy* geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes (OLIVEIRA, 2003).

Na Figura 7 é mostrado um diagrama típico de um sistema *fuzzy* que utiliza o método de inferência de Mamdani.

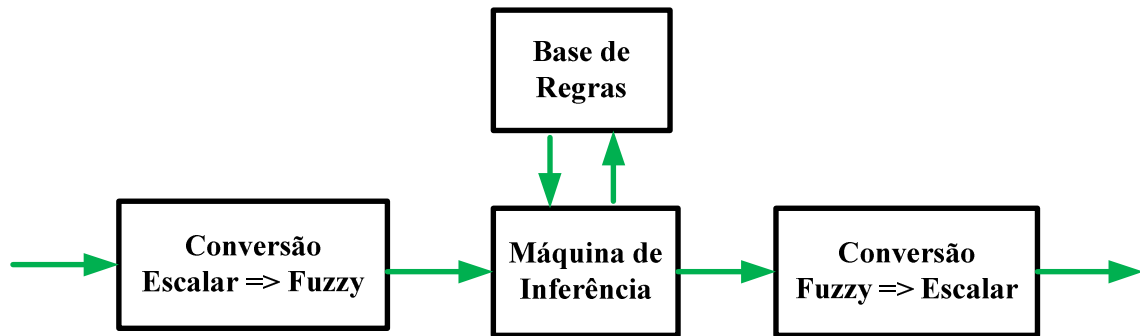


Figura 7 – Diagrama exemplificando o método de Mamdani.
 Fonte: OLIVEIRA (2003)

Neste método de Mamdani o módulo de Conversão Escalar \rightarrow *Fuzzy* engloba os módulos fuzzificação e Grau de Pertinência, a Máquina de Inferência assume o lugar da avaliação das regras e, o módulo de Conversão *Fuzzy* \rightarrow Escalar faz correspondência com a Defuzzificação.

A máquina de inferência é a responsável pela combinação dos dados de entrada, já no formato *fuzzy*, com as regras difusas existentes, as quais, trabalhando em cima de regras de inseridas, descrevem o processo de tal forma que se obtenha, por meio de inferência, o valor de saída desejado.

Esse modelo agrega as regras por meio do operador lógico OU, modelado pelo operador máximo e, em cada regra, os operadores lógicos E e ENTÃO são modelados pelo operador mínimo.

Uma regra típica desse modelo é: *se* x é C_1 e y é C_2 (onde C_1 e C_2 são conjuntos *Fuzzy*), então z é C_3 (onde C_3 é um conjunto *Fuzzy*) (OLIVEIRA, 2003).

O Método de inferência de Mamdani fornece uma saída para o sistema que é também um conjunto *Fuzzy*. Mas, muitas vezes deseja-se obter um resultado clássico a partir da saída *fuzzy* obtida, o que pode ser feito através dos métodos de defuzzificação.

No entanto, um outro sistema de inferência que se tornou extremamente bem sucedido foi concebido por H. Takagi e M. Sugeno, o qual difere do de Mamdani na parte do consequente, é uma função linear das variáveis dos antecedentes: *se* x é C_1 e y é C_2 então $z=f(x,y)$. A função f é, em geral, um polinômio e o sistema de inferência é geralmente referenciado em função do grau deste polinômio (TAKAGI e SUGENO, 1985).

Após a inferência do sistema *fuzzy*, é necessária a determinação de uma ação que melhor represente a decisão *fuzzy*, para ser efetivamente enviada ao sistema. Apesar de não haver nenhum procedimento sistemático para a escolha da estratégia de defuzzificação, as mais comuns incluem: o critério do máximo (MAX), que escolhe o ponto onde a função inferida tem seu máximo, a média dos máximos (MDM), que representa o valor médio dentre todos os pontos de máximo quando existe mais de um máximo, e o método do centro de área (gravidade) (CDA), que retoma o centro de área da função inferida.

O processo mais utilizado é o CDA, frequentemente chamado de centro de gravidade, no qual é calculado o centróide da área que é composta pelo resultado das operações entre os conjuntos *fuzzy*. Esse método tem como característica, nunca atingir as extremidades, justamente por considerar o centro da área a saída, como mostra a Figura 7.1.

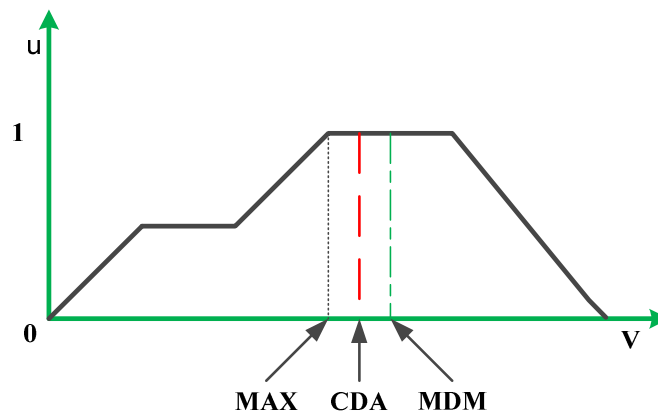


Figura 8.1 - Métodos de Defuzzificação.
Fonte: Autor

A equação para realizar o processo de defuzzificação utilizando o método do centro da área (gravidade) é apresentada na equação (7), ela consiste em realizar o somatório da variável multiplicada pelo grau de pertinência da variável, dividido pelo somatório do grau de pertinência. Como resultado dessa operação matemática, obtém-se o valor preciso de saída,

$$U_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \cdot \mu_u(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_u(u_i)} \quad (7)$$

É importante ressaltar que existem diferentes métodos de inferência *fuzzy* com diferentes propriedades. O *FLT do MATLAB* oferece duas opções: o Método de Mamdani e o Método de Sugeno. Analogamente, existem diversos métodos de defuzzificação. Devido à simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana, todo o conteúdo deste trabalho foi preparado utilizando-se os seguintes métodos disponibilizados por

este *toolbox*: o Método de Mamdani, na etapa de inferência, e o Método do centro de gravidade (centroid), na etapa de defuzzificação.

4.5. CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentada a principal ferramenta utilizada nesse trabalho, como base para a adaptação do sistema de análise automática de oscilografias: a Lógica *Fuzzy*. Trata-se de um fundamento empregado em sistemas imprecisos, apresentando resultados de grande exatidão, graças ao uso de seus conjuntos nebulosos, aliados às funções de pertinência (CAMPOS e SAITO, 2004), (BRAGA, 2005).

Apresentou-se o sistema *fuzzy* de uma forma geral sendo que no capítulo seguinte o mesmo será aplicado ao problema considerado como estudo neste trabalho.

Também existem outras variedades de tipos de funções de pertinência, inferência e defuzzificação, mas nesse capítulo só os mais comuns foram apresentados.

Os recursos da lógica *fuzzy* a serem usados na adaptação do sistema de análise de oscilografias são constituídos por um conjunto de regras, um nebulizador (fuzzificação) e por um dispositivo de inferência disponível na ferramenta computacional (MATLAB).

5. METODOLOGIA

Verifica-se que o motivo para desenvolver sistemas computacionais de análise automática de oscilografias é devido à complexidade e quantidade de dados gerados durante uma ocorrência. Nesse sentido, a metodologia proposta para análise automática de oscilografias é baseada no sistema proposto por (MORETO e ROLIM, 2007). Nesse trabalho de conclusão de curso parte desse sistema é adaptado para análise utilizando conjuntos de regras baseadas em lógica *fuzzy*. Na Figura 9 mostra-se um diagrama de blocos representando o sistema em questão.

Esse sistema proposto pode ser dividido em três partes, coleta de oscilografias, um módulo de extração de características e um módulo de tomada de decisão que será desenvolvido nesse trabalho utilizando lógica *fuzzy*.

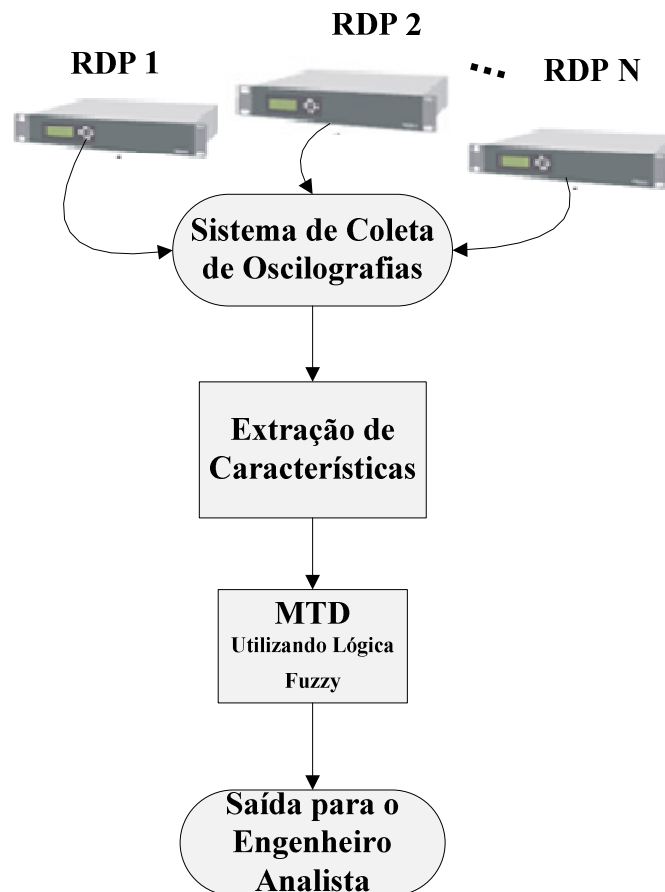


Figura 9 - Diagrama de blocos do esquema proposto.
Fonte : Adaptada (MORETO e ROLIM, 2007)

A função de cada módulo é apresentada a seguir:

- Módulo de Extração de Características (EC): esse módulo processa e extrai as características de sinais a partir do módulo do registro fasorial.
- Módulo de Tomada de Decisões (MTD): Utiliza os dados de saída do módulo anterior para tomada de decisões devido à causa de ocorrência, utilizando-se de regras baseadas em lógica *fuzzy* para verificação se esta é importante para análise do engenheiro analista ou não.

Como verificado no diagrama de blocos da Figura 9, o módulo de tomada de decisão depende da EC, portanto a extração de características de sinais de registro fasorial busca dar subsídios ao MTD. Essa extração de características consiste basicamente na detecção de variações significativas das grandezas monitoradas. A taxa de variação nas grandezas vai depender do tipo de transitório a ser detectado que pode ser lento ou rápido dependendo de sua natureza. Para a detecção de tais variações utiliza-se um índice de detecção proposto por (MORETO e ROLIM, 2007).

Após a detecção dos instantes inicial e final dos transitórios são calculados os valores médios nos segmentos inicial e final do registro, para cada grandeza analisada. Um exemplo com estes intervalos pode ser visualizado na Figura 9.

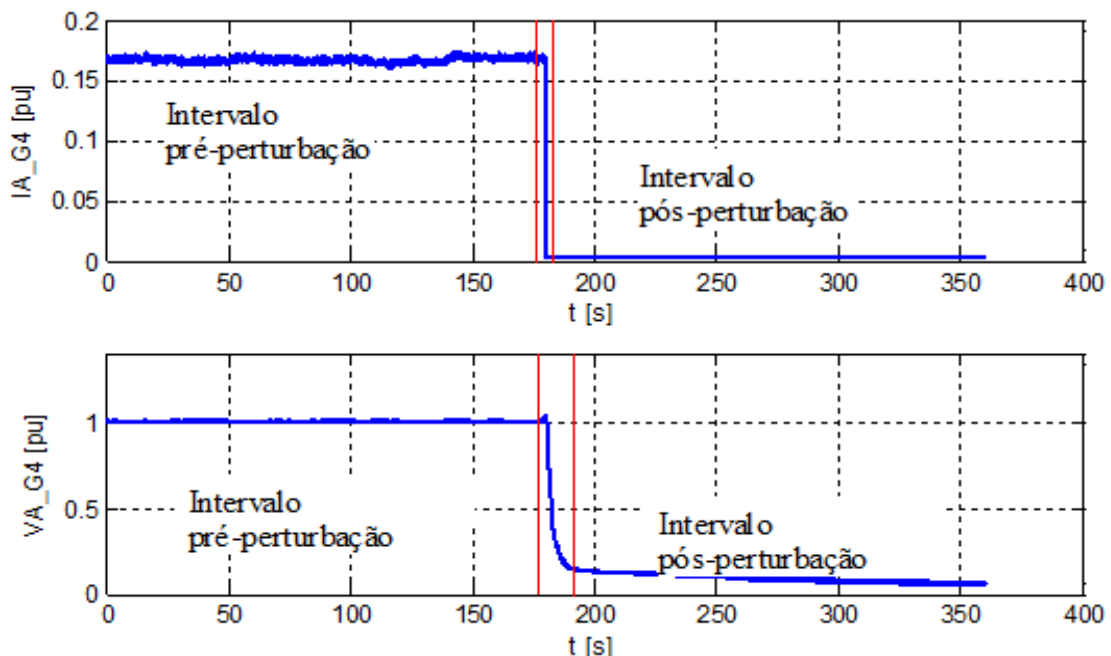


Figura 10 - Registro de transitório mostrando os intervalos pré-perturbação e pós-perturbação.
Fonte : (MORETO e ROLIM, 2007).

O MTD é constituído de um sistema especialista (SE) que neste trabalho será adaptado usando lógica nebulosa. De modo a esclarecer o funcionamento da metodologia, são descritas, algumas regras utilizadas no MTD para a classificação dos eventos (MORETO e ROLIM, 2007).

- Energização: Se a tensão terminal antes do transitório é nula e a tensão terminal depois do mesmo é nominal (1pu), então a unidade se encontra em processo de energização.
- Desenergização: Se a tensão terminal antes do transitório é nominal, a tensão terminal depois do transitório é nula e a corrente de carga antes do evento é baixa ou nula, então a unidade se encontra em processo de desenergização. Um exemplo poder visto na Figura 10.

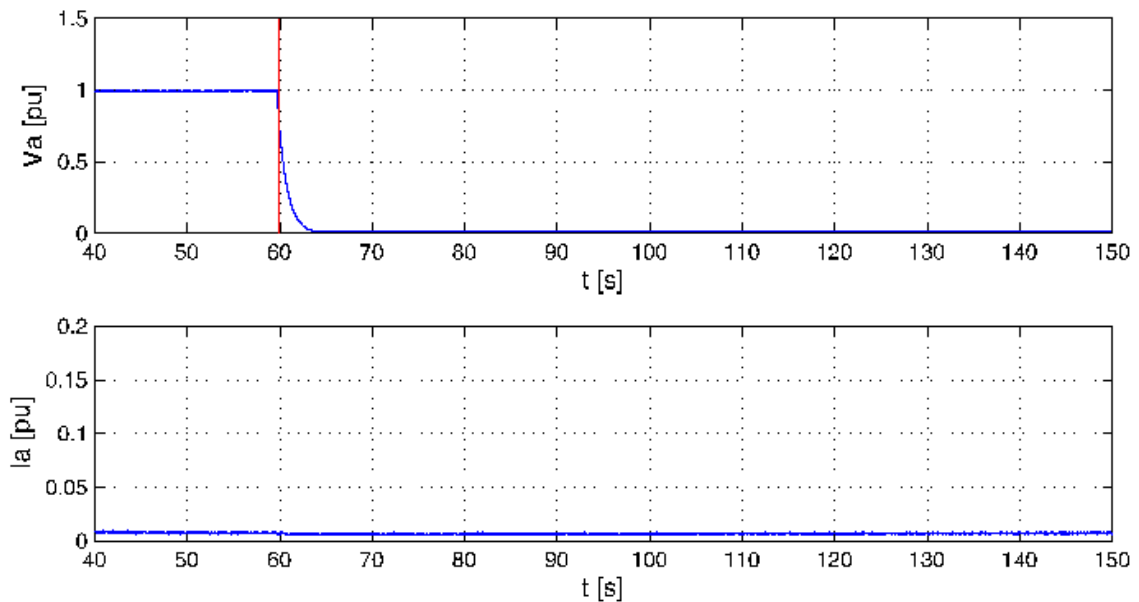


Figura 11 - Registro Fasorial de Desenergização.

Fonte : (MORETO e ROLIM, 2007)

- Corte de carga: Se a tensão terminal se manteve nominal e há um decréscimo significativo na corrente, então houve um corte de carga.
- Desligamento forçado: Se a tensão terminal passou de nominal para nula, a corrente era não-nula passou para nula, então houve um desligamento forçado.

