

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO**

Matheus Sebastian Telles

**SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA
DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Prof. Dr. Jovelino Falqueto

Florianópolis, Agosto de 2005

SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Matheus Sebastian Telles

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação Área de Concentração Sistemas de Computação e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Prof. Dr. Raul Sidnei Wazlawick
Coordenador do Curso de Pós Graduação em
Ciências da Computação

Prof. Dr. Jovelino Falqueto
(orientador)

Banca Examinadora

Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Borges

Prof. Dr. Germano Lambert Torres

Prof. Dr. João Bosco Mangureira Sobral

O temor do Senhor é o princípio da sabedoria e o conhecimento do Santo é o entendimento.

O que adquire a sabedoria é amigo de si mesmo e o que guarda o entendimento prosperará.

Salomão (Provérbios)

Ao único Deus salvador, por Jesus Cristo nosso Senhor, seja tributada toda honra, glória, majestade, domínio e poder, antes de todos os séculos, e para todo o sempre.

A minha família pelo apoio e confiança a mim depositado, e pelo esforço para minha educação.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guardado com saúde, me ajudado nos momentos mais críticos e por ter me capacitado para vencer as dificuldades e superar os desafios. Sem sua ajuda e capacitação seria impossível ter concluído este trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Jovelino Falqueto, pelo apoio, incentivo, confiança e pela amizade, com quem pude contar em todos os momentos durante a elaboração deste trabalho.

Ao professor Dr. João Bosco Manguiera Sobral pela dedicação, apoio e amizade dispensados durante o curso.

Ao engenheiro Jaime Suñe, pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos professores Msc. Juan Carlos Sotuyo e Msc. Jorge Habib Hanna El Khouri, mentores do curso de ciência da computação da Unioeste, exemplos de dedicação, determinação e conduta profissional.

Aos meus amigos, pelo apoio e incentivo. Em particular, ao Roberto Gil Brasil, Eliandro Jakubski, Michelle Barbarossa, Debora Bertasi e a Edeltraut Eyng Thiel, que tanto me incentivaram e ajudaram nesta jornada.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas.....	viii
Resumo	ix
Abstract	x
1 Introdução	1
1.1 <i>Importância e Relevância do Tema</i>	2
1.2 <i>Objetivos</i>	4
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.3 <i>Estrutura do Trabalho</i>	5
2 Inteligência Artificial.....	7
2.1 <i>Introdução</i>	7
2.1.1 <i>Definição</i>	7
2.1.2 <i>Histórico</i>	8
2.1.3 <i>Métodos de Abordagens da IA</i>	10
2.2 <i>Sistemas Especialistas</i>	14
2.2.1 <i>Sistemas Especialistas x Sistema Convencionais</i>	15
2.2.2 <i>Benefícios e Limitações</i>	16
2.2.3 <i>Estrutura dos Sistemas Especialistas</i>	17
<i>Base do Conhecimento</i>	18
<i>Motor de Inferência</i>	22
3 Conjuntos Fuzzy	25
3.1 <i>Introdução</i>	25
3.2 <i>Fundamentos</i>	26
3.2.1 <i>Teoria dos Conjuntos Tradicionais</i>	27
3.2.2 <i>Teoria dos Conjuntos Fuzzy</i>	29

3.2.3	Tipos de Funções de Pertinência	31
3.3	<i>Operações com Conjuntos Fuzzy</i>	33
3.4	<i>Variáveis Lingüísticas</i>	35
3.5	<i>Sistema de Inferência Fuzzy</i>	38
4	Análise e Diagnóstico de Transformadores	41
4.1	<i>Introdução</i>	41
4.2	<i>Definições e conceitos</i>	41
4.3	<i>Transformadores de Itaipu</i>	44
4.4	<i>Análise da Situação Operativa do Transformador</i>	45
4.5	<i>Diagnóstico a Partir da Análise dos Gases Dissolvidos</i>	47
4.5.1	Normas e Métodos utilizados para Diagnóstico	48
	Processo de Análise e Diagnóstico	48
4.6	<i>Sistema de Supervisão e Diagnóstico dos Equipamentos de Transmissão</i>	51
5	Proposta e Desenvolvimento do Sistema	53
5.1	<i>Introdução</i>	53
5.2	<i>Ferramenta de Implementação do Sistema</i>	54
5.3	<i>Aquisição do Conhecimento e Forma de Representação</i>	60
5.4	<i>Projeto Sistema Especialista Fuzzy</i>	61
5.5	<i>Sistema: Módulo Rogers</i>	63
5.5.1	Dados de Entrada do Módulo Rogers.....	65
5.5.2	Base de Conhecimento	66
5.6	<i>Sistema: Módulo Gás-Chave</i>	72
5.6.1	Dados de Entrada.....	74
5.6.2	Base de Conhecimento	75
5.6.3	“Fuzzyficação”	75
5.6.4	“Defuzzyficação”.....	81
5.7	<i>Sistema: Módulo Gás-Chave Rogers</i>	83
5.7.1	Dados de Entrada.....	83
5.7.2	Base de Conhecimento	84
5.8	<i>Verificação e Exemplo de Aplicação</i>	88
5.9	<i>Testes do Sistema</i>	92
5.9.1	Testes com dados reais	104
6	Conclusão	109
6.1	<i>Análise do Trabalho Proposto</i>	109
6.2	<i>Conclusão e Trabalhos Futuros</i>	111
	Bibliografia	114

Anexo A – Classe XDGAModel.java	124
Anexo B – Projeto Classes	126
Anexo C – Código XFL Módulo Rogers.....	128
Anexo D – Código XFL Módulo Gás-Chave.....	132
Anexo E – Código XFL Módulo Gás-Chave Rogers	134
Anexo F – Gráficos Gás-Chave	137
Anexo G – Interface da Aplicação	140

Lista de Figuras

Figura 1.	Projeção da Carga de Energia, MW médio. Cenário de referência.	3
Figura 2.	Estrutura Sistemas Especialistas. Adaptado de FERNANDES(2003). 18	
Figura 3.	Forma geral de regra de produção. Adaptado de BAPTISTA (2000). 20	
Figura 4.	Exemplo de regra de produção. Adaptado de BAPTISTA (2000).....	20
Figura 5.	Modelo de rede semântica. Adaptado de BAPTISTA (2000).....	20
Figura 6.	Exemplo de rede semântica.	21
Figura 7.	Modelo de frame. Adaptado de BAPTISTA (2000)	21
Figura 8.	Exemplo de frame. Adaptado de OSTELINO (2003)	22
Figura 9.	Conjuntos Clássicos X Conjuntos Fuzzy (NAGANIME, 2001).....	27
Figura 10.	Exemplo de função de pertinência (NAGANIME, 2001).....	29
Figura 11.	Representação de função linear	31
Figura 12.	Representação de função triangular	32
Figura 13.	Representação de função sigmóide	32
Figura 14.	Representação de função trapezoidal	33
Figura 15.	Representação de função exponencial	33
Figura 16.	Exemplo de variáveis lingüísticas (PEDRYCZ,1998).....	36
Figura 17.	Partições Fuzzy - granularidade. Adaptado de PEDRYCZ (1998)	37
Figura 18.	Sistema de Inferência Fuzzy (TANSCHKEIT, 2004).....	38