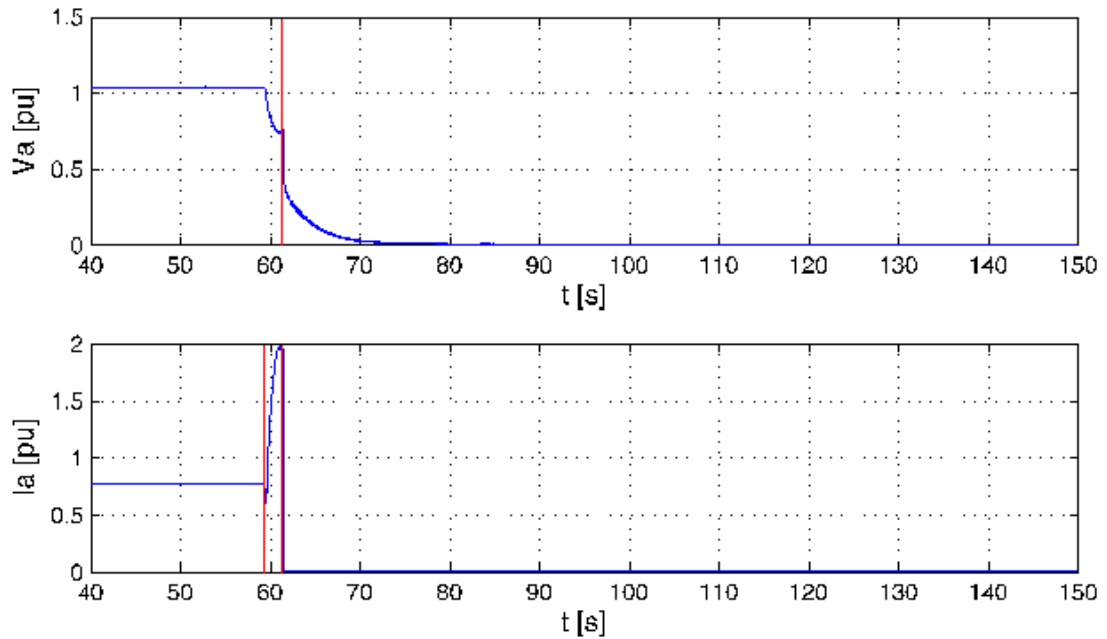


Figura 12 - Registro Fasorial de Desligamento Forçado.
 Fonte : (MORETO e ROLIM, 2007)

- Operação normal: Se não há transitório detectado, a tensão terminal se manteve nominal e a corrente de carga se manteve constante, então o gerador está operando normalmente.
- Fora de serviço: Se não há transitório detectado, a tensão terminal e a corrente de carga são nulas, então o gerador encontra-se fora de serviço.

Portanto primeiramente são calculadas as características de operação (valores médios de corrente e tensão de sequência positiva) do gerador durante o registro através da aplicação do EC. Estes dados são posteriormente analisados pelo *fuzzy* desenvolvido, o qual faz uso dos dados de saída do EC, preenchendo sua base de fatos. A classificação destes fatos é realizada através de regras definidas para casos como energização, corte de carga, desligamento forçado, etc definidas no sistema proposto por (MORETO e ROLIM, 2007). Considerando essas regras o MTD executa o mecanismo de inferência *Fuzzy*, como mostra a Figura 12.

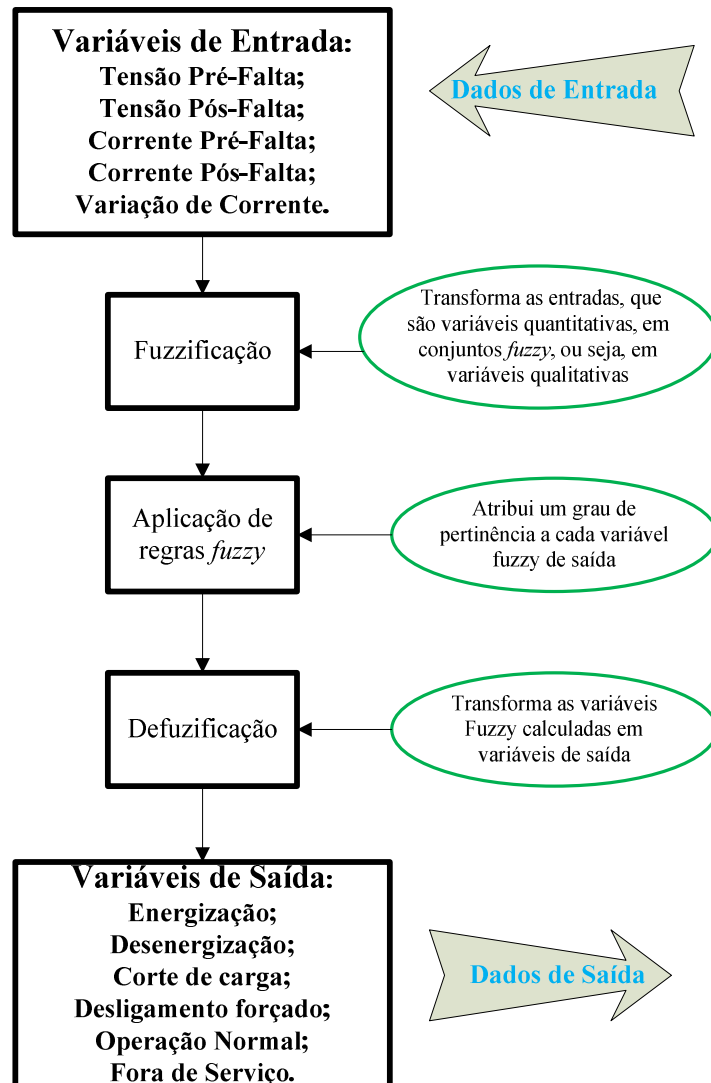


Figura 13 - Sistema *fuzzy* proposto.
Fonte : Autor.

Pode-se analisar que os dados iniciais são executados pela fuzzificação que corresponde à transformação dos dados numéricos de entrada em suas respectivas variáveis linguísticas. Nesta etapa, todas as informações relativas à imprecisão ou incerteza associada a estas variáveis devem ser consideradas. Com as variáveis linguísticas é executada a inferência *fuzzy*, a partir de um conjunto de regras já definidas, com isso tem-se os resultados linguísticos.

5.1 MODELAGEM DO SISTEMA FUZZY

O desenvolvimento do sistema foi baseado em simulações (implementações) realizadas no MATLAB, o qual possui várias ferramentas computacionais, entre as quais

algumas para simulação de sistemas com lógica *fuzzy*. A escolha pelo referido *software* se deve a uma ferramenta chamada *Fuzzy Logical Toolbox (FLT)*, que contém tudo que é necessário para projeto, implementação e simulação do sistema aqui proposto, sendo de fácil aprendizado e com documentação completa.

Seguindo a sistemática proposta para o desenvolvimento de um sistema *fuzzy*, a primeira etapa a ser realizada é a conversão das variáveis de entrada e saída em uma representação de conjuntos *fuzzy* (fuzzificação).

Inúmeros são os tipos de funções de pertinência que podem ser utilizadas, mas neste trabalho optou-se por uma combinação das funções triangular e trapezoidal devido a sua facilidade de geração por estarem disponíveis na maioria das ferramentas computacionais.

A segunda etapa estabelece as regras que relacionarão as variáveis de entrada e saída. Essas regras são obtidas do conhecimento e da experiência humana e forma a base de regras do sistema *fuzzy*.

A terceira etapa é denominada defuzzificação e efetua a conversão dos conjuntos *fuzzy* em um número que representa o estado da saída do sistema para uma determinada condição.

Desta forma, após as pesquisas, estudos e simulações, além de levar em consideração o estado da arte dos sistemas que utilizam teoria *fuzzy* para controle, chega-se ao sistema como ilustrado da Figura 13, a qual mostra a tela de configuração, edição e inserção de dados do *FLT* do MATLAB.

Também nessa tela são apresentadas as variáveis de entrada, base de regras (mandani) e as variáveis de saída.

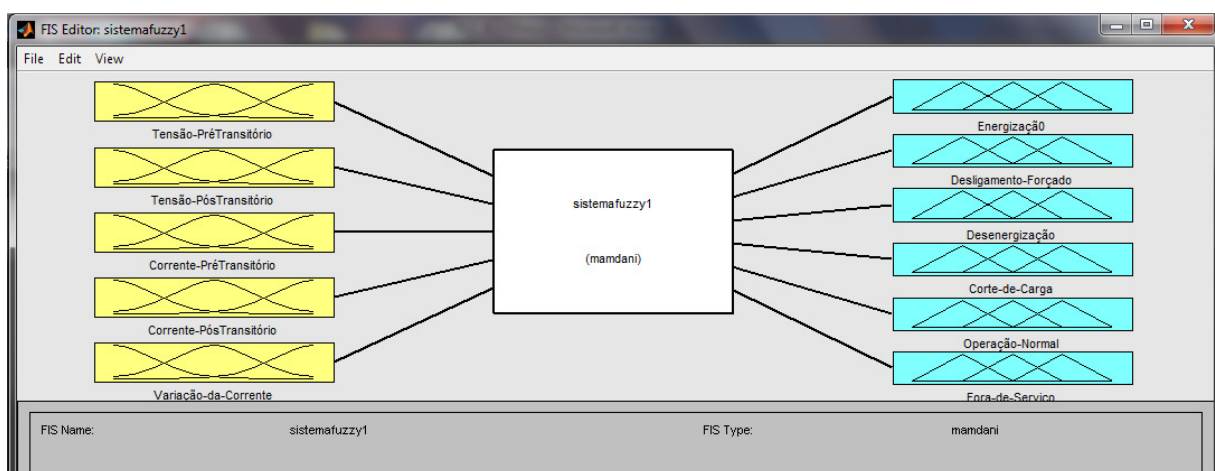


Figura 14 - Tela inicial e de configuração básica do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB.

O sistema proposto, de acordo com a Figura 13, possui 5 entradas, 6 saídas e 7 regras que determinam o estado operativo do gerador, sendo essas as regras básicas, no entanto novas regras podem ser adicionadas.

5.1.1 VARIÁVEIS E CONJUNTOS *FUZZY*

O sistema proposto por (MORETO e ROLIM, 2007) utiliza como dados de entrada as seguintes variáveis que serão “fuzzificadas” (variáveis de entrada):

- Para a Tensão Pré-Transitório, será considerada a tensão por unidade (P.U);
- Para a Tensão Pós-Transitório, será considerada a tensão por unidade (P.U);
- Para a Corrente Pré-Transitório, será considerada a corrente por unidade (P.U);
- Para a Corrente Pós-Transitório, será considerada a corrente por unidade (P.U);
- Para a Variação de Corrente (calculada como sendo a subtração da Corrente Pós-Transitório da Corrente Pré-Transitório), será considerada a corrente por unidade (P.U).

Com essas variáveis, o sistema *fuzzy* proposto interpretará, de acordo com as regras a serem descritas, qual é o estado operativo do gerador.

Para a obtenção dos conjuntos *fuzzy* que representam as variáveis de entrada, Tensão Pré-Transitório, Tensão Pós-Transitório, Corrente Pré-Transitório, Corrente Pós-Transitório e Variação de Corrente as variáveis de saída, Energização, Desligamento forçado, Desenergização, Operação Normal, Corte de Carga e Fora de Serviço é necessário, inicialmente, definir os limites inferior e superior destas variáveis, bem como a amplitude dos intervalos de variação destas grandezas. Nas Tabelas 1 e 2 são mostrados estes limites, onde pode ser verificado os distintos valores de a , b , c e d os quais descrevem os pontos das funções de pertinência triangulares e trapezoidais. Estes são obtidos em função do conhecimento prévio do comportamento das grandezas e estes limites também foram baseados nos limiares utilizados nas regras do sistema proposto por (MORETO e ROLIM, 2009).

Tabela 1. Resumo dos limites das funções de pertinência para as variáveis de entrada.

Variáveis de Entrada	Funções de Pertinência (FP)	Valores dos limites das FPs			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Tensão Pré-Falta	Tensão Nula	0	0	0.05	0.25
	Tensão Média	0.1	0.3	0.7	0.9
	Tensão Nominal	0.75	0.95	1	1
Tensão Pós-Falta	Tensão Nula	0	0	0.05	0.25
	Tensão Média	0.1	0.3	0.7	0.9
	Tensão Nominal	0.75	0.95	1	1
Corrente Pré-Falta	Corrente Nula	0	0	0.05	0.1
	Corrente Nominal	0.05	0.1	1	1
Corrente Pós-Falta	Corrente Nula	0	0	0.05	0.1
	Corrente Nominal	0.05	0.1	1	1
Variação da Corrente	Baixa	-1	-1	-0,8	-0,4
	Média	-0,7	-0,3	0,3	0,7
	Alta	0,4	0,8	1	1

Tabela 2. Resumos dos limites das funções de pertinência para as variáveis de saída.

Variáveis de Saída	Funções de Pertinência (FP)	Valores dos limites das FPs			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Energização	Improvável	0	0	0.1	0.3
	Provável	0.2	0.5	0.8	
	Muito Provável	0.7	0.9	1	1
Desligamento Forçado	Improvável	0	0	0.1	0.3
	Provável	0.2	0.5	0.8	
	Muito Provável	0.7	0.9	1	1
Desenergização	Improvável	0	0	0.1	0.3
	Provável	0.2	0.5	0.8	
	Muito Provável	0.7	0.9	1	1
Corte de Carga	Improvável	0	0	0.1	0.3
	Provável	0.2	0.5	0.8	
	Muito Provável	0.7	0.9	1	1
Operação Normal	Improvável	0	0	0.1	0.3
	Provável	0.2	0.5	0.8	
	Muito Provável	0.7	0.9	1	1
Fora de Serviço	Improvável	0	0	0.1	0.3
	Provável	0.2	0.5	0.8	
	Muito Provável	0.7	0.9	1	1

Inserindo os dados dos conjuntos *fuzzy* no MATLAB, através do *FLT*, têm-se as funções de pertinência *fuzzy* com seus respectivos rótulos linguísticos e suas extremidades determinando os limites de atuação de cada uma das funções de pertinência.

Nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18 estão ilustradas as funções de pertinência associadas às variáveis de entrada Tensão Pós-Transitório, Tensão Pré-Transitório, Corrente Pós-Transitório, Corrente Pré-Transitório e Variação de Corrente, respectivamente, do sistema proposto.

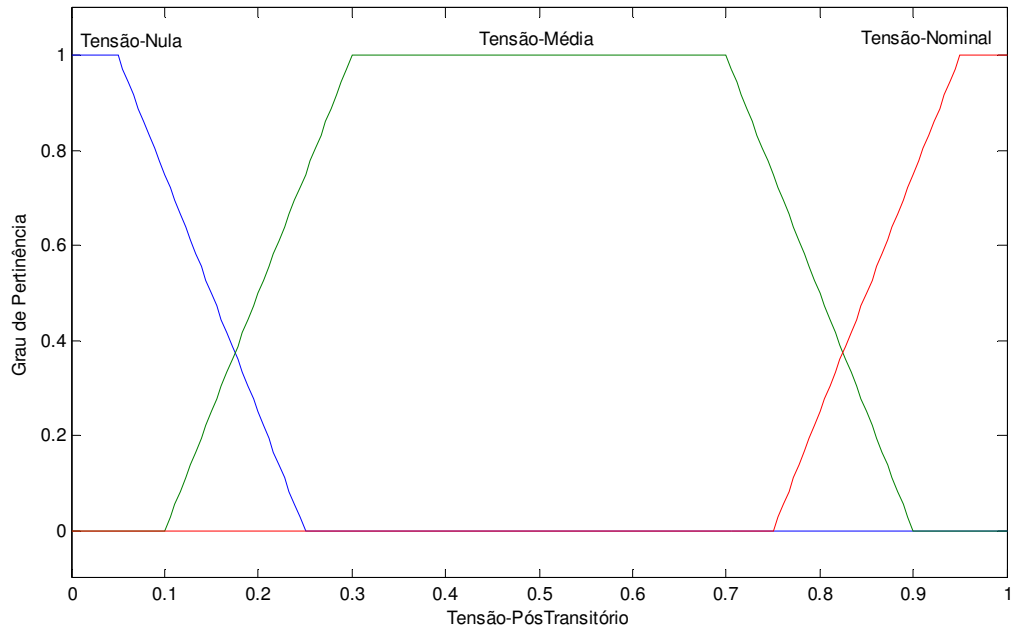


Figura 15 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Tensão Pós-Transitório”.

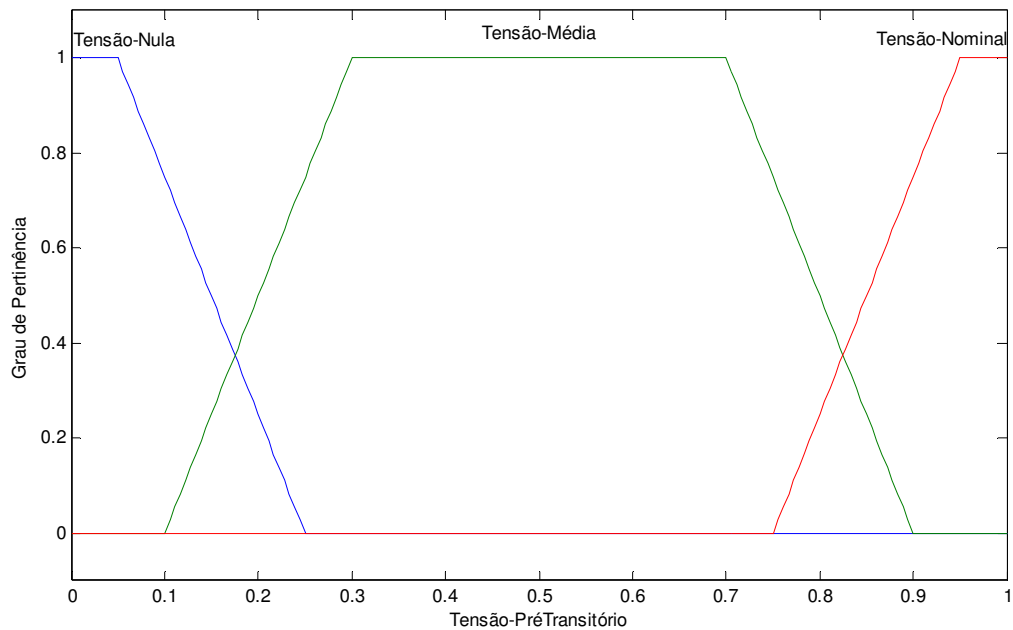


Figura 16 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Tensão Pré-Transitório”.

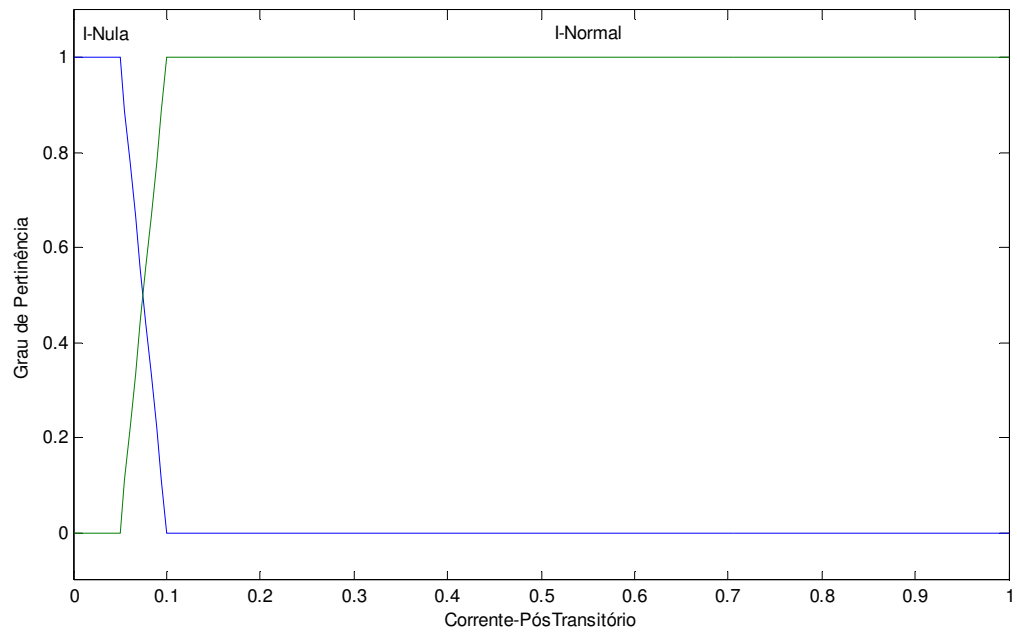


Figura 17 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada "Corrente Pós-Transitório".

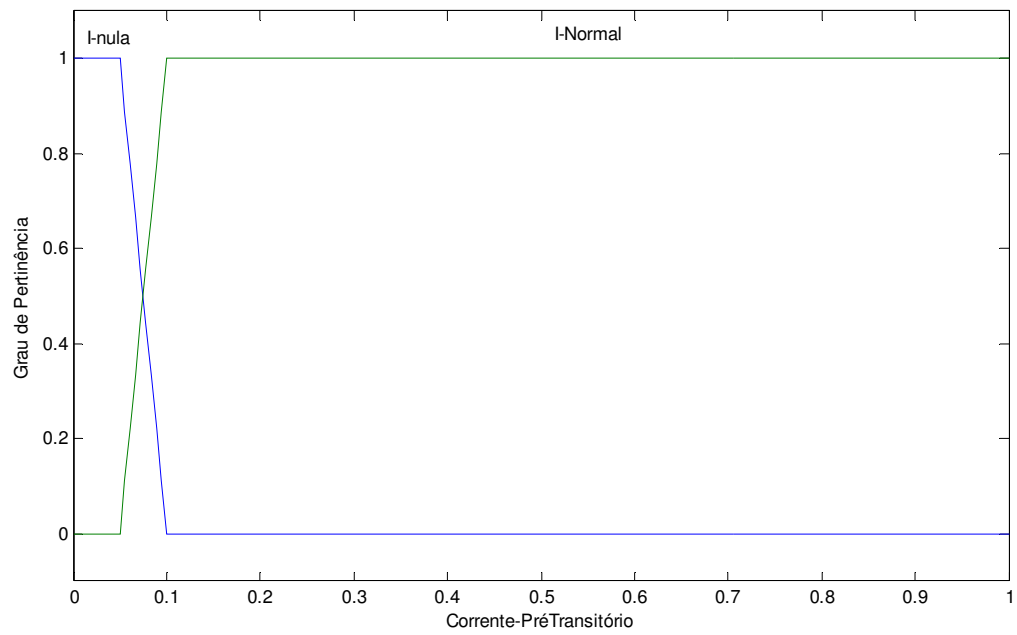


Figura 18 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada "Corrente Pré-Transitório".

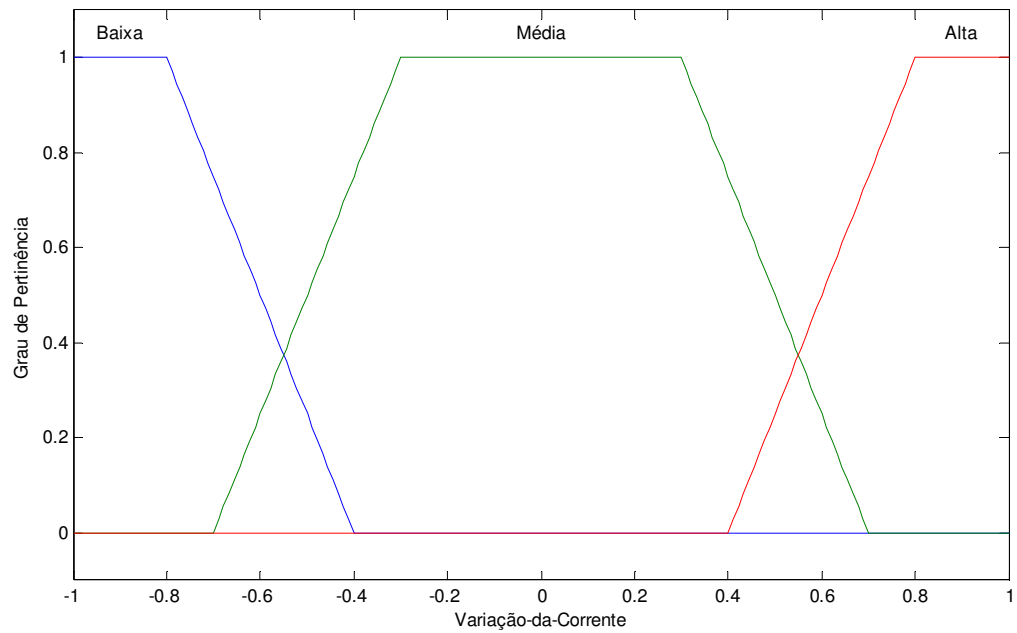


Figura 19 - Funções de pertinência associadas a variável de entrada “Variação de Corrente”.

Nas Figuras 19, 20, 21, 22, 23 e 24 têm-se as funções de pertinência relativas às variáveis de saída Energização, Desligamento Forçado, Desenergização, Corte de Carga, Operação Normal e Fora de Serviço, respectivamente, do sistema *fuzzy*.

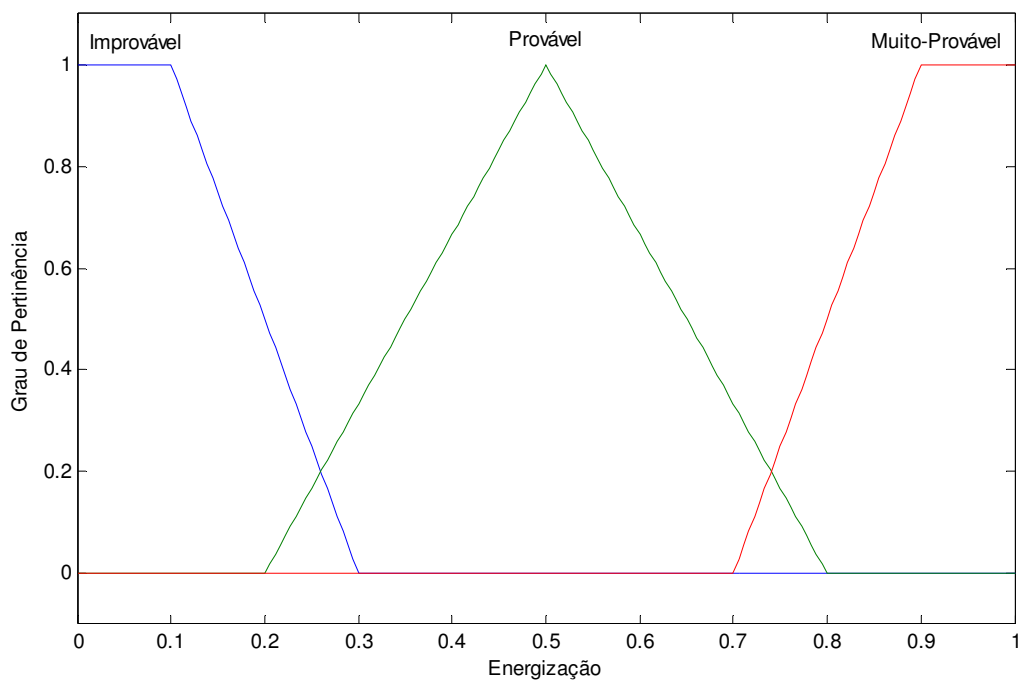


Figura 20 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Energização”.

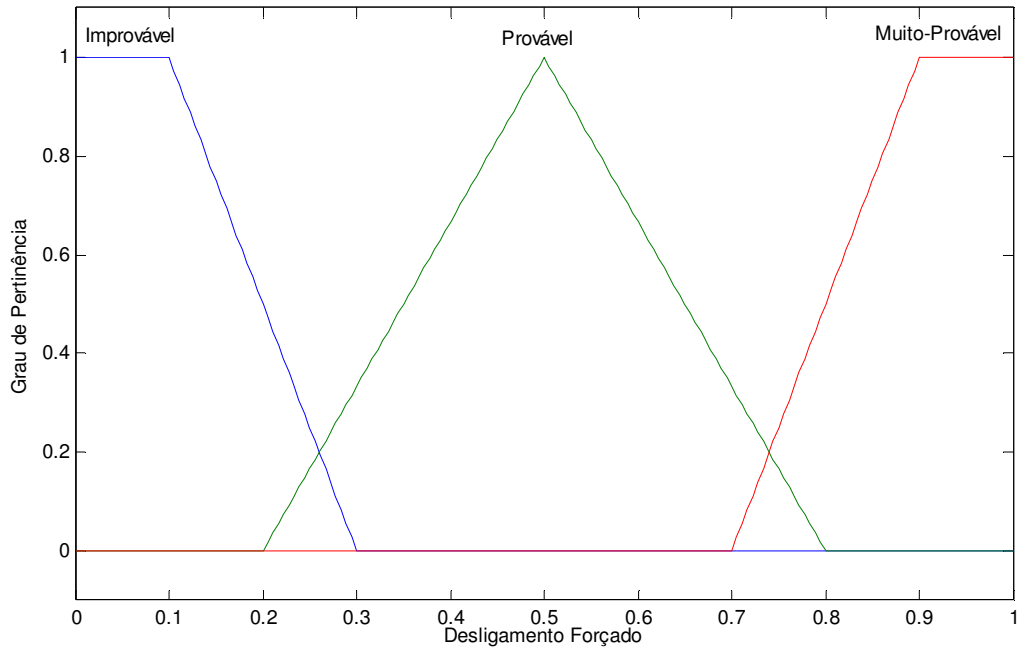


Figura 21 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Desligamento Forçado”.

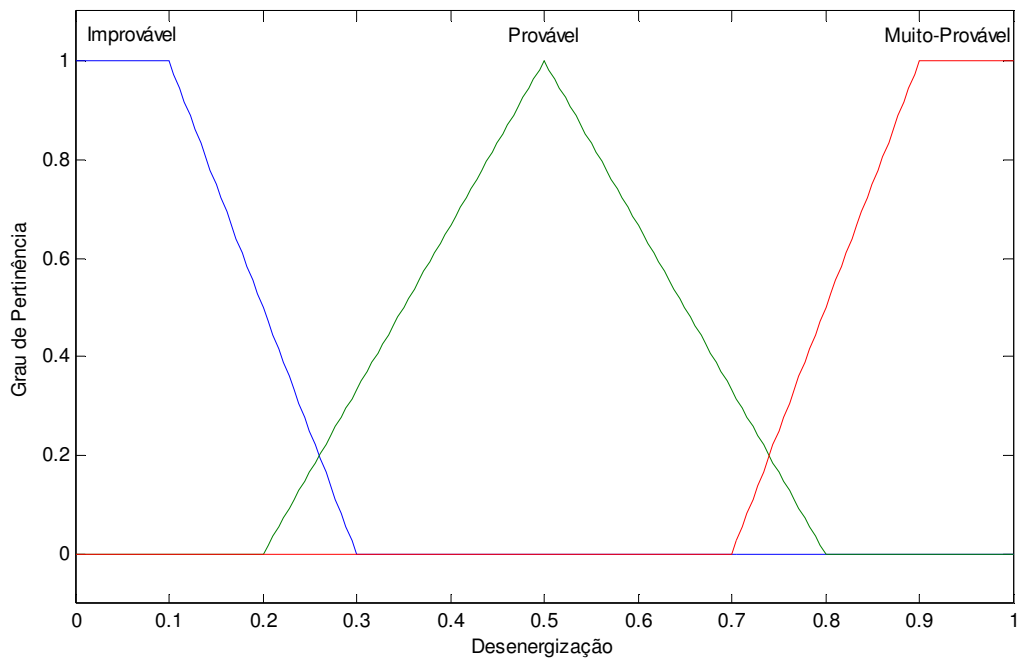


Figura 22 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Desenergização”.

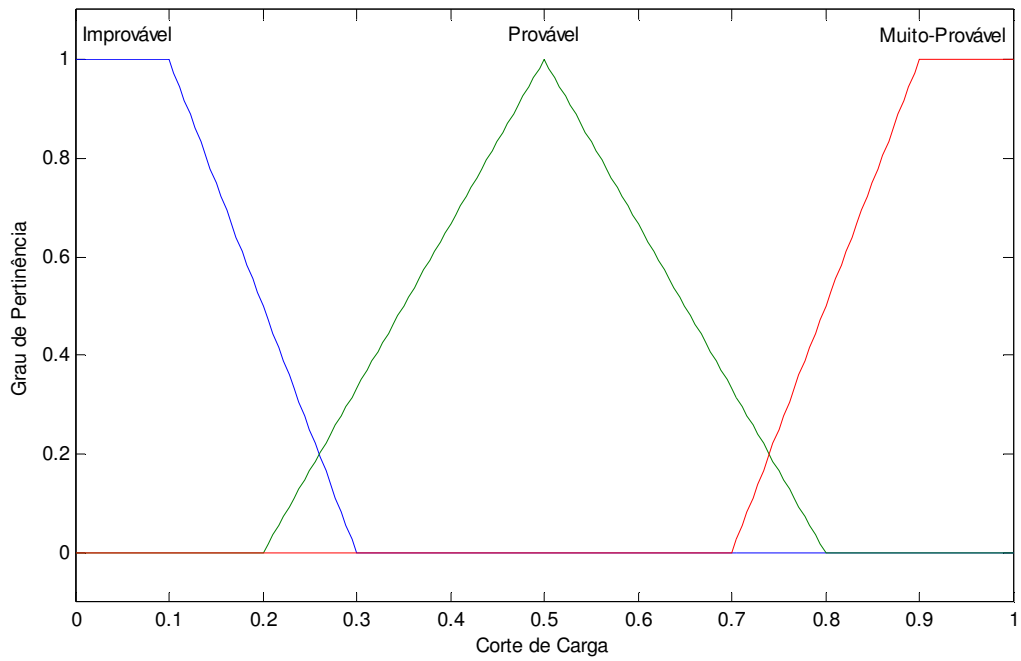


Figura 23 - Funções de pertinência associadas a variável de saída "Corte de Carga".

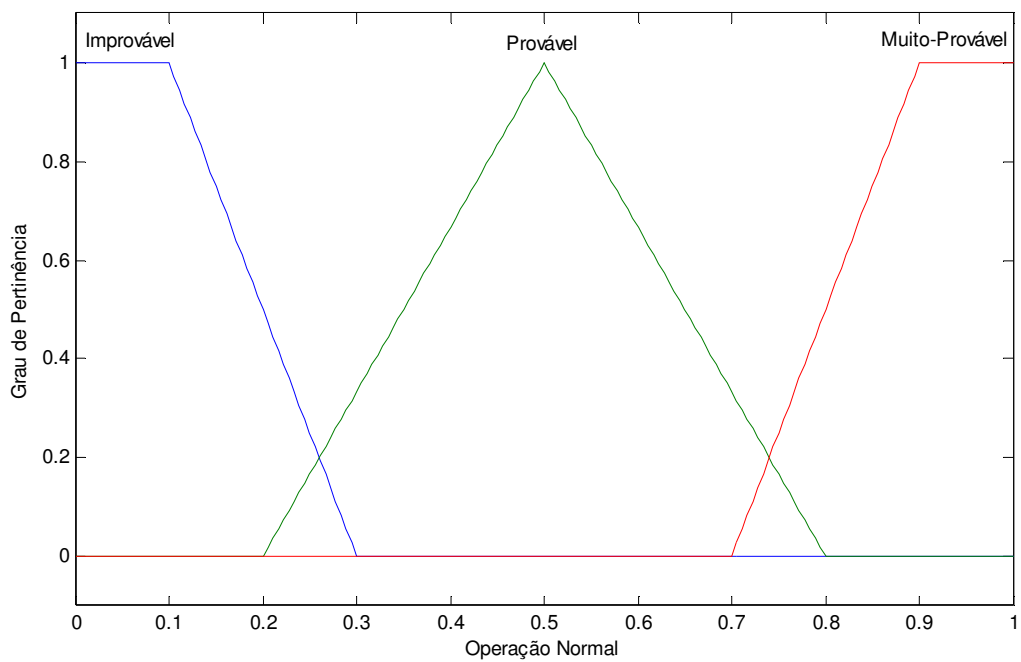


Figura 24 - Funções de pertinência associadas a variável de saída "Operação Normal".