Figura 19. Figura esquemática de um transformador de potência (EXTREMADURA, 2001)	43
Figura 20. Transformador 525 kV, 50 Hz, 265 MVA monofásico.....	44
Figura 21. Módulos da ferramenta Xfuzzy (XFUZZY, 2004).....	55
Figura 22. Xfedit –Tela principal do XFuzzy.....	56
Figura 23. Xfpkg – Tela para edição de pacotes do Xfuzzy	56
Figura 24. Xf2dplot – Representação gráfica em duas dimensões.	57
Figura 25. Xf3dplot – Representação gráfica em três dimensões.....	57
Figura 26. Xfmt – Monitora o comportamento do sistema	58
Figura 27. Xfsim – Efetua testes no sistema através de simulações	59
Figura 28. Xfsl – Permite fazer ajustes nos sistemas	60
Figura 29. Projeto Sistema Especialista Fuzzy.....	61
Figura 30. Classe DGA	63
Figura 31. Representação do Módulo Rogers no Xfuzzy	64
Figura 32. Representação do Módulo Gás-Chave no Xfuzzy	73
Figura 33. Ilustração do processo de “Fuzzyficação”.....	76
Figura 34. Funções de pertinência do gás metano - CH₄.....	77
Figura 35. Funções de pertinência do gás hidrogênio – H₂	78
Figura 36. Funções de pertinência do gás monóxido de carbono – CO	78
Figura 37. Funções de pertinência do gás etano – C₂H₆.....	79
Figura 38. Funções de pertinência do gás etileno - C₂H₄	80

Figura 39. Funções de pertinência do gás acetileno – C₂H₂	80
Figura 40. Representação do módulo Gás-Chave Rogers no Xfuzzy	83
Figura 41. Resultado do diagnóstico do Módulo Rogers.....	90
Figura 42. Pertinência de cada gás do Módulo Gás-Chave.....	91
Figura 43. Pertinência das regras do Módulo Gás-Chave.....	91
Figura 44. Pertinência das regras do Módulo Gás-Chave Rogers.....	92
Figura 45. Resultado: Caso de teste 1	95
Figura 46. Resultado: Caso de teste 2	96
Figura 47. Resultado: Caso de teste 3	98
Figura 48. Resultado: Caso de teste 4	99
Figura 49. Resultado: Caso de teste 8	101
Figura 50. Resultado: Caso de teste 10	103
Figura 51. Projeto de classes	126
Figura 52. Classes geradas pelo Xfuzzy	127
Figura 53. Arco no óleo.....	137
Figura 54. Descargas parciais	137
Figura 55. Óleo superaquecido	138
Figura 56. Celulose superaquecida.....	138
Figura 57. Eletrólise	139
Figura 58. Tela principal da aplicação.....	140

Lista de Tabelas

Tabela 1.	Propriedades das operações sobre conjuntos (FABRI, 2001).	29
Tabela 2.	Gás medido e sensibilidade de cada gás (SUÑE, 2001)	47
Tabela 3.	Relações propostas pelo critério Rogers. Adaptado de SUÑE (2001)..	49
Tabela 4.	Diagnósticos do critério Rogers. Adaptado de SUÑE (2001).....	50
Tabela 5.	Exemplo de combinação não atendida pelo critério Rogers.....	51
Tabela 6.	Dados de entrada Módulo Rogers - relações dos gases	65
Tabela 7.	Tabela de diagnósticos - Módulo Rogers.....	66
Tabela 8.	Regras para definição de diagnósticos do Módulo Rogers	72
Tabela 9.	Exemplo de situação com diagnósticos conflitantes	72
Tabela 10.	Dados entrada Módulo Gás-Chave.....	74
Tabela 11.	Base conhecimento Módulo Gás-Chave	75
Tabela 12.	Valores dos gases para cada diagnóstico	75
Tabela 13.	Valor dos gases obtidos no ensaio	89
Tabela 14.	Valor da relação entre os gases	89
Tabela 15.	Percentual dos gases	90
Tabela 16.	Casos de teste do sistema	93
Tabela 17.	Valores reais de ensaios de cromatografia	106
Tabela 18.	Valor das relações dos dados reais.....	106
Tabela 19.	Resultados dos testes. Sistema proposto X Sistema Atual	107

Lista de Abreviaturas

IA	Inteligência Artificial
IAS	Inteligência Artificial Simbólica
IAC	Inteligência Artificial Conexionista
IAE	Inteligência Artificial Evolutiva/Evolucionária
SE	Sistemas Especialistas
RNA	Redes Neurais Artificiais
AG	Algoritmos Genéticos
DGA	Análise dos Gases Dissolvidos (Dissolved Gas Analysis)
AFQ	Análise Físico Química
GC	Gás-Chave
TCA	Teoria dos Conjuntos Aproximados
SSD ...	Sistema de Supervisão e Diagnóstico de Equipamentos de Transmissão

Resumo

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um Sistema Especialista Fuzzy como proposta de solução computacional para automatizar o processo de análise e diagnóstico dos transformadores de potência em geral e, de modo especial, o método atualmente adotado na usina hidrelétrica de Itaipu. O método de ensaio, que determina a situação operativa do transformador, implementado neste trabalho é o método de Análise dos Gases Dissolvidos sobre o óleo mineral isolante. A premissa deste método de ensaio é quantificar os gases dissolvidos e, a partir de normas e critérios padrões, definir a condição operativa do equipamento.

Este trabalho vem ao encontro de necessidade da área de engenharia da empresa em automatizar o processo de análise e diagnóstico dos equipamentos e obter dados mais precisos sobre a real condição dos transformadores. Outro benefício almejado é levar o conhecimento do nível individual para o corporativo, permitindo que na chegada de novos empregados, estes possam utilizar o conhecimento, que estará presente na ferramenta computacional a ser gerada com este trabalho.

Os experimentos foram praticados sobre os dados de histórico de ensaios dos transformadores, realizados pelo laboratório de eletro-eletrônica de Itaipu. Os resultados obtidos destes experimentos determinaram resultados mais precisos sobre o estado dos transformadores, além de agilizar o processo e possibilitar aos não-especialistas realizar ensaios e determinar o diagnóstico dos equipamentos.

Abstract

This work describes the development of a Fuzzy Expert System as a proposed method for automating the analysis and diagnosis of power transformers in general, and specifically the method currently used in the Itaipu hydroelectric plant. The testing method, which determines the operational status of the transformer, implemented in this research is the analysis of dissolved gases performed on isolating mineral oil. The purpose of this method is to quantify the dissolved gases and, by means of standard rules and requirements, define the operational status of the equipment.

This research is oriented toward the engineering requirements of the company to automate the process of analysis and diagnosis of the equipment and obtain more precise data about the true condition of the transformers. Another desired benefit is to bring the knowledge from the individual to the corporate level, allowing new employees to utilize the knowledge, as it will be present in the computational tool developed through this research.

Experiments were performed on historical data from transformer tests, obtained through the electro-electronic lab at Itaipu. The results obtained through these experiments are more precise in respect to the state of the transformers, and, in addition, simplify the process and make it possible for non-specialists to perform tests and determine the status of the equipment.

1 Introdução

A geração de energia elétrica de qualidade é parte da missão de Itaipu (ITAIPU, 2005). Assim, assegurar a disponibilidade dos equipamentos de geração e transmissão é fundamental para atingir sua missão. Porém, esta disponibilidade somente será alcançada com uma boa política de manutenção.