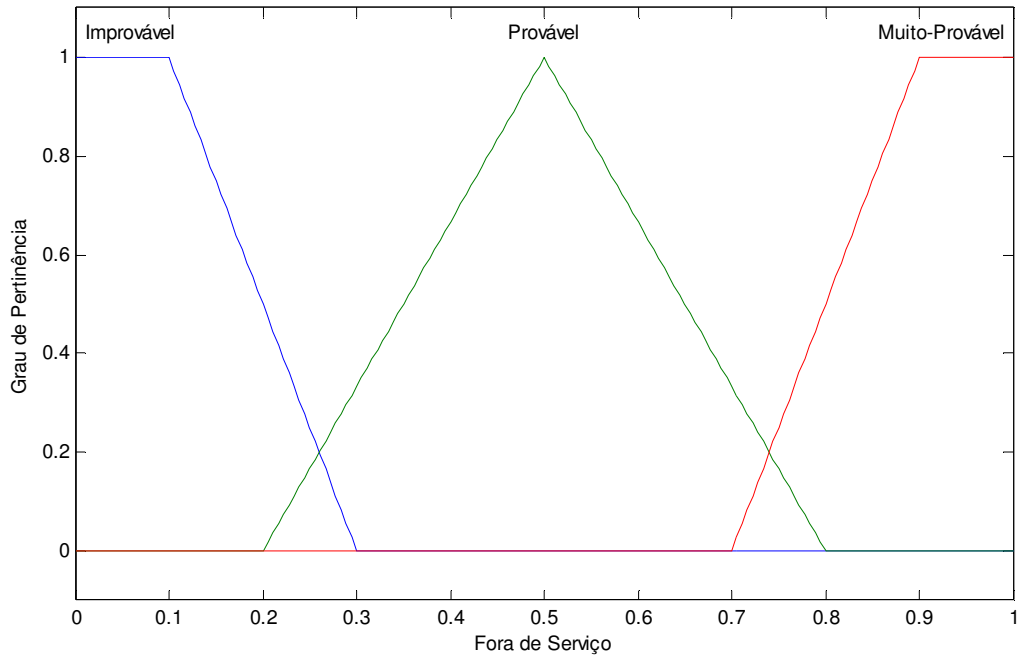


Figura 25 - Funções de pertinência associadas a variável de saída “Fora de Serviço”.

5.1.2 REGRAS FUZZY

Uma vez definidas as funções de pertinência das variáveis de entrada e também das saídas é necessário obter as regras do sistema *fuzzy*, também conhecidas como base de conhecimento ou inteligência do sistema.

A base de regras é elaborada durante o projeto do sistema em si, identificando todas suas características e detalhes e, irá resultar na identificação do estado operativo do gerador. Essa base é preenchida com o auxílio de um especialista, ou seja, um operador humano do sistema a ser implementado.

Utilizando as teorias da lógica *fuzzy*, este mapa de regras pode ser gerado utilizando linguagem computacional do tipo: SE (Condição) ENTÃO (Consequência) (SILVA, 2005).

Em um sistema baseado na teoria *fuzzy* determinam-se as regras de acordo com o número de variáveis de entrada e de saída. Inúmeras regras podem ser estabelecidas para se controlar o sistema e sua inserção no *FLT* está ilustrada na Figura 25.

Na construção de cada regra deve-se definir a conexão entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída, através dos operadores lógicos. Após a inserção de todas as regras tem-se a formação do sistema *fuzzy*.

Elas são escritas no editor de regra do *FLT* do MATLAB que disponibiliza vários tipos de operações entre as funções de pertinência *fuzzy* e ainda permite que sejam criados novos tipos de funções de pertinência, conforme é representado na Figura 25.

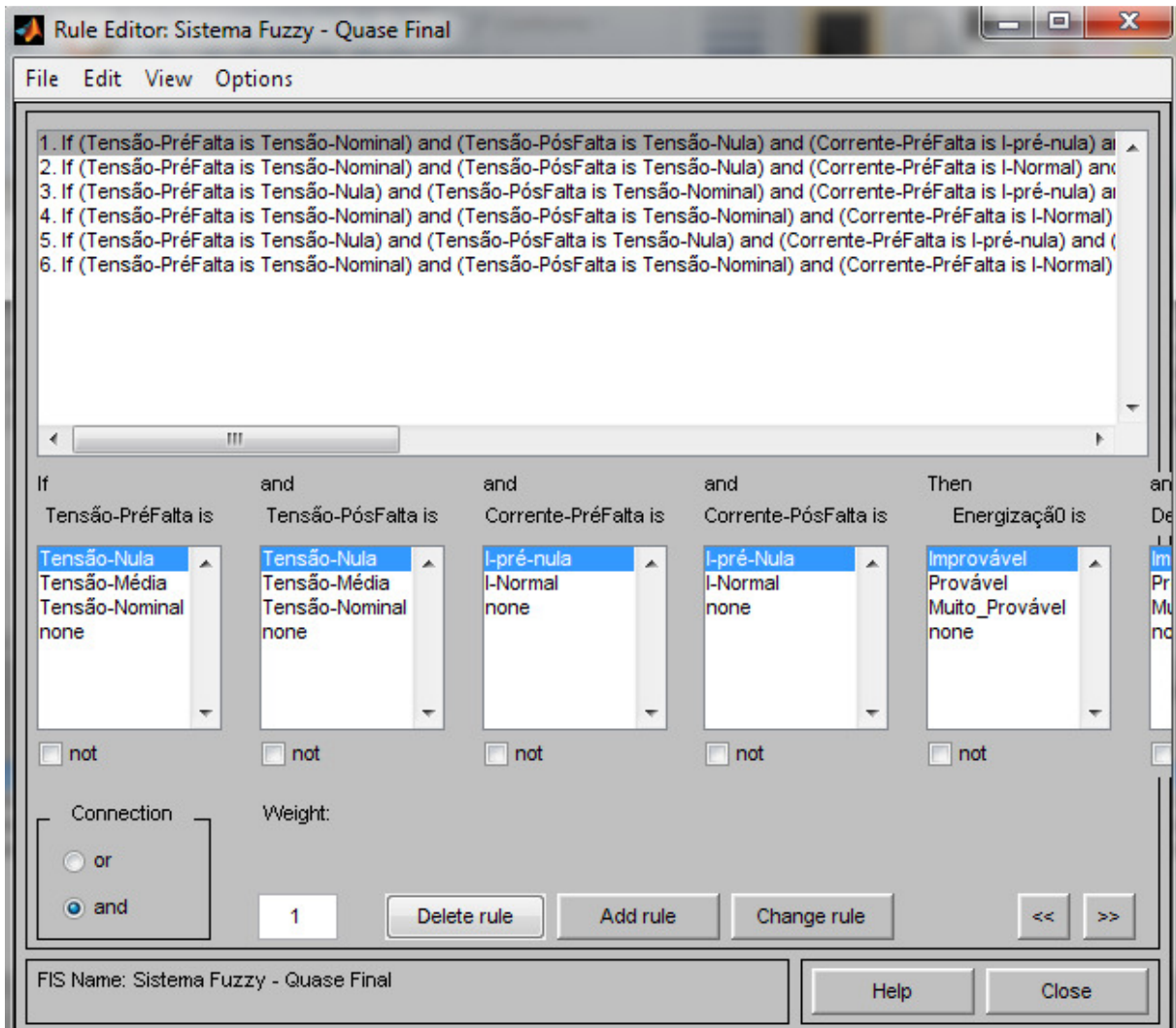


Figura 26 - Determinação e Inserção das Regras *Fuzzy* para o Sistema.

A partir de uma regra estabelecida, são repetidos os procedimentos de acordo com a experiência do especialista, colocando-se todas as situações que as variáveis podem apresentar e como o sistema obtém a resposta de acordo com as entradas. Uma vez determinadas e inseridas as regras, pode-se visualizá-las através do software citado para possíveis ajustes e correções.

Verifica-se que é através das regras que as funções de pertinência são ativadas considerando seu grau em relação a cada conjunto *fuzzy*. O sistema *fuzzy* recorre à verificação das regras para a tomada de decisão.

As regras do sistema *fuzzy*, para a obtenção das variáveis de saída são descritas conforme a apresentação dos estudos de caso no capítulo 6, com intuito de descrever o estado de operação do gerador.

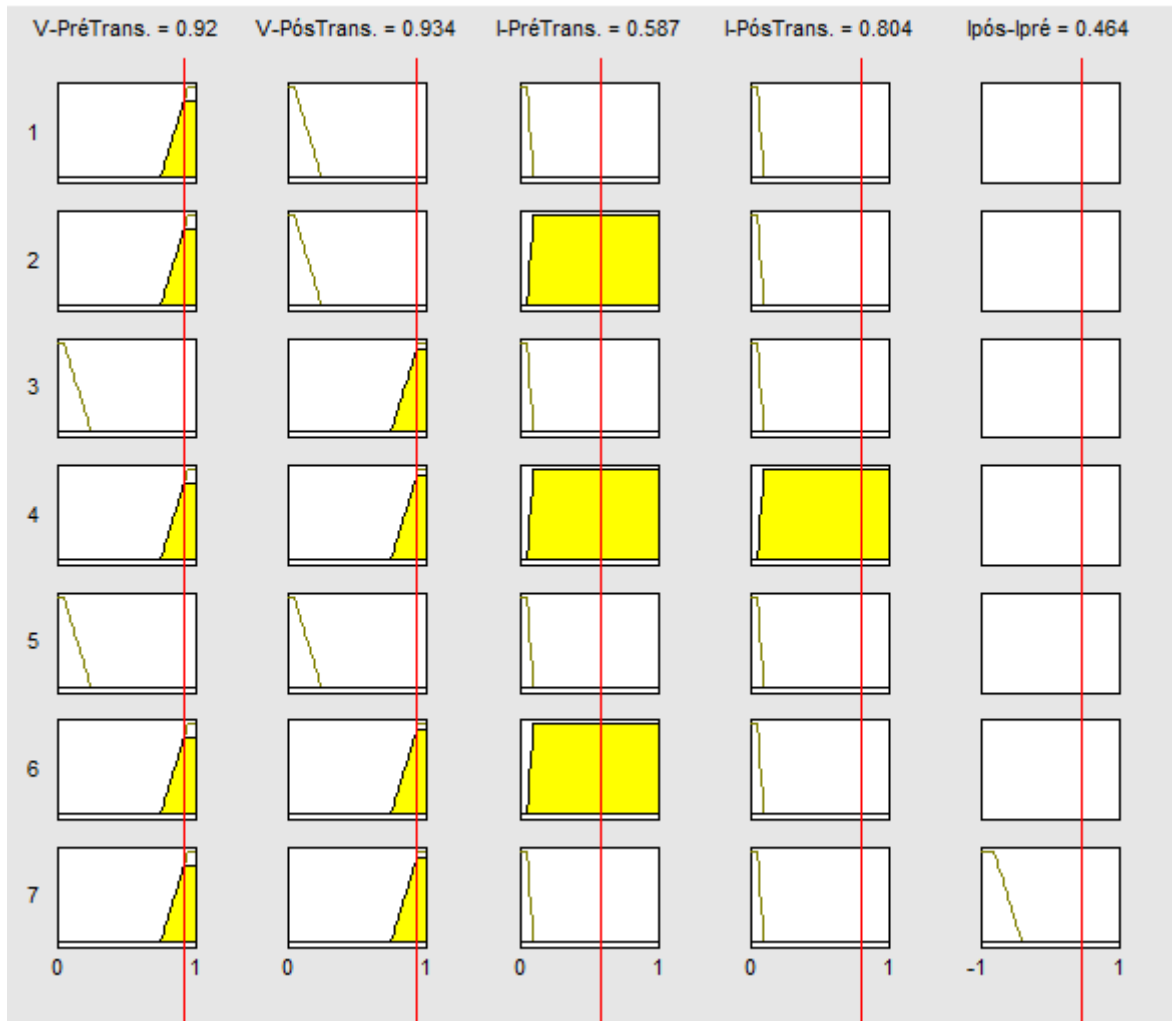


Figura 27 - Visualização gráfica das regras *fuzzy*.

Construído o sistema *fuzzy* podem-se arbitrar valores numéricos para as variáveis de entrada, simulando cenários factíveis, do ponto de vista do especialista, para observar e analisar os valores obtidos para cada variável de saída.

5.1.3 DEFUZZIFICAÇÃO

O passo final consiste em efetuar a defuzzificação que será traduzir para um valor discreto o resultado da variável lingüística de saída do sistema que foi inferida pelas regras *fuzzy*. De uma forma genérica este processo nada mais é que uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto. O processo de defuzzificação será executado como descrito no capítulo 4, usando o método do centro de gravidade.

6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema proposto deve possuir um comportamento o mais semelhante possível ao de um ser humano no ato da classificação da análise de oscilografias. Dessa, forma a teoria *fuzzy* demonstrou ser útil na elaboração de um modelo de um sistema para analisar registros de oscilografias de forma rápida e eficiente.

Segundo Shaw e Simões (2001), o poder associado à utilização de teoria *fuzzy* é servir de ponte entre o conhecimento empírico e uma implementação computacional.

Para exemplificar o funcionamento do sistema, na sequência mostram-se estudos de caso com as características de operação, mostrando os valores médios de corrente e tensão de sequência positiva do gerador durante o registro, estes valores são adquiridos pelo módulo de extração de características (EC). Pode-se verificar também estes valores nos registros fasoriais para cada saída do sistema.

Os registros oscilográficos a serem utilizados nos estudos de caso foram obtidos junto a uma empresa do setor elétrico, sendo casos reais.

6.1 ESTUDO DE CASO: ENERGIZAÇÃO

Primeiramente demonstra-se o estado operativo do gerador classificado como “Energização”. Sendo obtidos (extraídos) com o módulo de EC os seguintes valores de tensão e corrente:

- Tensão Pós-Transitório: 0.921 P.U;
- Tensão Pré-Transitório: 0.095 P.U;
- Corrente Pós-Transitório: 0.001 P.U;
- Corrente Pré-Transitório: 0.001 P.U;

Estes valores de tensão de sequência positiva, Pré e Pós-transitórios respectivamente, podem ser verificados no registro fasorial mostrado na Figura 27. Não foi apresentado o registro da corrente, pois os valores são nulos para este estudo de caso.

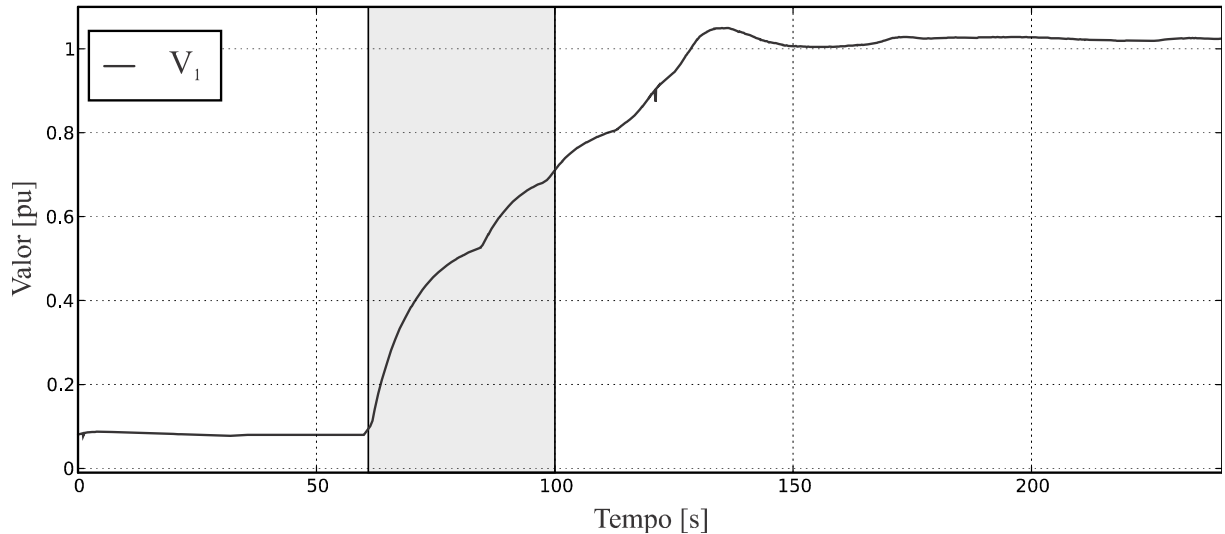


Figura 28 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: energização.
Fonte : (MORETO, 2011)

Para demonstrar a funcionalidade do sistema *fuzzy*, atribui-se os valores das variáveis de entrada como sendo os dados extraídos pelo módulo de EC.

Para obter as variáveis de saída de um sistema baseado na teoria *fuzzy* determina-se as regras de acordo com o número de variáveis de entrada e de saída. Inúmeras regras podem ser estabelecidas para o sistema.

Para este estudo de caso, o estado operativo do gerador (Energização) foi obtido pela seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é Tensão-Nula e a Tensão Pós-Transitório é a Tensão-Nominal e a Corrente Pré-Transitório é I-nula e a Corrente Pós-Transitório é I-Nula então **a Energização é Muito-Provável**, Desligamento-Forçado é Improvável, Desenergização é Improvável, Corte de Carga é Improvável, Operação-Normal é Improvável e Fora de Serviço is Improvável.

Na Figura 28 têm-se os valores inseridos no sistema conforme obtidos pelo método de EC e mostra-se sua resposta através da variável de saída.

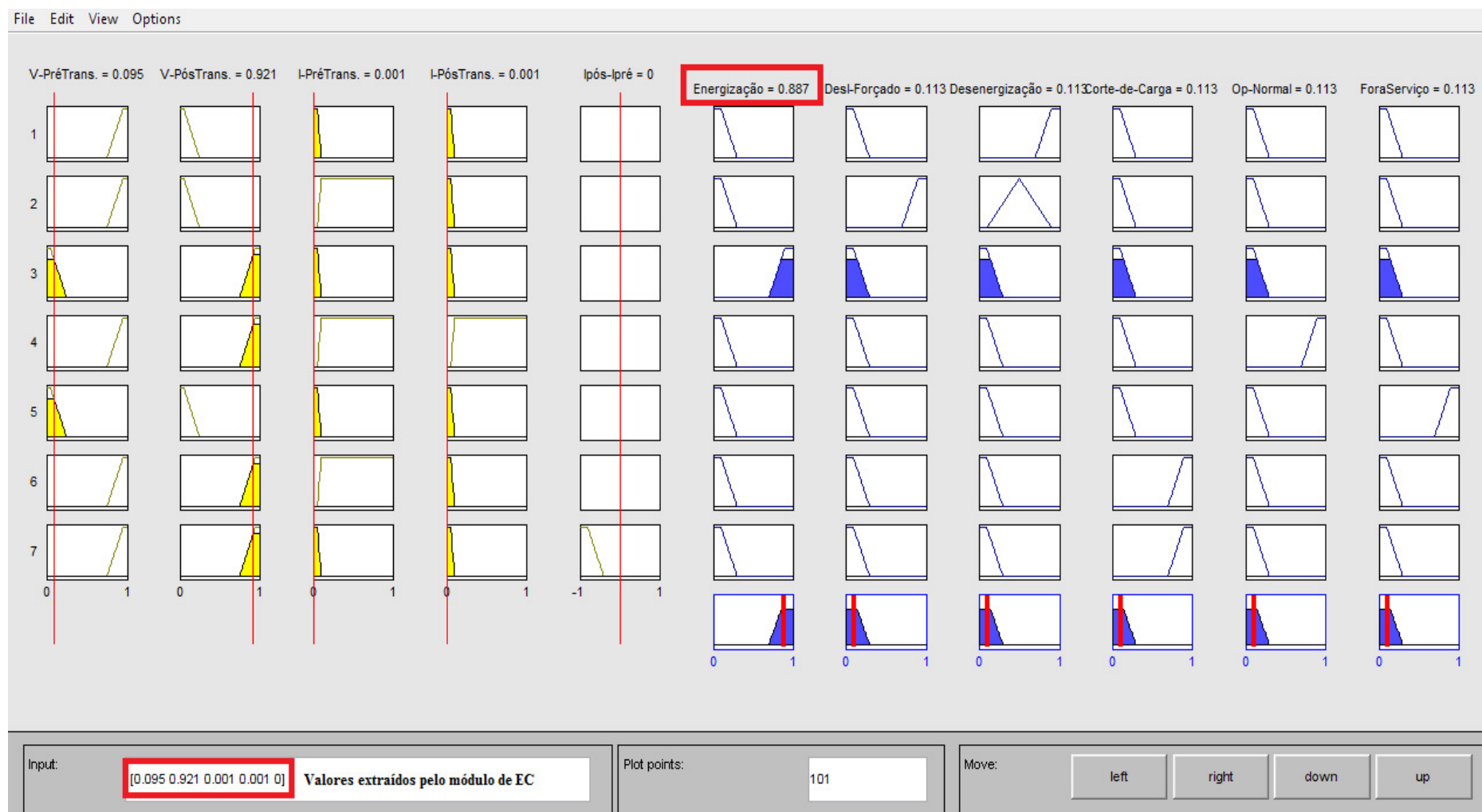


Figura 29 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.887).

A verdadeira saída defuzzyficada do sistema *fuzzy* pode ser considerada como passível de assumir somente dois valores: SIM ou NÃO, pois o sistema está sendo proposto para auxiliar em uma tomada de decisão.

Dessa maneira, de acordo com a Figura 28, aplicando-se o método do centro de gravidade, conforme anteriormente citado, tem-se um valor numérico de saída (0.887), que nada mais é que a variável ainda no domínio *Fuzzy*. Se observarmos novamente a Figura 19, pode-se fazer a “tradução” dessa variável de saída do domínio *fuzzy* para um “valor” real. O resultado será muito provável que seja Energização o estado operativo do gerador e assim se completa a fuzzificação e conseqüentemente a tomada de decisão.

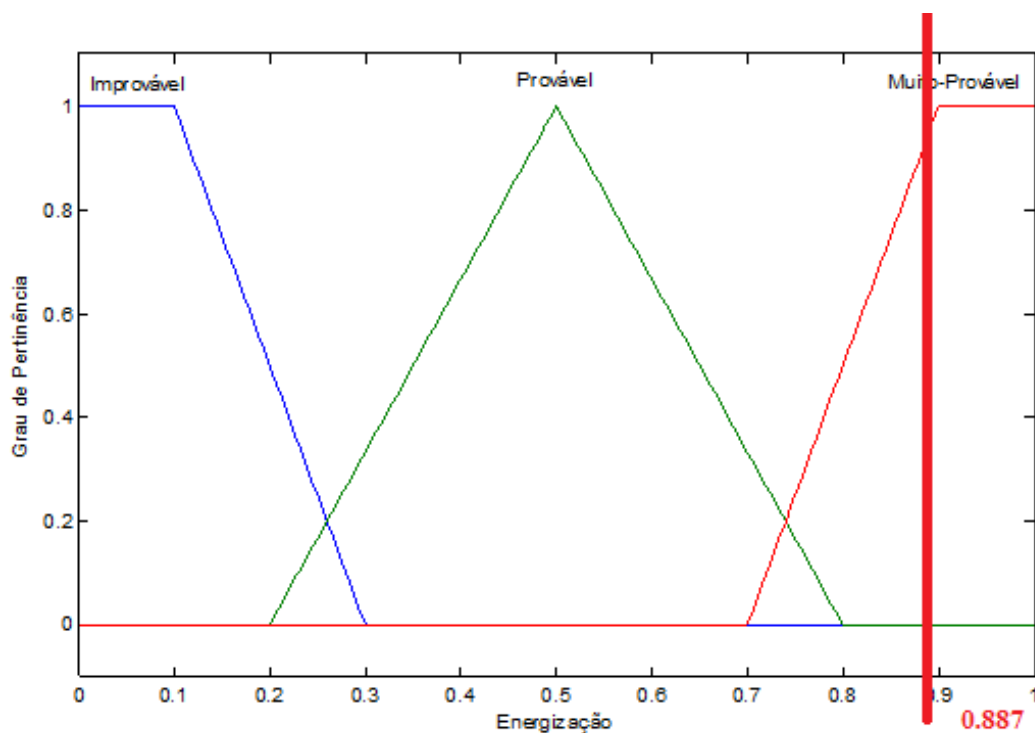


Figura 30 - Variável de saída e significado do valor de saída (0.887).

6.2 ESTUDO DE CASO: DESLIGAMENTO FORÇADO

Para esse estudo de caso onde o estado operativo do gerador é classificado como “Desligamento Forçado”, onde primeiramente são obtidos (extraídos) do módulo de EC os seguintes valores de tensão e corrente:

- Tensão Pós-Transitório: 0.025 P.U;
- Tensão Pré-Transitório: 1.045 P.U;
- Corrente Pós-Transitório: 0.003 P.U;

➤ Corrente Pré-Transitório: 0.563 P.U;

Estes valores de tensão e corrente de sequência positiva, Pré e Pós-transitórios respectivamente, podem ser verificados nos registros fasoriais mostrados nas Figuras 30 e 31.

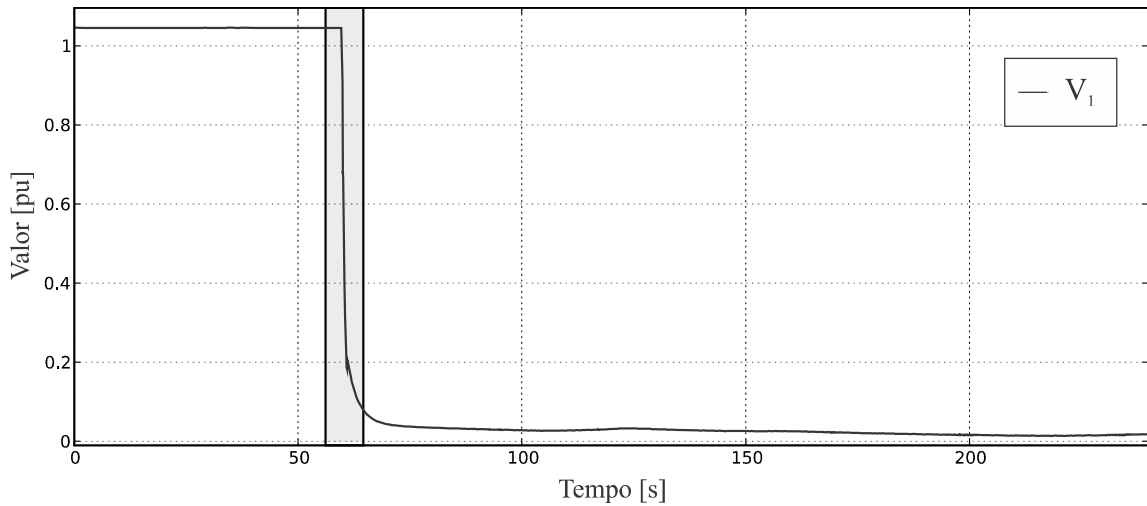


Figura 31 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: Desligamento Forçado.

Fonte : (MORETO, 2011)

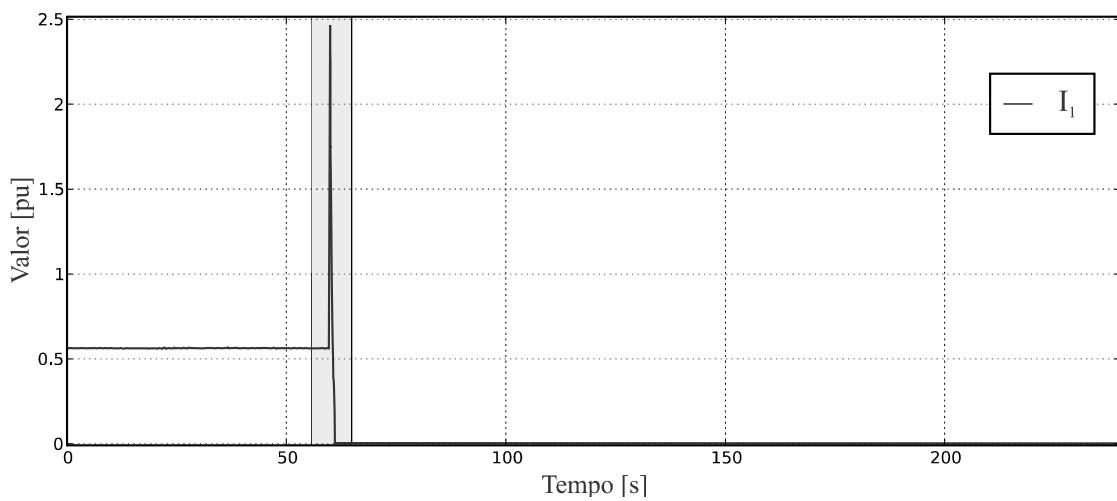


Figura 32 - Registro fasorial da corrente referente ao estado operativo do gerador: Desligamento Forçado.

Fonte : (MORETO, 2011)

Para demonstrar a funcionalidade do sistema *fuzzy*, atribui-se os valores das variáveis de entrada como sendo os dados extraídos pelo módulo de EC.

Para este estudo de caso, o estado operativo do gerador (Desligamento Forçado) foi obtido pela seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é Tensão-Nominal e a Tensão Pós-Transitório é Tensão-Nula e a Corrente Pré-Transitório é I-Normal e a Corrente Pós-Transitório é I-Nula então a Energização é Improvável, **Desligamento-Forçado é Muito Provável**, Desenergização é Provável, Corte de Carga é Improvável, Operação-Normal é Improvável e Fora de Serviço is Improvável.

Na Figura 32 têm-se os valores inseridos no sistema conforme extraídos pelo EC e mostra-se sua resposta através da variável de saída.

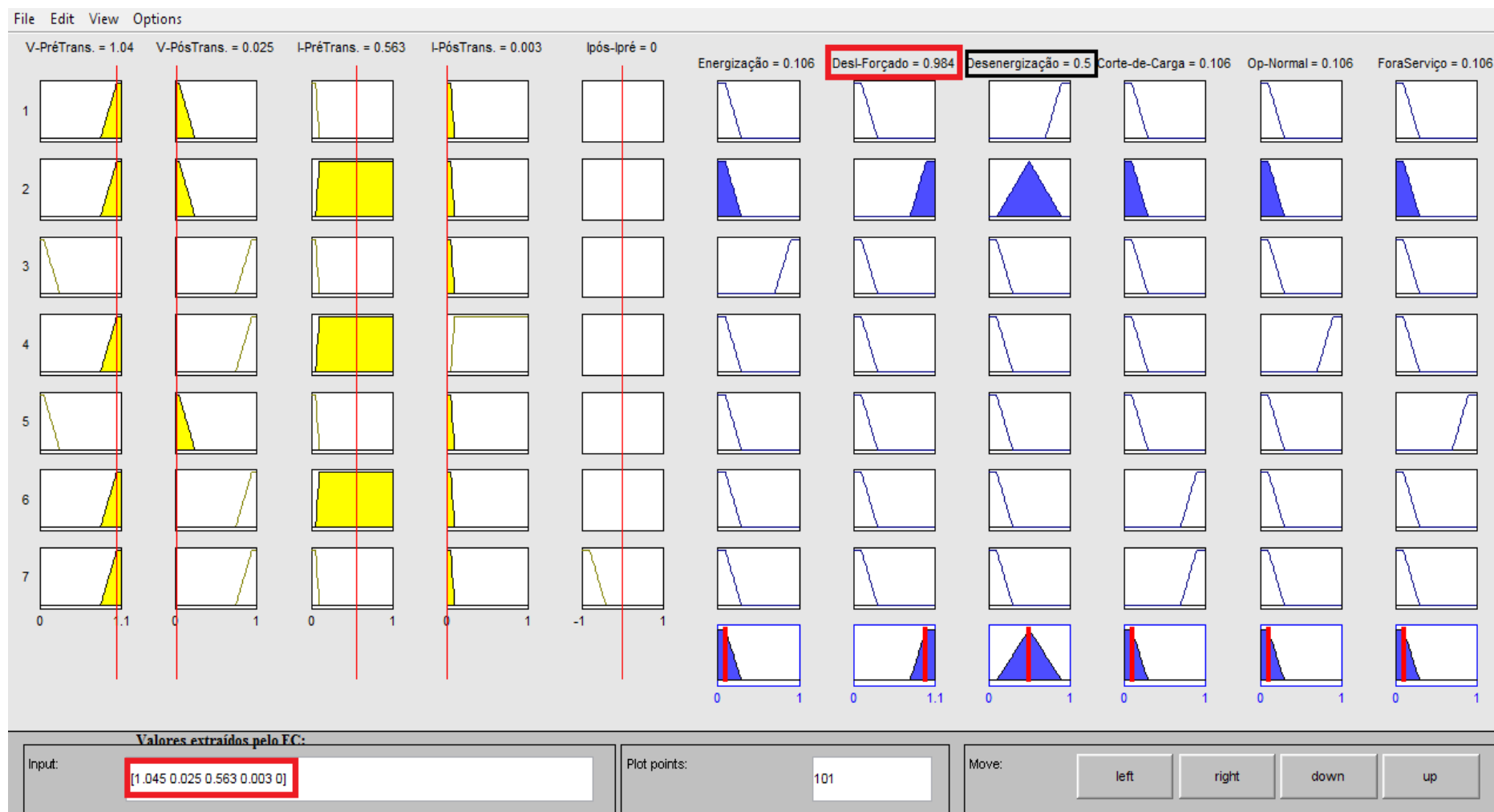


Figura 33 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.984).

Assim de acordo com a Figura 32, aplicando-se o método do centro de gravidade, tem-se um valor numérico de saída (0.984), que nada mais é que a variável ainda no domínio *Fuzzy*. Se verificar novamente a Figura 20, pode-se fazer a “tradução” dessa variável de saída do domínio *fuzzy* para um valor numérico relacionado à qual função de pertinência representa esta variável de saída. O resultado será muito provável que seja Desligamento Forçado o estado operativo do gerador e assim se completa a fuzzificação e consequentemente a tomada de decisão.

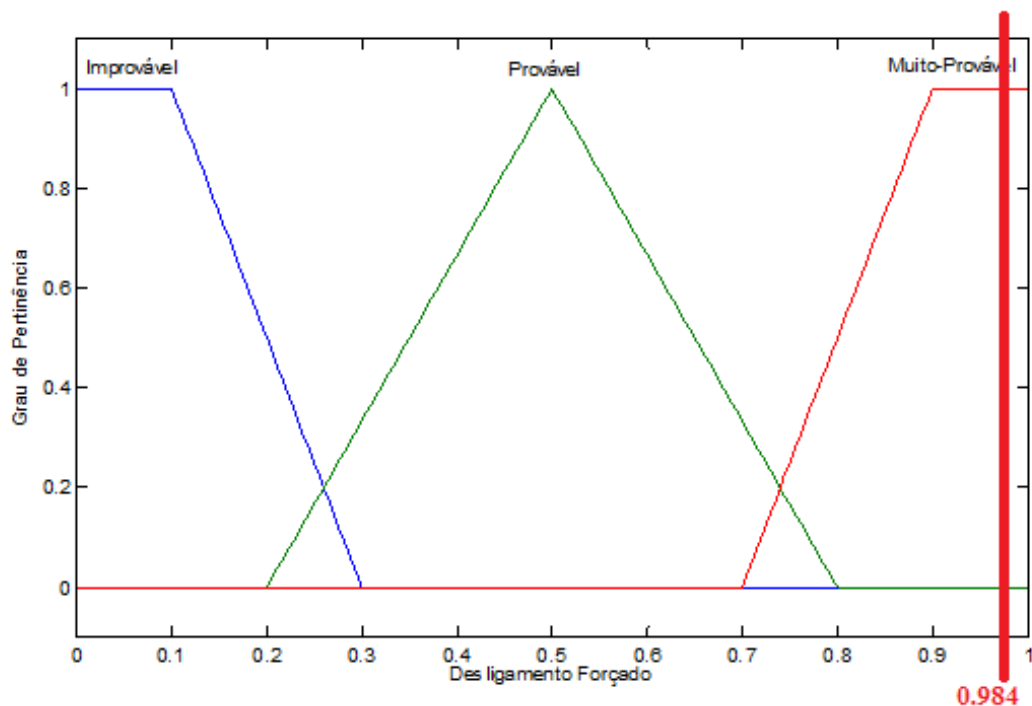


Figura 34 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.984).