A confiabilidade dos equipamentos e a política de manutenção eficiente, tem sido de grande importância para a Itaipu. Motivo pelo qual a empresa tem empregado esforço no aprimoramento dos métodos de manutenção, procurando acompanhar as evoluções junto aos centros de pesquisa e inclusive investir e apoiar pesquisas nesta área, na própria instituição.

Dentro da política de manutenção da empresa, está o controle do estado operativo dos transformadores de potência. Atualmente, a manutenção destes equipamentos é realizada através de métodos de ensaio que resultam no diagnóstico de sua condição operativa, entre eles o método de Análise dos Gases Dissolvidos (NBR 7274, 1981).

Este método de análise está entre os que melhor indicam o desempenho dos transformadores. Segundo Milasch (1984), “a análise dos resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia é um método eficiente para verificação das condições operativas de um transformador que tenha sua parte ativa imersa em óleo isolante”.

Portanto, a premissa deste método de ensaio é avaliar quantitativamente os gases dissolvidos no óleo isolante, que põem em risco a integridade do transformador, podendo levá-lo à explosão.

Embora existam diversas normas e padrões para diagnosticar o estado do transformador a partir dos gases dissolvidos, elas apresentam falhas, impossibilitando assim a definição de diagnósticos para todas situações.

Em seu trabalho, Suñe (2001) discorreu sobre este assunto, demonstrando as falhas nos métodos e critérios de análise. Além disto, apresentou uma solução para atenuar estas falhas.

Entretanto, a solução tornou-se complexa devido à quantidade de regras e condições e pela necessidade do uso de Conjuntos Fuzzy. Desta forma, este novo processo tornou-se trabalhoso além de exigir muito tempo para uma pessoa realizá-lo sem uma ferramenta.

Neste cenário, torna-se vantajoso o uso de uma ferramenta computacional.

Assim sendo, a proposta deste trabalho é construir um Sistema Especialista Fuzzy para diagnóstico de transformadores de potência, baseado nos conhecimentos científicos disponíveis nas bibliografias e nas tabelas de conhecimento, fornecidas pelas entidades normativas. Além disto, constituirão elementos adicionais os conhecimentos técnicos, a experiência dos especialistas de Itaipu e principalmente os aprimoramentos nas tabelas de conhecimento dos critérios de diagnóstico do método de Análise dos Gases Dissolvidos, propostos por Suñe (2001).

O sistema proposto visa possibilitar um diagnóstico mais preciso da condição operativa dos transformadores, diminuindo o risco de falhas, melhorando o tempo de disponibilidade do equipamento e aumentando sua vida útil, sem sobrecarga de esforço da equipe técnica.

Além dos benefícios já mencionados, o conhecimento das técnicas de análise, bem como o de suas melhorias, deixa de ser restrito e se torna corporativo. Como adendo a este sistema, um conjunto de documentos de consulta e manuais serão disponibilizados à empresa. Assim, este conhecimento é passado aos demais engenheiros e aos futuros.

1.1 Importância e Relevância do Tema

Atualmente, a Usina Hidrelétrica de Itaipu responde por aproximadamente 25% da energia consumida pelo Brasil e por mais de 90% da energia consumida pelo Paraguai. A potência total instalada na usina corresponde a 12.600 MW com 18 unidades geradoras de 700 MW. Pretende-se instalar no sistema, ainda este ano de 2005, mais duas unidades geradoras, elevando para 14.000 MW a potência total instalada.

O investimento total da obra, atualizado em 1995, foi de US\$ 11.674.655.000 (ITAIPU, 2005). O faturamento anual, considerando o preço da energia definido em US\$ 19,2071 o KW/h (ANEEL, 2005) e uma produção anual média de 90 milhões de MW/h (ITAIPU, 2005), ultrapassa os US\$ 2.000.000.000,00.

Mesmo sendo responsável por aproximadamente 25% da energia consumida no país, com o crescimento econômico atual e as taxas de crescimento previstas para os próximos anos, o aumento pela demanda de energia crescerá gradativamente (ONS, 2005), exigindo maior capacidade de geração do setor elétrico.

A Figura 1 apresenta a última revisão da projeção de carga (MW médio) para os próximos 4 anos, elaborado pelo Comitê Técnico para Estudos de Mercado da Eletrobrás.

Sistema Interligado Nacional														
ANO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan-Dez	Cresc.(%)
2004	42324	42983	44282	43879	42725	42628	42757	43768	44152	44875	44819	44413	43634	4,5
2005	44460	45516	46266	45864	45495	45342	45527	46152	46432	47193	47133	46684	46004	5,4
2006	46467	47569	48351	47932	47547	47388	47582	48235	48528	49322	49261	48792	48081	4,5
2007	48727	49881	50701	50261	49856	49688	49893	50577	50887	51723	51662	51172	50418	4,9
2008	51801	53020	53883	53427	53012	52839	53060	53787	54120	54994	54925	54398	53606	6,3

Figura 1. Projeção da Carga de Energia(MW médio). Cenário de referência.

Por esses motivos, a Itaipu é um órgão estratégico para os países sócios, além de fundamental para o desenvolvimento social e vital para a continuidade do crescimento econômico.

Para responder a esta responsabilidade e manter o compromisso do contrato de geração de energia, é imprescindível que seja garantida a disponibilidade dos equipamentos, sem o comprometimento de seu estado operativo. Isto se consegue através de métodos adequados de manutenção.

Uma manutenção planejada contribui para a maior disponibilidade dos equipamentos ao tempo que reduz o risco de interrupção de energia. Assim, a intervenção nos equipamentos ocorrerá somente em casos necessários e se realizará no menor tempo possível.

Outro fator que reforça ainda mais as justificativas dos investimentos em manutenção é o custo dos equipamentos. Como exemplo, pode ser citado o valor de um Transformador Elevador Monofásico 525kV 60Hz da BBC Brown Boveri S/A, cujo preço fica em torno de US\$ 3.000.000,00, segundo dados da

área técnica de Itaipu. Como cada unidade geradora possui três, o banco de transformadores, para as 18 unidades geradoras perfaz um total 54 transformadores, sendo 27 de 60Hz e 27 de 50Hz, um investimento de U\$ 162.000.000,00.

Esses fatores ressaltam a importância das atividades de manutenção, sendo desenvolvidas com o objetivo de melhorar o desempenho do equipamento e aumentar sua vida útil, postergando ao máximo os investimentos em equipamentos para reposição.

Além dos problemas já mencionados, no panorama atual das empresas, a diminuição do número de empregados é evidente. Isto se torna mais agravante para Itaipu que, em 5 anos terá mais da metade de seus profissionais se desligando da empresa, seja por aposentadoria ou por planos de demissão incentivada. Contrariamente a esta tendência, as exigências de confiabilidade, segurança e redução de custos são crescentes, o que torna de grande importância o conhecimento e a experiência dos especialistas.

A fim de que esta experiência seja usada de forma ampla por todos os envolvidos na manutenção de transformadores e pelos futuros empregados, ela deve estar disponível para toda corporação. Com o desenvolvimento do sistema proposto isto será facilitado, pois o conhecimento especializado será extraído e disponibilizado no próprio sistema e nos documentos relacionados ao desenvolvimento do mesmo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo estudar e propor uma solução computacional para automatizar o processo de análise e diagnóstico da condição operativa dos transformadores de potência em geral, em especial os da Central Hidrelétrica de Itaipu.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como resultado da pesquisa, deverá ser construído um Sistema Especialista Fuzzy para diagnóstico de transformadores, que permita diagnosticar a condição operativa dos equipamentos de acordo com os dados obtidos no ensaio de gás-cromatografia.

Esse sistema deve implementar as melhorias sugeridas por Suñe (2001) sobre o critério de Rogers (SCM; NBR 7274, 1981) para o método de análise dos gases dissolvidos. As melhorias mencionadas exigem que outro método de análise seja implementado, o critério de gás-chave (NBR 7274, 1981).

O sistema deve proporcionar maior agilidade na obtenção dos diagnósticos, além de resultados mais precisos quanto à condição operativa dos equipamentos, atendendo às necessidades empresariais.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução, importância e relevância do tema, objetivo geral e objetivos específicos, finalizando com apresentação e estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Apresenta as definições e conceitos relacionados ao tema de Sistemas Especialistas. Começa com uma introdução sobre Inteligência Artificial e seus métodos de abordagem. Em seguida, trata sobre os sistemas especialistas, suas diferenças, vantagens e encerra apresentando sua estrutura.

Capítulo 3 – Continuando a fundamentação teórica, este capítulo aborda a teoria dos Conjuntos Fuzzy, apresentando seus fundamentos, funções, operações, encerrando com o modelo do Sistema de Inferência Fuzzy.

Capítulo 4 – Este capítulo apresenta as definições e os conceitos sobre manutenção dos transformadores de potência, os métodos de análise e

diagnóstico, o parque de transformadores de Itaipu, as normas e padrões utilizados bem como o processo de análise da condição operativa do equipamento e encerra definindo o domínio da aplicação proposta.

Capítulo 5 – Proposta e Desenvolvimento do Sistema: as etapas do desenvolvimento da aplicação são apresentadas neste capítulo. Inicia-se com uma introdução e com a seleção da ferramenta para construção do sistema. A seguir, são definidas as técnicas para aquisição do conhecimento bem como sua forma de representação. O projeto do sistema é apresentado na seção seguinte e, na seqüência, a descrição de implementação de cada módulo definido no projeto. No decorrer da explicação de cada módulo, são mencionadas as melhorias do processo de análise. O capítulo encerra com a apresentação de um exemplo de uso da ferramenta e com os casos de testes definidos e processados na aplicação, bem como os resultados desses testes.

Capítulo 6 – Análise do Trabalho Proposto: apresenta uma análise sobre todo o trabalho, com ênfase nos resultados gerados pela ferramenta proposta.

Capítulo 7 – Conclusão e Trabalhos Futuros: este capítulo trata sobre os objetivos alcançados, as deficiências e sugestões de melhoria da aplicação, além de sugerir futuros trabalhos.

2 Inteligência Artificial

2.1 Introdução

O termo Inteligência Artificial (IA) foi utilizado pela primeira vez por volta de 1956 por John McCarty, durante o encontro no “Dartmouth College”. Segundo ele, seriam inteligentes os computadores que pudessem imitar as funções do cérebro humano (BARRETO, 2001).

Durante os anos que se seguiram, esta área tem despertado cada vez mais interesse entre os pesquisadores, que buscam formas de atribuir aos computadores a capacidade cognitiva do homem, ou seja, emular comportamento do cérebro humano. O emprego da IA tem despontado nas áreas onde outros métodos como o numérico, estatístico, entre outros, não têm sido suficientes ou têm apresentado soluções inadequadas. O problema atacado neste trabalho se enquadra nestas hipóteses.

2.1.1 Definição

Atualmente, existem diversas definições para Inteligência Artificial, umas mais genéricas e outras mais específicas. A seguir são apresentadas algumas que mais se aproximam do escopo aqui almejado:

“A inteligência artificial é um campo científico preocupado com a criação de sistemas computadorizados que podem atingir níveis humanos de raciocínio. Mais precisamente a IA é o ramo da informática que enfoca o desenvolvimento de programas de computadores capazes de desempenhar tarefas normalmente associadas ao comportamento humano inteligente” (CHORAFAS, 1988).

“Inteligência Artificial é a parte da computação que estuda o projeto de sistemas computacionais inteligentes, isto é, com características que

associamos como inteligentes no comportamento humano” (VIEIRA, 1996).

“Inteligência Artificial é o estudo de como fazer os computadores realizarem tarefas em que, no momento, as pessoas são melhores”. (RICH, 1998)

Observando as definições citadas, verifica-se o objetivo da IA em dotar máquinas de comportamento inteligente, capazes de realizar tarefas que, atualmente, seres humanos realizam melhor.

Verifica-se ainda que, além do aspecto tecnológico, esta área tem sua parte científica que estuda o comportamento do cérebro humano. Isto se deve ao fato da IA tentar imitar o comportamento do cérebro humano.

2.1.2 Histórico

Embora discussões sobre o tema já ocorriam antes da década de 50, somente em 1956, na conferência no “Dartmouth College” o termo foi pela primeira vez empregado oficialmente. O trabalho que deu origem à expressão IA foi elaborado por John McCarty, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester e Claude Shannon, cuja proposta era “realizar um estudo sobre o tópico de Inteligência Artificial” (BITTENCOURT, 2003).

Esse encontro e o livro *Automata Studies*[SHANNON, 1956], marcam o nascimento simultâneo de dois paradigmas da inteligência artificial, conexionista e simbólica(BARRETO, 2001). A primeira, busca no comportamento da mente humana a solução para atribuir inteligência a computadores. Os pioneiros deste paradigma foram McCulloch e Pitts (MCCULLOCH, 1943), que propuseram um modelo matemático para o neurônio, que mais tarde evoluiria para um modelo de redes, originando as Redes Neurais Artificiais

Já a corrente simbólica teve como seus primeiros pesquisadores McCarty e Newell. No princípio, os pesquisadores buscavam uma forma de construir um mecanismo capaz de resolver qualquer tipo de problema. Assim

sendo, um dos primeiros trabalhos foi o GPS (General Problem Solver), apresentado em 1963, por Allen Newel e Herbert A. Simon (NEWEL, 1963).

Para estruturar melhor o histórico da IA e facilitar a compreensão, este foi dividido em épocas, conforme pode ser visto em BARRETO (2001).

- Época pré-histórica

Encerra-se em 1875 com o descobrimento do neurônio por Camillo Golgi.

- Época Antiga

Começava a busca pelo entendimento da inteligência humana. Nessa época, Hilbert imaginava um mundo em que tudo poderia ser “axomatizado” e reduzido à lógica. Mas Gödel abala esta idéia com seu teorema da incompletude aritmética. Além do surgimento da lógica formal, neste período ainda foram estabelecidos os fundamentos do que seria Inteligência Artificial Simbólica (IAS) e da Inteligência Artificial Conexionista (IAC). O marco final desta época é a publicação do trabalho de McCulloch e Pitts, que apresenta o modelo do neurônio em 1943.

- Época Romântica

Época de grande entusiasmo, marcado pelo nascimento da cibernética, dos primeiros programas com comportamento inteligente e dos primeiros mecanismos imitando o funcionamento da rede de neurônios. Encerra-se em 1956 com a reunião no Dartmouth College.