6.3 ESTUDO DE CASO: DESENERGIZAÇÃO

Para este estudo de caso onde o estado operativo do gerador é classificado como “Desenergização”. O módulo de EC extrai os seguintes valores de tensão e corrente:

- Tensão Pós-Transitório: 0.093 P.U;
- Tensão Pré-Transitório: 1.011 P.U;
- Corrente Pós-Transitório: 0.004 P.U;
- Corrente Pré-Transitório: 0.170 P.U;

Estes valores de tensão e corrente de sequência positiva, Pré e Pós-transitórios respectivamente, podem ser verificados nos registros fasoriais mostrado nas Figuras 34 e 35.

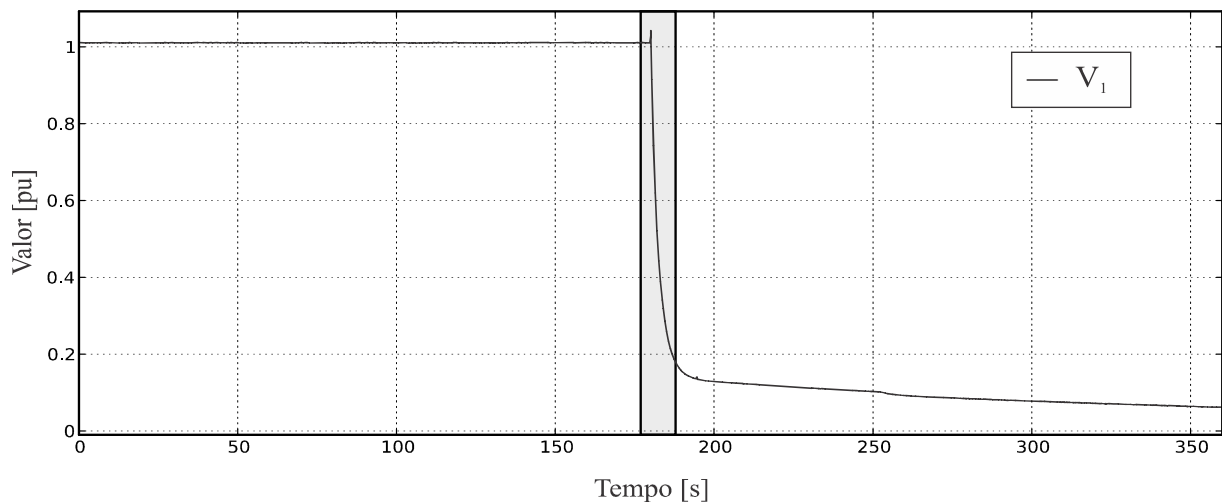


Figura 35 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: Desenergização.
 Fonte : (MORETO, 2011)

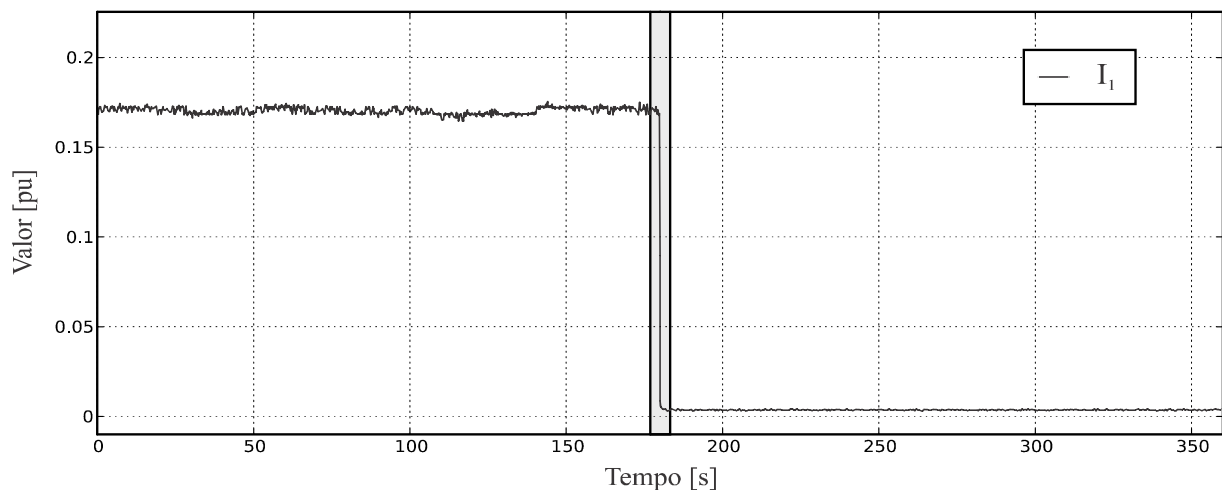


Figura 36 - Registro fasorial da corrente referente ao estado operativo do gerador: Desenergização.
 Fonte : (MORETO, 2011)

Pode ser verificada também nesse estudo de caso, que foi definido uma função de pertinência também como sendo *provável* uma desenergização, pois em alguns casos (turbo geradores a vapor) ocorre a desenergização através de reversão de potência. Sendo que, em alguns desses casos, pode haver uma corrente inicial não nula (corrente pré-transitório). Analisando a Figura 35, verifica-se está corrente pré-transitório, mas esta é baixa (0,17 P.U). Esse é um caso típico de desenergização por reversão de potência (os dados utilizados nesses estudos de caso são de uma termoelétrica).

Para demonstrar a funcionalidade do sistema *fuzzy*, atribui-se os valores das variáveis de entrada como sendo os dados extraídos pelo módulo de EC.

Para este estudo de caso, o estado operativo do gerador (Desenergização) foi obtido pela seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é Tensão-Nominal e a Tensão Pós-Transitório é Tensão-Nula e a Corrente Pré-Transitório é I-Nula e a Corrente Pós-Transitório é I-Nula então a Energização é Improvável, Desligamento-Forçado é Improvável, **Desenergização é Muito Provável**, Corte de Carga é Improvável, Operação-Normal é Improvável e Fora de Serviço is Improvável.

Na Figura 36 têm-se os valores inseridos no sistema conforme extraídos pelo EC e mostra-se sua resposta através da variável de saída.

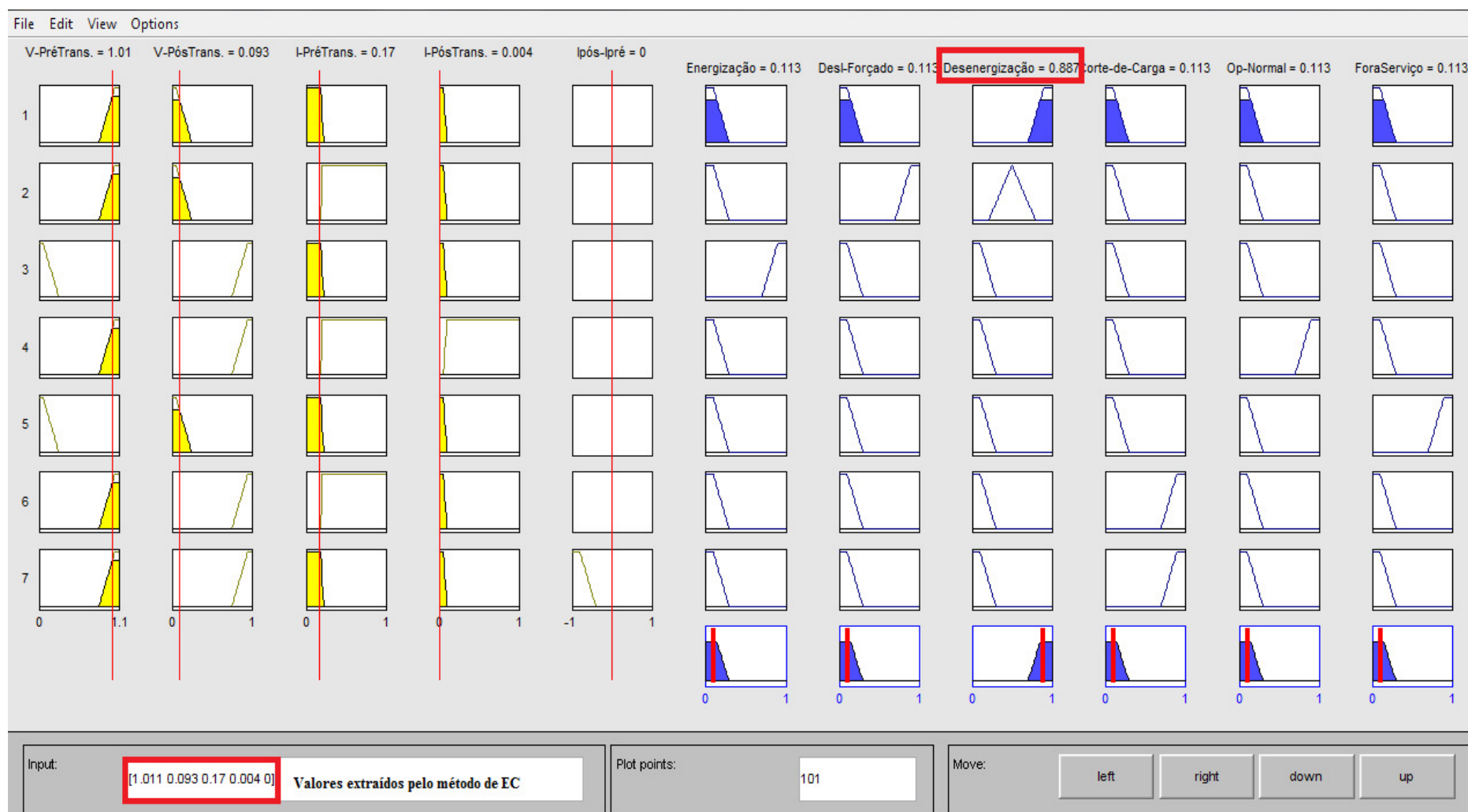


Figura 37 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.887).

Assim de acordo com a Figura 36, aplicando-se o método do centro de gravidade, tem-se um valor numérico de saída (0.887), que nada mais é que a variável ainda no domínio *Fuzzy*. Verificando novamente a Figura 21, pode-se fazer a “tradução” dessa variável de saída do domínio *fuzzy* para um valor numérico relacionado à qual função de pertinência representa esta variável de saída. O resultado será muito provável que seja Desenergização o estado operativo do gerador e assim se completa a fuzzificação e consequentemente a tomada de decisão.

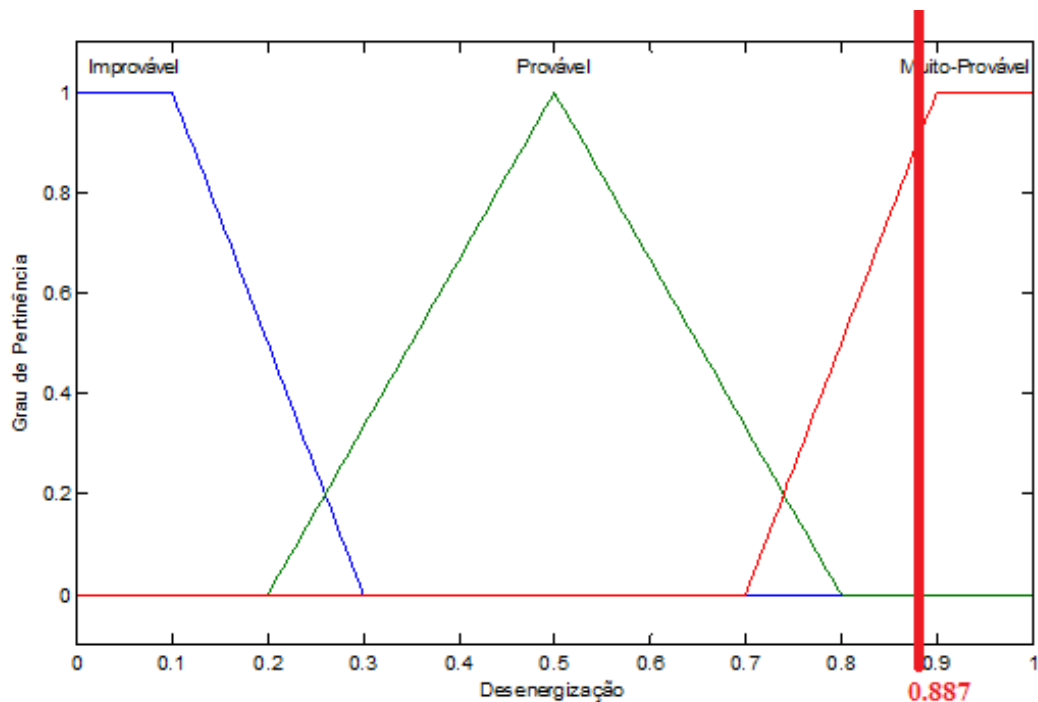


Figura 38 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.887).

6.4 ESTUDO DE CASO: CORTE DE CARGA

Procedendo com a mesma sistemática, para este estudo de caso onde o estado operativo do gerador é classificado como “Corte de Carga”. Onde primeiramente são obtidos do módulo de EC os seguintes valores de tensão e corrente:

- Tensão Pós-Transitório: 1.006 P.U;
- Tensão Pré-Transitório: 1.007 P.U;
- Corrente Pós-Transitório: 0.210 P.U;
- Corrente Pré-Transitório: 0.414 P.U;

Estes valores de tensão e corrente de sequência positiva, Pré e Pós-transitórios respectivamente, podem ser verificados nos registros fasoriais mostrados nas Figuras 38 e 39.

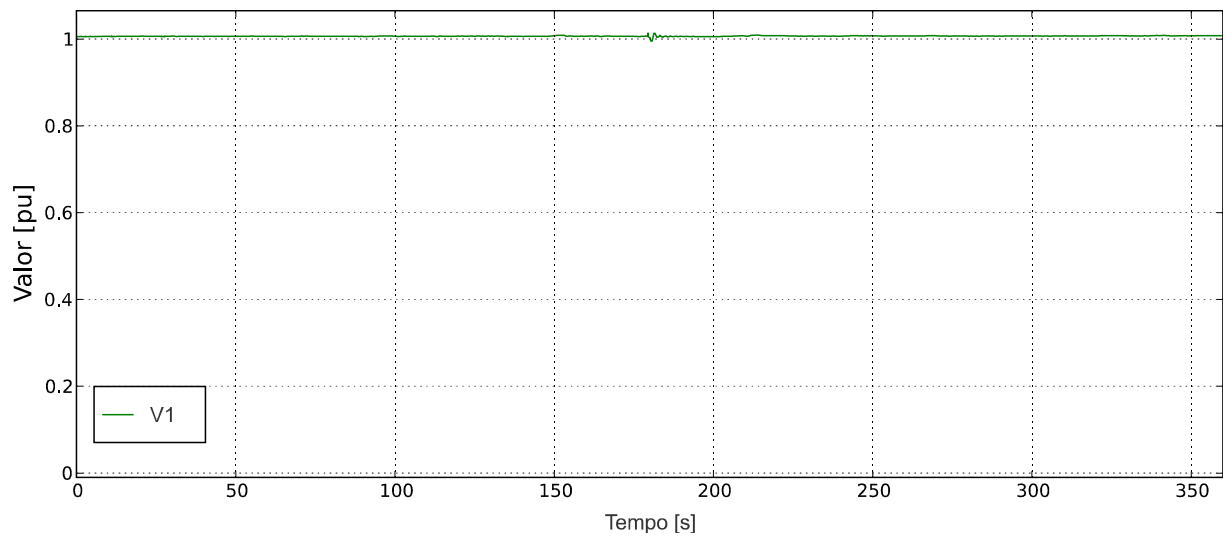


Figura 39 - Registro fasorial da tensão referente ao estado operativo do gerador: Corte de Carga.
Fonte : (MORETO, 2011)

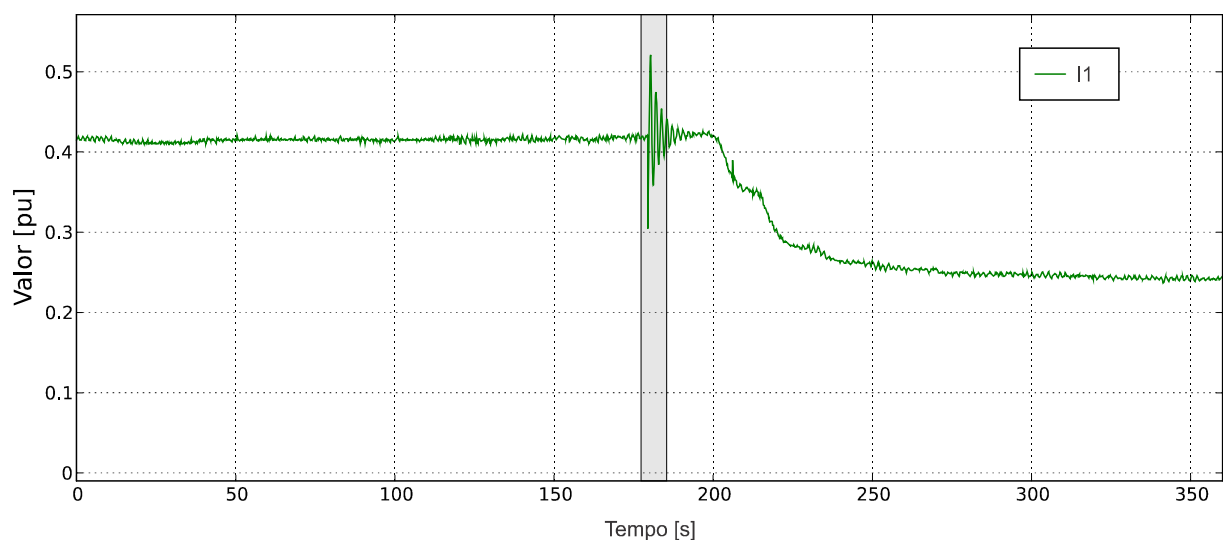


Figura 40 - Registro fasorial da corrente referente ao estado operativo do gerador: Corte de Carga.
Fonte : (MORETO, 2011)

Para demonstrar a funcionalidade do sistema *fuzzy*, atribuiu-se os valores das variáveis de entrada como sendo os dados extraídos pelo módulo de EC.