- Época Barroca

O início desta época ainda é atingido pelo otimismo da época anterior, acreditando que tudo é fácil e pode ser alcançado. Começam a surgir os primeiros sistemas especialistas com abordagem simbólica, trazendo grandes esperanças para a IAS. Em contraste a isso, a IAC apresenta dificuldades em técnicas de aprendizado de redes complexas. O fim desta época é marcado pela publicação do livro Perceptrons (MINSKY, 1969), em 1969, e pelo interesse dos fabricantes em desmistificar o computador.

- **Época das Trevas**

Mesmo com a paralisação das pesquisas por falta de verbas, esta época apresentou conquistas. Na IAS, os sistemas especialistas renasceram e se firmaram com novas aplicações. Surgem também as primeiras aplicações com Conjuntos Fuzzy (ZADEH, 1973). Esta época termina em 1981, quando os japoneses anunciam seus planos para a quinta geração de computadores. Na IAC, o marco final desta época é a publicação do artigo sobre redes neurais, de Hopfield.

- **Renascimento**

Período marcado pela popularização dos sistemas especialistas e da linguagem Prolog na IAS. Já na IAC, alguns pesquisadores continuam seus trabalhos em Redes Neurais Artificiais. A primeira conferência internacional em Redes Neurais Artificiais, em 1987, marca o fim deste período.

- **Contemporânea**

Período atual, cujo início é marcado pelo artigo de Gallant (1991) sobre sistemas especialistas conexionistas, ponto de partida para união da IAS e IAC. Atualmente, a Inteligência Artificial está presente nas mais diversas áreas, fazendo com que o número de aplicações aumentem consideravelmente, principalmente com a tecnologia de Sistemas Especialistas. Além disto, o uso de técnicas de Conjuntos Fuzzy está em expansão, principalmente em indústrias para controle inteligente.

2.1.3 Métodos de Abordagens da IA

A principal atividade da Inteligência Artificial é a solução de problemas, para os quais outras ferramentas são indisponíveis. Para isto, utiliza o conhecimento do domínio do problema e técnicas para manipulá-lo a fim de chegar a uma solução.

Com base neste pressuposto, pode-se classificar a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico da IA em três abordagens, de acordo com método de solução do problema (BARRETO, 2001): Inteligência Artificial Simbólica, Conexionista e Evolucionária.

A seguir são apresentadas, de maneira sucinta, cada uma destas abordagens:

- *Inteligência Artificial Simbólica (IAS)* – as bases da IAS são os sistemas simbólicos e seu objetivo é simular um comportamento inteligente. A IAS soluciona problemas manipulando conhecimentos básicos e imitando o modo de raciocínio humano, para isto ela deve ser usada quando o problema é bem definido e se conheça a forma de resolvê-lo. Os conhecimentos manipulados devem ser explícitos e com contexto bem definido e a ferramenta para manipulá-lo é a Lógica (BARRETO, 2001).

A partir do final dos anos 60 esta área da Inteligência Artificial começou a ganhar importância devido ao surgimento dos Sistemas Especialistas (SE), seu principal objeto de pesquisa e o que trouxe mais resultados para necessidades concretas (MEDEIROS, 2004). Atualmente os SE's estão presentes nas mais diversas áreas, sendo utilizados para analisar, concluir, induzir, deduzir, diagnosticar, planejar, entre outras finalidades. Este tema será tratado com mais profundidade no capítulo 2.2

- *Inteligência Artificial Conexionista (IAC)* – esta abordagem se inspira no cérebro humano, ou melhor, na rede de neurônios. Acredita-se que, construindo um sistema que simule a estrutura do cérebro, este sistema apresentará inteligência (GRECO & ABREU, 2003).

A IAC é aplicada em problemas mal definidos, mas que são conhecidos através de exemplos. Seus principais campos de aplicação são o reconhecimento de padrões, o controle de processos industriais e a robótica. A IAC apresenta desempenho melhor que o da IAS em problemas mal definidos, onde falta o conhecimento explícito de como realizar uma tarefa (BARRETO, 2001). Além disto, a IAC possui outras características como a capacidade de aprendizado e a adaptação do comportamento a partir de um conjunto de exemplos, a correção de erros, a otimização de desempenho, a interação com o meio, experimentação e descoberta, a memória e a compreensão dos conhecimentos (MINSKY, 1969).

Um dos pontos mais importantes da história da IAC foi a publicação do livro PERCEPTRONS, por Marvin Minsky e Seymour Papert. Nele apresentam suas críticas e sustentam que os modelos das Redes Neurais Artificiais (RNA) não tinham embasamento matemático suficiente para que lhes fosse possível atribuir alguma confiabilidade. Entretanto, no início da década de 80 John Hopfield recuperou a credibilidade do uso das RNA's.

As RNA's, inspiradas no sistema nervoso, correspondem a um sistema composto por vários neurônios que se ligam através de conexões sinápticas (BARRETO, 2001).

O neurônio, elemento básico da RNA, teve seu primeiro modelo proposto por McCulloch e Pitts, em 1943 (MCCULLOCH, 1943), onde sua intenção foi imitar a realidade biológica. Após este trabalho, o assunto despertou interesse de vários outros cientistas, que também desenvolveram seus modelos de neurônios. Muitos destes novos modelos, inclusive o modelo geral apresentado por Barreto (2001), derivam do modelo proposto por McCulloch e Pitts.

Em uma RNA, geralmente existem os neurônios de entrada, saída e neurônios internos. Os primeiros correspondem aos neurônios dos órgãos dos sentidos e são estimulados a partir de excitações que recebem do exterior, já os segundos possuem respostas usadas para processar os dados oriundos do mundo exterior.

As Redes Neurais Artificiais possuem a capacidade de aprender através de exemplos e fazer intercalação do que aprenderam. O sistema usado para "ensinar" uma rede é conhecido como algoritmo de treinamento, que pode ser supervisionado ou não supervisionado, onde a diferença entre eles é a presença ou não de um supervisor/professor.

Mais informações sobre Redes Neurais Artificiais podem ser encontradas no trabalho de Barreto (2001) e Medeiros (2004).

- *Inteligência Artificial Evolucionária (IAE)* – também conhecida como Computação Evolutiva ou Evolucionária, esta abordagem inspirou-se

inicialmente na teoria da evolução, se apropriando de alguns operadores da genética para buscar solução de problemas.

A motivação da inspiração biológica vem da suposição que a natureza, com seus mecanismos, buscou resolver um problema de otimização, ou seja, “a natureza resolveu um problema de complexidade: determinar a quantidade de ‘recursos’ para resolver um ‘problema’, a sobrevivência” (BARRETO, 2001).

A evolução de uma espécie ocorre através de mutações e cruzamentos, onde as soluções mais adaptadas sobrevivem e conseqüentemente têm maior possibilidade de gerar descendentes. Suas características são herdadas pelos descendentes e passadas para as outras gerações.

Os algoritmos evolutivos consistem em uma população de objetos abstratos manipulados por operadores genéticos, inspirados na evolução biológica, que agem como operadores de busca na solução de um determinado problema. Os indivíduos da população possuem um grau de aptidão que depende do ambiente, sendo que os mais adaptados têm mais facilidade de se reproduzir. Através dos operadores genéticos (de seleção, mutação e reprodução) a população evolui e, após gerações, terá possivelmente indivíduos com altos valores de aptidão (FALQUETO, 2004; BARRETO, 2001).

Os Algoritmos Genéticos (AG) são a principal área de pesquisa da Computação Evolutiva. Os AG's foram criados por Holland (1975), cujo objetivo era estudar os fenômenos relacionados à adaptação das espécies e da seleção natural que ocorre na natureza.

Embora os AG's sejam mais populares, não são as únicas técnicas inspiradas na evolução natural das espécies. Outras técnicas, classificadas por Medeiros (2003) como os principais paradigmas de pesquisa na área de computação evolutiva da atualidade, estão abaixo listadas:

- Algoritmos Genéticos;
- Programação Evolutiva;
- Estratégias Evolutivas;

- Sistemas Classificadores;
- Programação Genética;
- Recentemente, a Swarm Intelligence (inteligência dos enxames).

Quanto às áreas de aplicação, a IAE é utilizada para otimização, programação automática, genética de populações, evolução e aprendizado. Além de ser usada na economia, para definir estratégias de ofertas, e na ecologia, para modelagem de fenômenos ecológicos.

2.2 Sistemas Especialistas

Os Sistemas Especialistas (SE) são sistemas simbólicos que apresentam um comportamento semelhante a um especialista de um determinado domínio. Estes sistemas são capazes de emitir pareceres ou apresentar decisões sobre determinada área do conhecimento humano (CUPINNI, 1992).

Segundo a definição citada, é importante observar que os Sistemas Especialistas atuam no âmbito de um domínio específico. Isto difere do que pensavam os pesquisadores nos primórdios da IA, onde se imaginava que seria possível criar um mecanismo para emular o raciocínio humano resolvendo problemas gerais (BARRETO, 2003). Entretanto, com o passar dos anos constatou-se que seria necessário que os problemas tratados tivessem um escopo definido.

Os SE's são projetados para uma aplicação limitada do conhecimento humano, sendo capazes de emitir pareceres e apresentar diagnósticos. Para isto, são apoiados em conhecimentos adquiridos e devem saber o momento correto de utilizá-los, através de regras e formas de execução de processos bem definidos (BARRELA, 2000).

Outro atributo desejável em um SE é a capacidade de aprender com novos conhecimentos, aprimorando seu raciocínio e melhorando suas conclusões. Entretanto, esta característica é uma área de pesquisa ainda em

consolidação e, como será mostrado neste trabalho, o Sistema Especialista Fuzzy construído não implementa este atributo.

Para se projetar ou optar para desenvolvimento de um SE é importante analisar se esta é realmente a melhor opção. Para tanto, as sessões a seguir apresentam as características, através das vantagens e desvantagens do seu uso, além das diferenças com os sistemas convencionais. Auxiliando assim, na determinação de qual tipo de sistema utilizar em cada situação.

2.2.1 Sistemas Especialistas x Sistema Convencionais

Nesta seção busca-se apresentar as principais diferenças entre os Sistemas Convencionais e os Sistemas Especialistas. Para isto, foram observadas as opiniões de diversos pesquisadores.

Em seu trabalho, Ostelino (2003) define o domínio de uso dos SE's que deve ser aplicado somente onde um sistema convencional não atende o objetivo. Segundo ele, "antes de optar pela criação de um Sistema Especialista, deve-se fazer uma avaliação se a alternativa convencional existe. Se existir, normalmente ela é mais eficiente".

Para Waterman (1985), a diferença básica é que os SE's manipulam o conhecimento, enquanto os sistemas convencionais manipulam dados. Já para Liebowitz (1988), a principal diferença é a tolerância a erros e a separação entre mecanismo de raciocínio e o conhecimento.

É importante perceber a diferença básica que diz respeito à forma como cada tipo de sistema trata o conhecimento. De acordo com esta forma, outras diferenças surgirão como consequência.

Nos sistemas baseados em algoritmos, o conhecimento está armazenado no código do programa, ou seja, a solução de um determinado problema está definida dentro do código através de uma ou mais rotinas. Com isso, sempre que for necessário aumentar o conhecimento, o código deverá ser alterado.

Já nos SE's, o conhecimento pode ser agregado sem necessidade de alteração de código, pois o sistema tem separado do conhecimento a metodologia de solução. Os benefícios alcançados com este modelo são maior

flexibilidade e eficiência. Além disto, num SE é possível a construção de regras e a tomada lógica de decisões na ausência de informações (FERNANDES, 2003).

Ostellino (2003) apresenta um questionário para auxiliar na decisão sobre a utilização ou não de um Sistema Especialista:

- *“Existe a possibilidade de se desenvolver uma solução baseada em ferramentas e linguagens de programação convencional?”*
- *“O domínio do problema é claramente delineável?”*
- *“Existe um especialista no assunto?”*

O mesmo autor comenta que, no caso de resposta positiva para a primeira questão, o melhor é utilizar um sistema convencional, uma vez que não existe a necessidade de tratar dados incertos e nem utilizar heurística.

Para a segunda questão, é necessário que a resposta seja positiva para poder utilizar um Sistema Especialista, pois já foi mencionada a necessidade de um escopo bem definido para construção de um SE.

A terceira questão também é um pré-requisito para construção de um sistema especialista, portanto sua resposta deve ser positiva.

2.2.2 Benefícios e Limitações

Em relação aos sistemas convencionais, os SE's apresentam as seguintes vantagens (FERNANDES, 2003; RAMOS, 2004):

- Velocidade na determinação de problemas;
- Decisão fundamentada em uma base de conhecimento
- Segurança;
- Estabilidade;
- Flexibilidade;
- Integração de ferramentas;
- Facilita a transformação do conhecimento em código;
- Tratamento de incertezas;

Já em relação a especialistas humanos, as vantagens apresentadas são as seguintes:

- Dependência decrescente de pessoal especializado;

- Evita interpretação humana de regras operacionais;
- Resultados mais consistentes e reprodutíveis, sem influência de fatores emocionais;
- Aumenta a facilidade para tomada de decisões;
- O conhecimento especializado pode ser distribuído;

Ainda como vantagem, destaca-se o papel dos SE's na área de gestão do conhecimento (RENAUX, 2001). Os SE's trazem a vantagem de ser um importante mecanismo para conservar o conhecimento adquirido em muitos anos de trabalho, pois as informações obtidas permanecem na empresa independente da continuação do especialista como seu funcionário.

Embora os sistemas apresentem diversas vantagens, também devem ser consideradas suas limitações no momento de decidir sobre sua utilização.

Ramos (2004) destacou algumas limitações do uso de SE:

- É relativamente difícil implementar um sistema que aprenda com a experiência.
- A manutenção se torna difícil em sistemas com grande quantidade de conhecimento, principalmente quando integra conhecimento de vários especialistas.
- Problemas muito complexos (acima de 10.000 regras) podem tornar a busca excessivamente longa e exigir muito recurso de hardware para manusear os dados.
- A representação do conhecimento espacial é dificultosa.

2.2.3 Estrutura dos Sistemas Especialistas

Uma das características dos SE's que mais se destacam em relação aos sistemas convencionais é a sua estrutura.

Como os sistemas especialistas são inspirados na lógica do raciocínio humano (BARRELA, 2000), é necessário que se conheça, ainda que de maneira simples, um modelo como este mecanismo de raciocínio humano supostamente trabalha.

Para se chegar a uma conclusão, um especialista deve observar e analisar os fatos que encontra, formular hipóteses e situações, utilizando

também sua experiência através dos conhecimentos já adquiridos. Neste processo, novas hipóteses serão formuladas e novos conhecimentos serão adquiridos.