Para este estudo de caso, o estado operativo do gerador (Corte de Carga) foi obtido pela seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é Tensão-Nominal e a Tensão Pós-Transitório é Tensão-Nominal e a Corrente Pré-Transitório é I-Normal e a Corrente Pós-Transitório é I-Nula então a Energização é Improvável, Desligamento-Forçado

é Improvável, Desenergização é Improvável, **Corte de Carga é Muito Provável**, Operação-Normal é Improvável e Fora de Serviço is Improvável.

Também para este estado operativo do gerador tem-se uma regra envolvendo a variação de corrente. Onde para obter este estado operativo, usa-se a seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é Tensão-Nominal e a Tensão Pós-Transitório é Tensão-Nominal e a Corrente Pré-Transitório é I-Nula e a Corrente Pós-Transitório é I-Nula e a $I_{pós-IPré}$ é Baixa então a Energização é Improvável, Desligamento-Forçado é Improvável, Desenergização é Improvável, **Corte de Carga é Muito Provável**, Operação-Normal é Improvável e Fora de Serviço is Improvável.

Neste estudo de caso, o corte de carga pode ser obtido por duas regras. Uma é para corte de carga antes da desenergização (em que a tensão se mantém constante e nominal) e outra é para o caso da diminuição da potência gerada (esse é o caso do estudo de caso), onde tem-se uma significativa variação de corrente.

Na Figura 40 têm-se os valores inseridos no sistema conforme extraídos pelo EC e mostra-se sua resposta através da variável de saída.

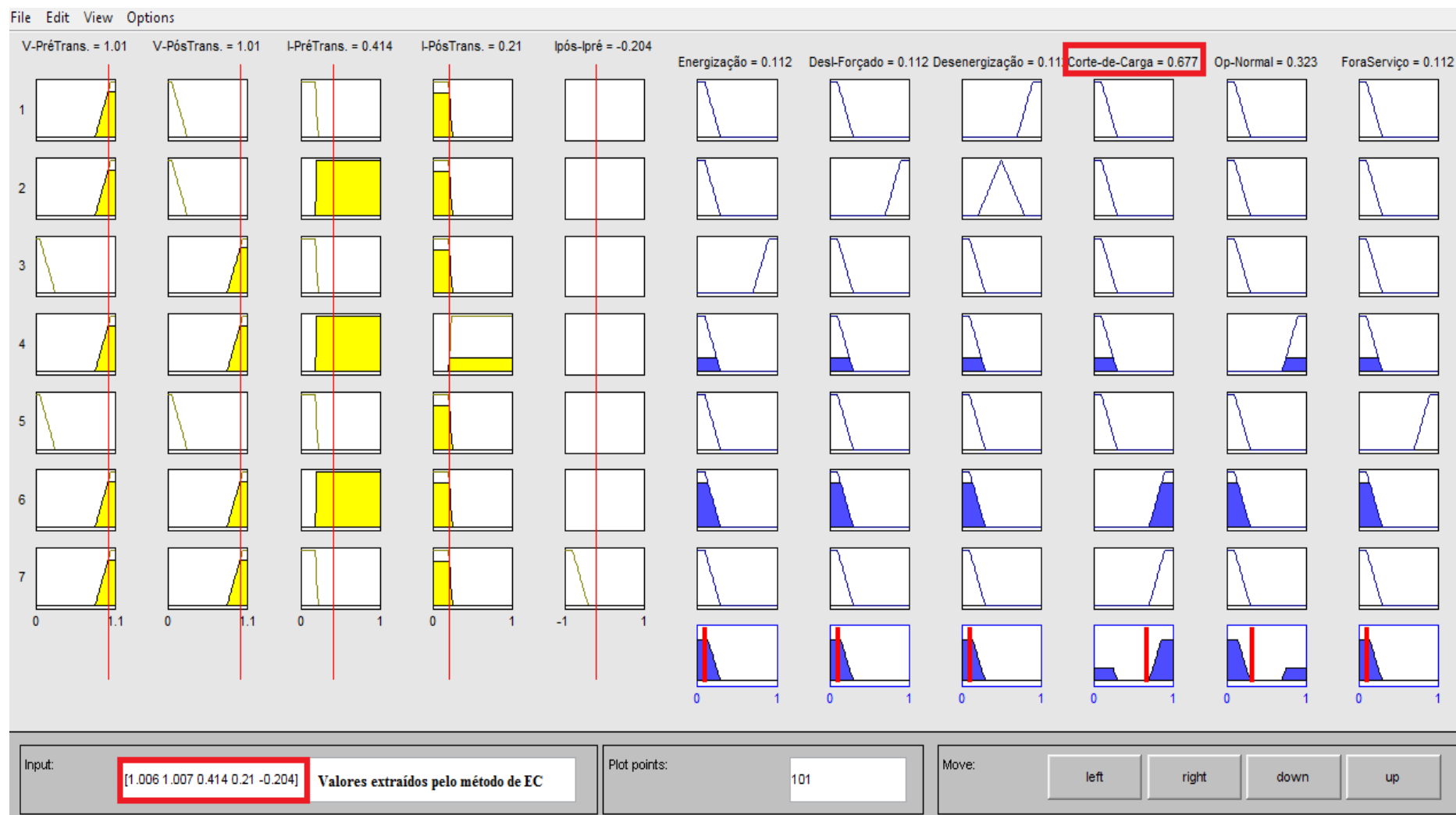


Figura 41 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.677).

Assim de acordo com a Figura 40, aplicando-se o método do centro de gravidade, tem-se um valor numérico de saída (0.677), que nada mais é que a variável ainda no domínio *Fuzzy*. O resultado será provável que seja Corte de Carga o estado operativo do gerador e assim se completa a fuzzificação e conseguintemente a tomada de decisão.

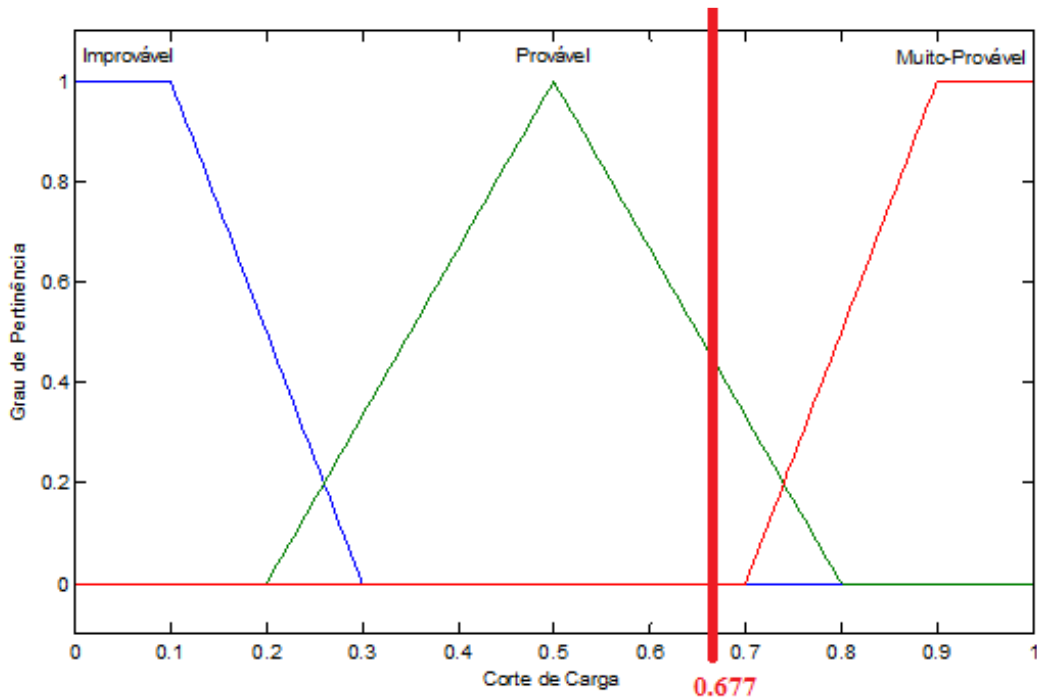


Figura 42 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.677).

6.5 ESTUDO DE CASO: OPERAÇÃO NORMAL

Procedendo com a mesma sistemática, para este estudo de caso onde o estado operativo do gerador é classificado como “Operação Normal”. Onde primeiramente são obtidos do módulo de EC os seguintes valores de tensão e corrente:

- Tensão Pós-Transitório: 1.009 P.U;
- Tensão Pré-Transitório: 1.008 P.U;
- Corrente Pós-Transitório: 0.627 P.U;
- Corrente Pré-Transitório: 0.643 P.U;

Procedendo como mesmo método para demonstrar a funcionalidade do sistema *fuzzy*, atribui-se os valores das variáveis de entrada como sendo os dados extraídos pelo módulo de EC.

Para este estudo de caso, o estado operativo do gerador (Operação Normal) foi obtido pela seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é a Tensão-Nominal e a Tensão Pós-Transitório é a Tensão-Nominal e a Corrente Pré-Transitório é I-Normal e a Corrente Pós-Transitório é I-Normal e a Ipós-Ipré é Baixa então a Energização é Improvável, Desligamento-Forçado é Improvável, Desenergização é Improvável, Corte de Carga é Improvável, **Operação-Normal é Muito Provável** e Fora de Serviço é Improvável.

Na Figura 42 têm-se os valores inseridos no sistema conforme extraídos pelo EC e mostra-se sua resposta através da variável de saída.

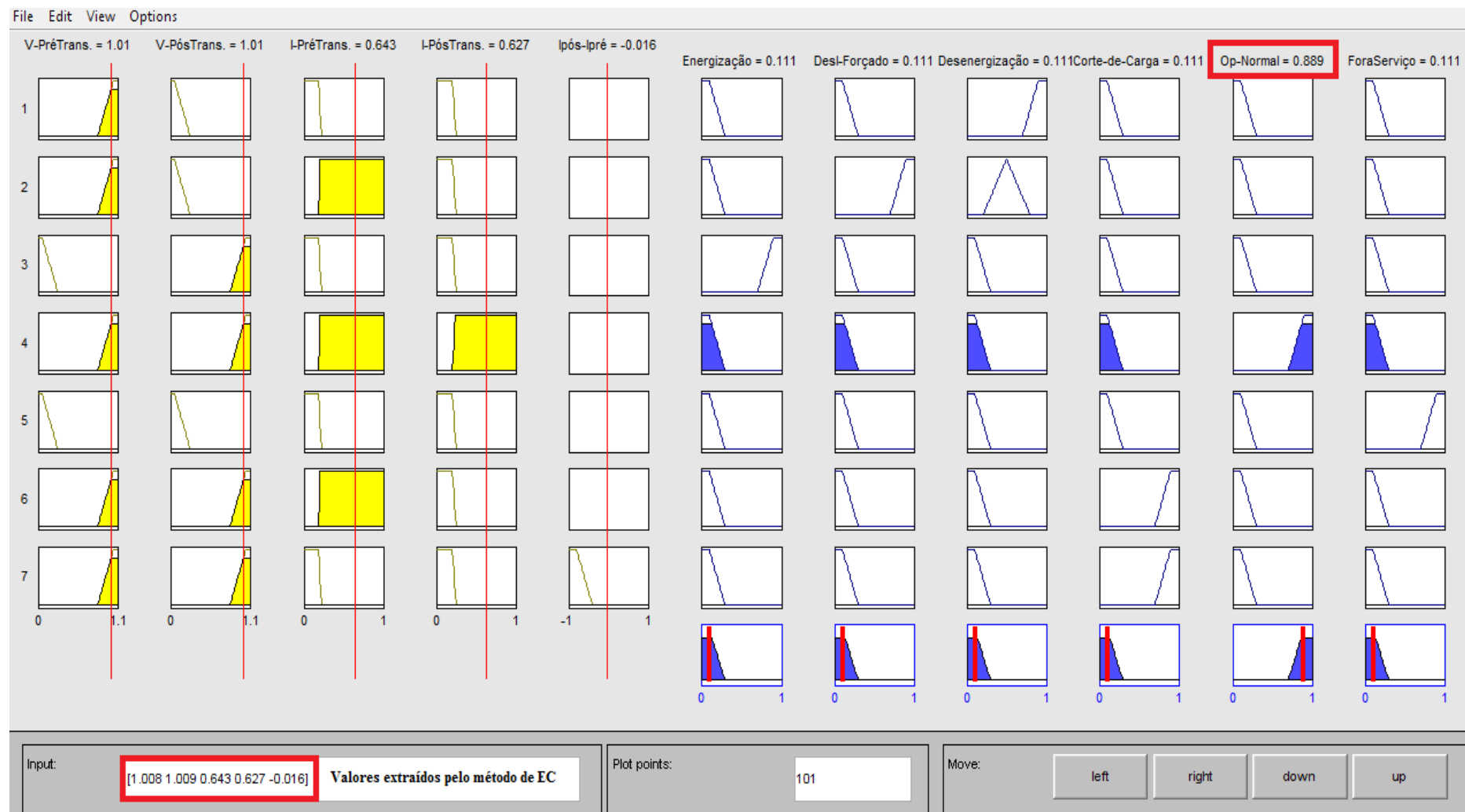


Figura 43 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.889).

Assim de acordo com a Figura 42, aplicando-se o método do centro de gravidade, tem-se um valor numérico de saída (0.889), que nada mais é que a variável ainda no domínio *Fuzzy*. Se verificar novamente a Figura 23, pode-se fazer a “tradução” dessa variável de saída do domínio *fuzzy* para um valor numérico relacionado à qual função de pertinência representa esta variável de saída. O resultado será muito provável que seja Operação Normal o estado operativo do gerador e assim se completa a fuzzificação e consequentemente a tomada de decisão.

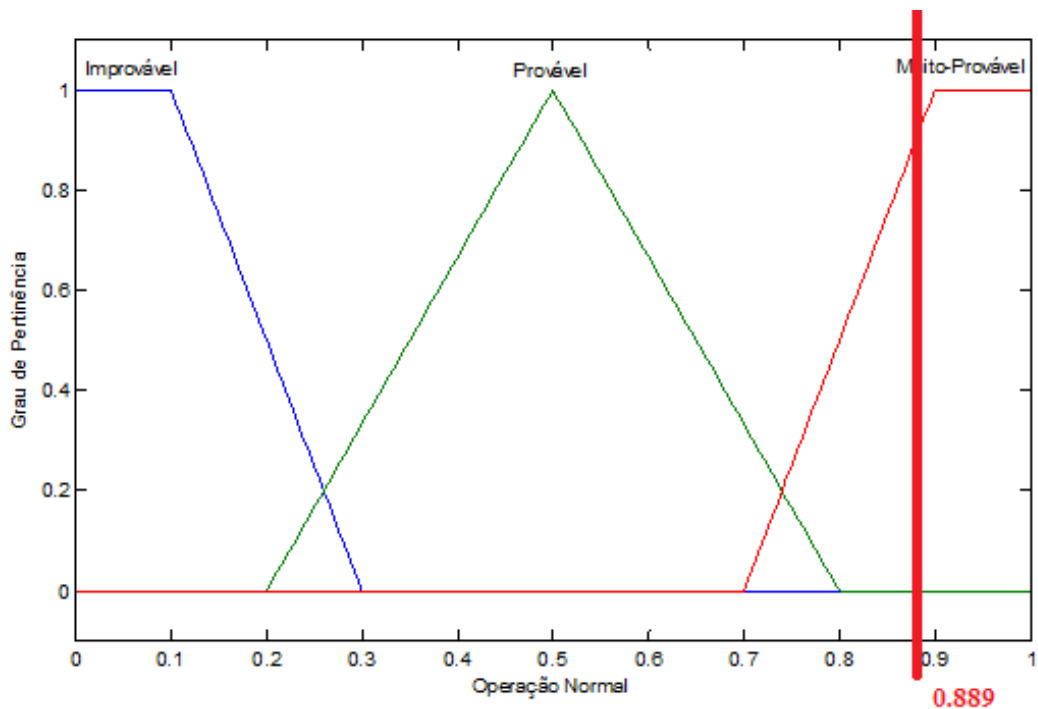


Figura 44 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.984).

6.6 ESTUDO DE CASO: FORA DE SERVIÇO

Procedendo para este estudo de caso onde o estado operativo do gerador é classificado como “Fora de Serviço”. Onde primeiramente o módulo de EC extrai os seguintes valores de tensão e corrente:

- Tensão Pós-Transitório: 0.001 P.U;
- Tensão Pré-Transitório: 0.001 P.U;
- Corrente Pós-Transitório: 0.005 P.U;
- Corrente Pré-Transitório: 0.005 P.U;

Procedendo com a mesma sistemática, para demonstrar a funcionalidade do sistema *fuzzy*, atribui-se os valores das variáveis de entrada como sendo os dados extraídos pelo módulo de EC.