Importante ressaltar que a qualidade da conclusão depende dos conhecimentos adquiridos e dos fatos conhecidos, ou seja, pode-se chegar a uma conclusão errada devido aos poucos conhecimentos acumulados.

Na Figura 2, são apresentados os componentes que formam a estrutura de um sistema especialista (FERNANDES, 2003):

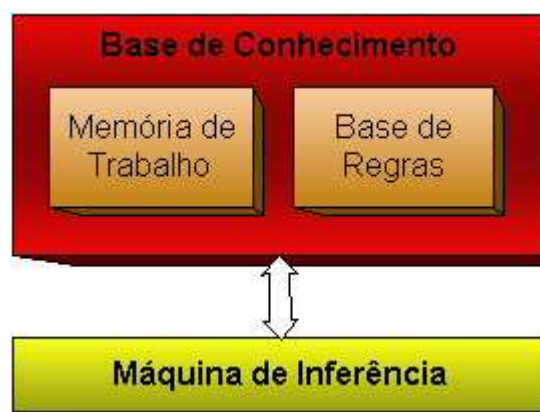


Figura 2. Estrutura Sistemas Especialistas. Adaptado de FERNANDES (2003)

Base do Conhecimento

Independente da abordagem de IA, o conhecimento representa um dos principais artefatos necessários à solução de um problema (BARRETO, 2003).

Em IAS o conhecimento é armazenado na Base de Conhecimento, que corresponde ao local onde os fatos e as regras de inferência são armazenados. Busca-se aqui manter todo o conhecimento de um domínio específico, extraído principalmente de especialistas humanos (BAPTISTA, 2000). Estes conhecimentos serão utilizados em tomada de decisões por parte do sistema.

De acordo com o modelo de estrutura citado, formam a Base de Conhecimento: a Base de Regras e a Memória de Trabalho. Na Base de Regras estão armazenadas as condições que serão utilizadas pela máquina ou motor de inferência, de acordo com a situação atual da memória de trabalho. Nela estão contidas informações que permitem identificar o problema a ser

resolvido, as possibilidades de resolução e o processo de raciocínio e inferência, que conduzem a conclusões sobre o problema submetido ao sistema.

A memória de trabalho é utilizada como memória temporária durante a execução do sistema. Nela estão contidas informações sobre o problema que, ou são deduzidas do sistema ou são informadas através da interação com o usuário. Em função da interação, a memória de trabalho é bastante dinâmica, permitindo inserir e/ou alterar os fatos durante a realização de uma consulta.

Para Durkin (1994), a memória de trabalho é a parte de um sistema especialista que contém os fatos dos problemas, que são descobertos durante uma consulta.

A construção da Base de Conhecimento, também chamada de Engenharia do Conhecimento (BAPTISTA, 2000), corresponde ao processo de extração do conhecimento do especialista do domínio. Pertence ao Engenheiro do Conhecimento a responsabilidade pela aquisição, análise e representação dos conhecimentos obtidos (FERNANDES, 2003).

Conforme a informação é adquirida, torna-se necessário definir uma estrutura que possibilite sua organização, de forma a permitir o uso desta informação pelo Motor de Inferência. Segundo Barreto (2001), a representação do conhecimento é “uma combinação de estrutura de dados e de procedimentos de interpretação, que usados de maneira correta em um programa, levarão a um comportamento que simule o conhecimento dos seres humanos”.

Entre diversos mecanismos para representação do conhecimento, podem-se citar os seguintes:

- *Regras de Produção* – é a forma de representação mais comum. De boa aplicabilidade para representar conhecimento dedutivo, como causa/efeito. Esta forma de representação utiliza instruções “Se-Então” (IF-THEN) em conjunto com operadores E (AND), OU (OR) para compor regras de produção. Os operadores são utilizados em regras compostas por mais de uma condição. Além destas instruções básicas, foram acrescentadas por outros autores instruções do tipo “Senão” (ELSE) e “Senão-Se” (ELSE IF) (BAPTISTA, 2000).

Outra forma de representação utilizando regras é através do uso de tabelas de decisão, que contém as diversas ações a serem tomadas de acordo com as condições existentes.

Na Figura 3, se vê um exemplo de formato possível das regras de produção e no Capítulo 3 são listadas as regras construídas para este trabalho.

- **Se** *condição* (ou *premissa* ou *antecedente*) ocorre **então** *ação* (*resultado*, *conclusão* ou *conseqüente*) deverá ocorrer.

Figura 3. Forma geral de regra de produção. Adaptado de BAPTISTA (2000)

- *Se o agente percebe luz do freio do carro em frente acesa*
então *ele deve frear o carro* (regra de ação)
- *Se veículo tem 4 rodas e tem um motor*
então *veículo é um automóvel* (novo conhecimento)

Figura 4. Exemplo de regra de produção. Adaptado de BAPTISTA (2000)

- *Redes Semânticas* – neste mecanismo, a informação é representada por um conjunto de nós conectados por arcos, que contém informações sobre a relação entre os nós. Os nós são utilizados para representar substantivos, adjetivos, pronomes e nomes próprios, enquanto os arcos representam basicamente verbos transitivos e preposições. Pelo fato de mostrar como os diversos itens da Base de Conhecimento estão relacionados, esta forma de representação tem como vantagem a facilidade de entendimento. Entretanto, a maior dificuldade está na sua implantação (BAPTISTA, 2000; MATTOS, 2003).



Figura 5. Modelo de rede semântica. Adaptado de BAPTISTA (2000)

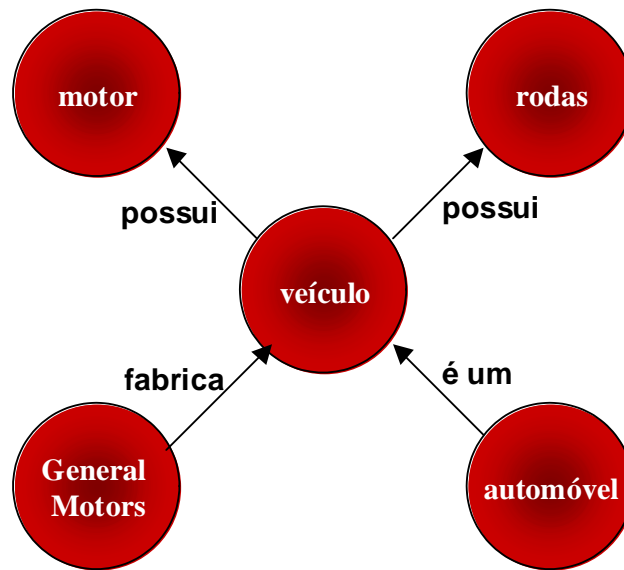


Figura 6. Exemplo de rede semântica.

- *Quadros (Frames)* – permitem a representação do conhecimento relacional através do uso de atributos (slots) e valores a ele associados. Cada frame representa uma classe ou uma instância de classe. Utilizados para codificar conhecimento e dar suporte ao raciocínio (MATTOS, 2003).



Figura 7. Modelo de frame. Adaptado de BAPTISTA (2000)

Construtor	General Motors
Modelo	Chevrolet Caprice
Ano	1979
Transmissão	Automática
Motor	Gasolina
Marchas	4
Cor	Azul

Figura 8. Exemplo de frame. Adaptado de OSTELINO (2003)

Motor de Inferência

O motor de inferência é o mecanismo responsável por buscar as informações, tanto na base de conhecimento como na memória, fazer inferências e fornecer respostas de forma semelhante a um especialista humano (BAPTISTA, 2000).