Para este estudo de caso, o estado operativo do gerador (Fora de Serviço) foi obtido pela seguinte regra:

- Se a Tensão Pré-Transitório é a Tensão-Nula e a Tensão Pós-Transitório é a Tensão-Nula e a Corrente Pré-Transitório é I-Nula e a Corrente Pós-Transitório é I-Nula então a Energização é Improvável, Desligamento-Forçado é Improvável, Desenergização é Improvável, Corte de Carga é Improvável, Operação-Normal é Improvável e **Fora de Serviço é Muito Provável**.

Na Figura 44 têm-se os valores inseridos no sistema conforme extraídos pelo EC e mostra-se sua resposta através da variável de saída.

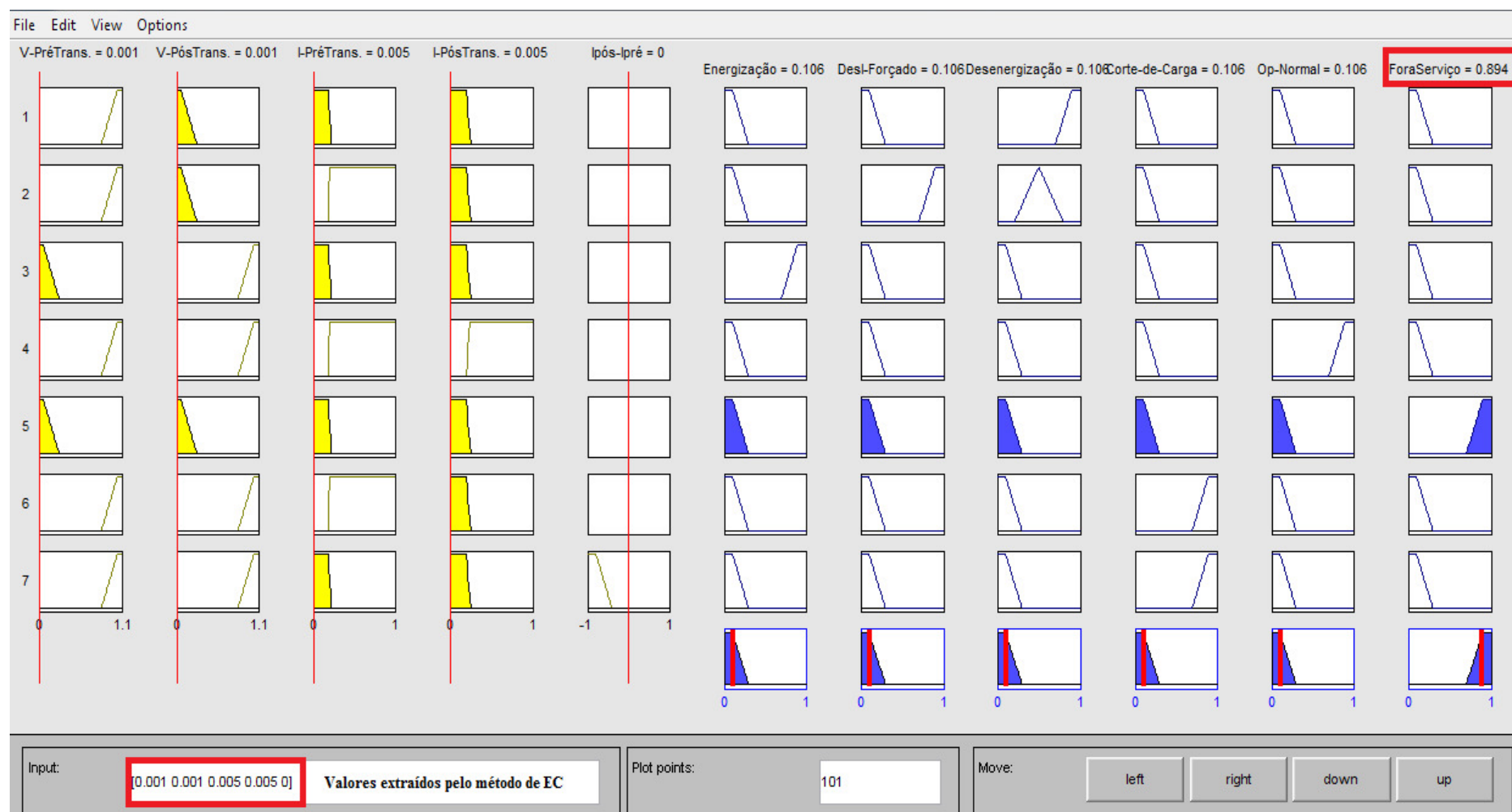


Figura 45 - Exemplo de simulação do sistema. Variáveis de entrada e de saída. Valor numérico de saída (0.894).

Assim de acordo com a Figura 44, aplicando-se o método do centro de gravidade, tem-se um valor numérico de saída (0.894), que nada mais é que a variável ainda no domínio *Fuzzy*. Se verificar novamente a Figura 24, pode-se fazer a “tradução” dessa variável de saída do domínio *fuzzy* para um valor numérico relacionado à qual função de pertinência representa esta variável de saída. O resultado será muito provável que seja Fora de Serviço o estado operativo do gerador e assim se completa a fuzzificação e consequentemente a tomada de decisão.

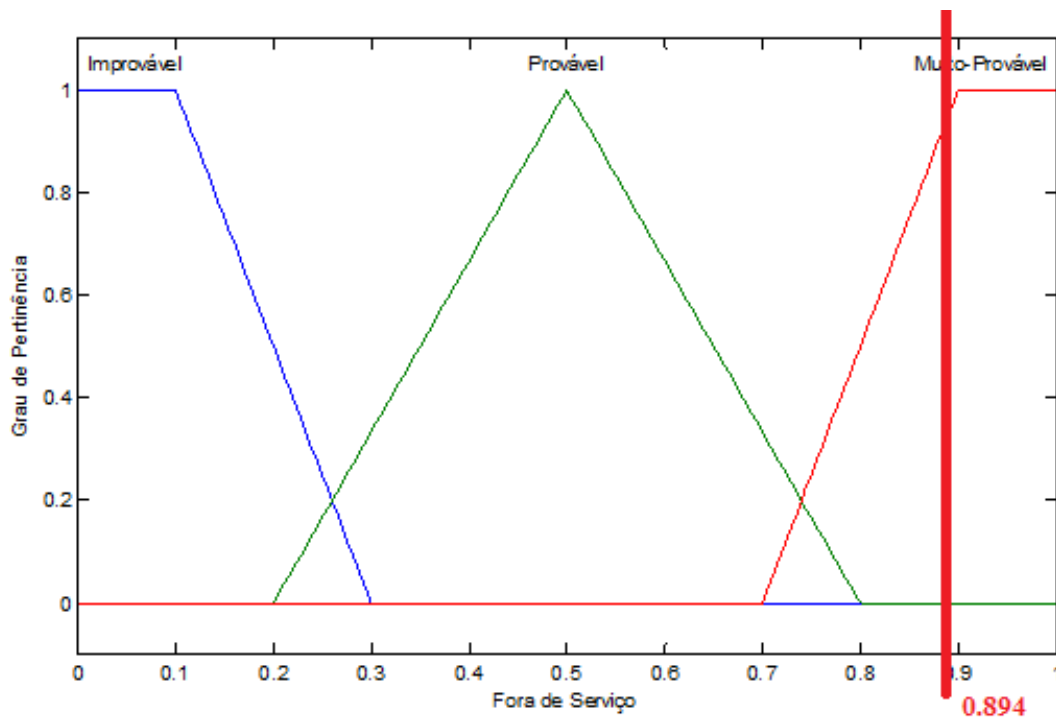


Figura 46 - Variável de saída e significado do valor da saída (0.984).

6.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com modelagens e simulações do sistema proposto, verifica-se que os resultados foram muito satisfatórios, tanto no uso da teoria *fuzzy*, quanto na classificação do estado operativo do gerador.

Também se pode verificar que foram implementados seis estudos de caso, sendo estes os principais estados de operação do gerador. Primeiramente são calculadas as características de operação (valores médios de corrente e tensão de sequência positiva) do gerador durante o registro através da aplicação do EC. Esses dados são posteriormente analisados pelo sistema *fuzzy* desenvolvido, obtendo assim a classificação quanto ao estado de operação do gerador.

Para demonstrar em termos quantitativos a funcionalidade do sistema *fuzzy*, além dos estudos de caso apresentados, utiliza dados de mais registros de oscilografias reais para testar o sistema, apresentando na Tabela 3 os resultados obtidos pelo sistema proposto e os resultados esperados para classificação do estado operativo do gerador. Onde primeiramente foram obtidos os valores médios de tensão e corrente pré e pós-transitórios de sequência positiva, respectivamente, e em seguida esses dados distintos foram atribuídos ao sistema *fuzzy*, com intuito de se efetuar a classificação do estado do gerador.

Analisando a Tabela 3 pode-se verificar que o sistema *fuzzy* se mostrou capaz de classificar com diferentes valores de tensão e corrente as possíveis saídas para a operação do gerador.

Demonstrando a classificação da Tabela 3, analisa-se para o primeiro caso: Classificação – MP (5).

Ou seja, depois de obtidos os valores de tensão e corrente, atribui-se estes valores no sistema *fuzzy*, tendo como valores das variáveis de saída os seguintes: Energização (0,111), Desligamento Forçado (0,111), Desenergização (0,111), Corte de Carga (0,111), **Operação Normal (0,888)**, Fora de Serviço (0,111). Com estes valores e analisando as Figuras (Funções de pertinência) referente as variáveis de saída pode-se “traduzir” a classificação do estado operativo do gerador. Neste caso analisado (MP (Muito Provável) (5 (número relacionado a variável de saída)) significa que muito provável que seja Operação Normal o estado de operação do gerador.

Tabela 3 – Valores das variáveis de Entrada obtidos pelo método de EC e Saída simulados no Sistema *Fuzzy*.

SIMULAÇÃO DO SISTEMA <i>FUZZY</i> PARA VALORES EXTRAÍDOS DO MÉTODO DE EC												
Valores extraídos pelo método de EC					Valores obtidos do sistema para classificação do Estado Operativo do Gerador							
V- Pré-Transitório	V Pós-Transitório	I Pré-Transitório	I Pós-Transitório	Variação da corrente	Energização (1)	Deslig. Forçado (2)	Desenergização (3)	Corte de Carga (4)	Operação Normal (5)	Fora de Serviço (6)	Resultado Obtido	Resultado Esperado
1,008	1,009	0,627	0,643	0,016	0,111	0,111	0,111	0,111	0,888	0,111	MP (5)	Op. Normal
0,005	1,004	0,013	0,013	0,000	0,889	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	MP (1)	Energização
0,002	0,002	0,005	0,003	-0,002	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,894	MP (6)	Fora de Serviço
1,011	1,004	0,377	0,582	0,205	0,112	0,112	0,112	0,112	0,886	0,112	MP (5)	Op. Normal
1,006	1,007	0,140	0,284	0,144	0,111	0,111	0,111	0,887	0,111	0,111	MP (4)	Corte de Carga
1,017	0,031	0,002	0,001	-0,001	0,111	0,111	0,9	0,011	0,111	0,111	MP (3)	Desenergização
0,936	0,017	0,008	0,004	-0,004	0,124	0,124	0,876	0,124	0,124	0,124	MP (3)	Desenergização
1,002	1,003	0,801	0,101	-0,700	0,112	0,889	0,112	0,112	0,112	0,112	MP (2)	Deslig. Forçado
0,000	0,000	0,002	0,000	-0,002	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,894	MP (6)	For a de Serviço
0,000	0,000	0,006	0,001	-0,005	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,894	MP (6)	For a de Serviço
0,939	1,002	0,657	0,516	-0,141	0,123	0,123	0,123	0,123	0,876	0,123	MP (5)	Op. Normal
1,019	1,020	0,715	0,020	-0,695	0,109	0,109	0,109	0,891	0,109	0,109	MP (4)	Corte de Carga

7. CONCLUSÕES

Considerando os vários fatores que influenciam no estado operativo do gerador, pode-se gerenciar e analisar esses possíveis estados de operação, através do uso de teoria *fuzzy*.

Como verificado mesmo fazendo somente o uso do registro de longa duração, sendo bem estruturado, podem ser utilizados para auxiliar o engenheiro analista na seleção dos registros oscilográficos que não necessitam de análise, diminuindo assim seu tempo nestes casos insignificantes.

Com os estudos, modelagens e simulações do sistema proposto, verifica-se que os resultados foram muito satisfatórios, tanto no uso da teoria *fuzzy*, quanto na classificação do estado operativo do gerador.

A utilização da Teoria *Fuzzy* permite identificar e implementar em um sistema *fuzzy* a experiência do especialista e sua forma de decidir sobre o problema em questão. Uma pessoa considerada experiente acumula um maior número de observações anteriores que utiliza na formulação de previsões sobre o processo.

Desta forma, a grande vantagem da utilização da teoria *fuzzy* é a possibilidade de modelar e manipular matematicamente informações vagas, imprecisas e intermitentes, naturais da linguagem humana, e que são fornecidas pelos especialistas, não matemáticos, para caracterizar os processos estudados.

Esta manipulação pode ser facilmente feita a partir da junção das variáveis escolhidas para modelar matematicamente o sistema proposto, quando a implicação das variáveis independentes nas dependentes é estabelecida por um conjunto de regras linguísticas baseadas no conhecimento de especialistas.

A intenção de obter do sistema *fuzzy* um comportamento semelhante ao do ser humano foi atingida, visto que ele mostra as respostas esperadas, considerando válidas as características das funções de pertinência e regras que lhe foram atribuídas. O que se pode constatar é que o sistema *fuzzy*, possibilita-nos controlar e gerenciar um sistema de pré-análise de oscilografias voltadas para geração.

A base de regras utilizando lógica *fuzzy* deixou o sistema já existente mais confiável e robusto. A disponibilidade de dados reais permitiram que os testes pudessem ser realizados sem o auxílio de simulações, tornando a implementação mais realista.

Nota-se, no entanto que se pode aumentar ainda mais a confiabilidade do sistema, com inúmeros testes e simulações para os limites das funções de pertinência das variáveis de

entrada e saída, podendo então chegar a classificação do estado de operação do gerador o mais confiável e robusto possível.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se realizar estes testes do sistema *fuzzy*, aumentar quantitativamente as variáveis de saída, visando aumentar o número de casos que podem ser obtidos quanto a classificação do estado operativo do gerador.

8. REFERÊNCIAS

ANTUNES, Fabio A. D. S.; SILVEIRA, Paulo M. Sistema de Diagnóstico de Perturbações em Tempo real. **XI EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação**, Florianópolis - SC, 22 a 26 Novembro 2010.

BARROS, Ana C. **Deteção e Classificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas Elétricos de Potência Usando Lógica Fuzzy**. Ilha Solteira - SP: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNESP, 2009.

BRAGA, M. J. F., BARRETO, J. M., MACHADO, M. A. S., 1995, **Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Risco**, Rio de Janeiro, Artes & Rabiscus.

CAMPOS, Mario M. D.; SAITO, Kaku. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, v. 1, 2004.

CRUZ, L. F. **Modelo Fuzzy para Obtenção do Tempo de Aeração em Silos Verticais Visando Reduzir o Consumo de Energia Elétrica**. 2001. 102 f. Tese (Doutorado) - Unesp - Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

JANÉ, Dario D. A. **Uma Introdução ao Estudo da Lógica Fuzzy**. Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas, Ourinhos - SP, 2004. ISSN 02.

LOPES, M. M. **Previsão de cargas elétricas de energia elétrica**. Tese de Doutorado, Ilha Solteira , 2005. 169.

KEZUNOVIC, M.(2004). **Intelligent applications in substations: Disturbance analysis**. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Vol. 1, Denver, USA, pp. 719–723.

MAMDANI, E.H. (1974)."**Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant**". *Proceedings of the IEE (Control and Science)*, Vol. 121: 298-316.

MARTINEZ, J. K., *et alii*. (2008). **Fault and Disturbance Data Analysis Including Intelligent Systems**. Report 355, Working Group B5.03, CIGRE.

MORETO, M. **Análise Automática de Registros Digitais de Perturbações em Unidades Geradoras**. 2011. 194cf. Tese (Doutorado) - UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

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

MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. **Análise Automática de Oscilografias em Sistemas Elétricos de Potência**, Florianópolis -SC, 04 23 2009. 16.

OLIVEIRA, S.R. **Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações**. Editora Manole Ltda, 2003.

ONS (2002a). **Oscilografia de Curta e Longa Duração**, Brasília, Brasil. Procedimentos de Rede, Submódulo 11.6.

ONS (2002b). **Requisitos Minimos dos Sistemas de Proteção, Supervisão/Controle e de Telecomunicações**, Brasília, Brasil. Procedimentos de Rede, Submódulo 2.5.

SILER, Willian; BUCKLEY, James J. **Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning**. Canada: Jonh Wiley & Sons, 2005.

SILVA, Marco Antonio Batista Da. **Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas**. 2005. 221 f. Tese (Doutorado) - UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G., 2001, **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2 ed. São Paulo.

TAKAGI, T. & SUGENO, M. (1985). **Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control"**. IEEE Trans. on Systems, Man & Cybernetics, Vol. 15: 116-132.

TERANO, T., ASAI, K., SUGENO, M., 1991, **Fuzzy Systems Theory and Its Applications**, U.S.A., Academic Press Inc.

TURKSEN, I. B., 1984, "Measurement of Fuzziness: Interpretation of The Axioms of Measure", Conference on Fuzzy Information and Knowledge Representation for Decision Analysis, IFAC, Oxford, pp. 97-102.

VARELA, Fernando et al. **Sistema de Pré-análise e Gestão de Perturbações e Oscilografias Voltado para Geração**, BÉlem - PA, 22 a 24 Junho 2009. 10.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets: Information and Control**. [S.l.]: Berkeley : Elsevier, v. 3, 1965. p. 239 - 354.