Assim sendo, Bittencourt (2001) mostra que as principais funcionalidades presentes em um motor de inferência são: o método de raciocínio, a estratégia de busca, resolução de conflito e tratamento da incerteza.

- *Método de Raciocínio*

O método de raciocínio pode ser por encadeamento para frente (*Forward Chaining*) ou por encadeamento para trás (*Backward Chaining*). No primeiro, a partir de fatos, procura-se chegar a uma conclusão. No segundo, a partir de uma hipótese, procura-se fatos ou causas que comprovem esta hipótese.

Entretanto, o que define o método de raciocínio a ser utilizado é o tipo do problema a ser resolvido. O encadeamento para frente é utilizado em problemas de planejamento, projeto e classificação, enquanto o encadeamento para trás é utilizado em problemas com grande número de estados iniciais, mas com poucas saídas. Como exemplo, pode ser citado os problemas de diagnóstico em geral.

Uma importante propriedade do mecanismo de raciocínio é a monotonicidade (BITTENCOURT, 2001) do método de inferência. Nos sistemas que possuem esta propriedade não é possível a revisão de fatos, ou seja, uma vez que uma variável assume o valor verdadeiro, não pode se tornar falso.

- *Estratégia de Busca*

A estratégia de busca diz respeito à forma com que o motor de inferência realizará as pesquisas na memória de trabalho e na base de conhecimento.

Normalmente, as estratégias de busca envolvem a pesquisa em uma árvore que contém todos os possíveis caminhos, a partir de um dado ponto inicial. O objetivo desta busca é encontrar um caminho de um ponto inicial a um ponto final, sendo este caminho o melhor ou não, dependendo da estratégia adotada (TATAI, 2003):

Busca por largura;

Busca por profundidade;

Busca bidirecional;

Busca heurística;

Outras.

Novamente, a escolha da estratégia depende do problema, pois todas as estratégias possuem suas vantagens e também suas desvantagens.

Resolução de conflito

O resultado de uma busca pode ser uma regra específica única ou mais regras que atendem à situação atual de um problema. Quando duas ou mais regras são retornadas, um conflito é gerado, devido a qual regra o motor de inferência deve considerar para aquele momento.

Este conjunto de regras denomina-se conjunto de conflito (BITTENCOURT, 2001). Assim sendo, o motor de inferência deve possuir alguma técnica ou método de resolução de conflito. Os mais utilizados ordenam as regras de acordo com os seguintes critérios (BITTENCOURT, 2001):

- Prioridades atribuídas estaticamente;
- Características da estrutura das regras, como complexidade, simplicidade e especificidade;
- Características dos dados associados às regras, como tempo decorrido desde sua obtenção, confiabilidade e grau de importância;
- Seleção ao acaso

Como aprimoramento, um sistema especialista pode ainda combinar vários critérios.

- *Tratamento da Incerteza*

A incerteza é uma característica inerente aos SE's devido ao fato de se trabalhar com informações não exatas e que podem apresentar algum grau de imprecisão ou conflito.

Entretanto, é importante ressaltar que incerteza e imprecisão são conceitos diferentes, mesmo que ambas se classifiquem como informação inexata (LINARES, 1997). A incerteza ocorre quando não se consegue afirmar a veracidade da informação, ou seja, não é possível ter certeza de que a informação é verdadeira ou falsa. No caso de imprecisão, ela ocorre quando a informação não tem limites definidos.

Conforme prosseguem as pesquisas, mais métodos são desenvolvidos para melhor tratar informações incertas, dentre os quais pode-se citar (BITTENCOURT, 2001):

- Método Bayesiano;
- Fatores de Certeza;
- Teoria de Dempster-Shafer;
- Teoria dos Conjuntos Fuzzy;
- Teoria de Probabilidades Subjetivas;
- Teoria de Possibilidades.

3 Conjuntos Fuzzy

3.1 Introdução

A dicotomia entre pertencer ou não pertencer, existente na teoria de conjuntos, não se aplica diretamente na teoria dos Conjuntos Fuzzy, pois um Conjunto Fuzzy não possui uma fronteira precisa. O que existe é uma pertinência gradual. A pertinência diz respeito a quanto uma determinada sentença é verdade, ou seja, a pertinência permite exprimir se uma sentença “é mais verdadeira” que outra (BARRETO, 2001).

A teoria dos Conjuntos Fuzzy, foi introduzida em 1965, por Lofti A. Zadeh, da Universidade da Califórnia, quando publicou um artigo que resumia os conceitos dos “*Fuzzy Sets*” (ZADEH, 1965).

Há ainda muita discussão quanto a tradução do termo Fuzzy para língua portuguesa. Alguns pesquisadores preferem o termo conjuntos difusos, outros, conjuntos imprecisos, e outros, conjuntos nebulosos. Por isto, neste trabalho, optou-se por manter o original inglês Fuzzy.

O artigo mencionado foi resultado da pesquisa que Zadeh desenvolveu após observar que muitas regras que as pessoas usavam para fazer inferências não eram conscientes, isto é, não podiam ser explicadas pelas pessoas que as usavam. É comum definir a idade de uma pessoa com frases do tipo “parece ter uma média de vinte e cinco anos”, mas não temos uma explicação lógica de como chegamos a esta conclusão (SANTOS, 2003).

Além disto, Zadeh também verificou que os recursos tecnológicos disponíveis na época não eram capazes de automatizar tarefas relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química. Isto, devido aos problemas envolverem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional, que é fundamentada na lógica de Boole.

Buscando uma solução para estes problemas, Zadeh desenvolve uma variação da tradicional teoria dos conjuntos e lógica booleana, tornando a análise e controle de sistemas complexos mais tratáveis (SANTOS, 2003).

A publicação de seu artigo, em 1965 revolucionou o assunto, levando Zadeh a ser considerado o grande colaborador do Controle Moderno.

Entre as aplicações de Conjuntos Fuzzy, destacam-se os controladores Fuzzy de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação de trens (ARBEX, 1994).

Com o crescente avanço das pesquisas, estimulado pelos resultados e pelo vasto campo de aplicações, foi criada em 1984 a Sociedade Internacional de Sistemas Fuzzy (ARBEX, 1994).

Tanto os Conjuntos Fuzzy quanto a Lógica Fuzzy fornecem a base de técnicas poderosas para solução de problemas, onde sua força deriva de sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas ou imprecisas (FABRI, 2001).

Nas seções a seguir são conceituados os Conjuntos Fuzzy, fazendo menção aos Conjuntos Tradicionais. Este capítulo, juntamente com o anterior, expõe os campos de conhecimento que integram o trabalho, delineando as ferramentas mais importantes adotadas para a solução proposta ao problema focalizado.

3.2 Fundamentos

O termo “conjuntos” trás à mente a noção básica de uma coleção de objetos com fronteiras ou limites bem definidos. No caso de Conjuntos Fuzzy, o conceito fundamental é flexibilizar este requisito e permitir valores intermediários, ou seja, a noção de fronteira agora não é definida com tanta exatidão.

A Figura 9 ilustra a diferença entre Conjuntos Tradicionais e Conjuntos Fuzzy (NAGANIME, 2001):

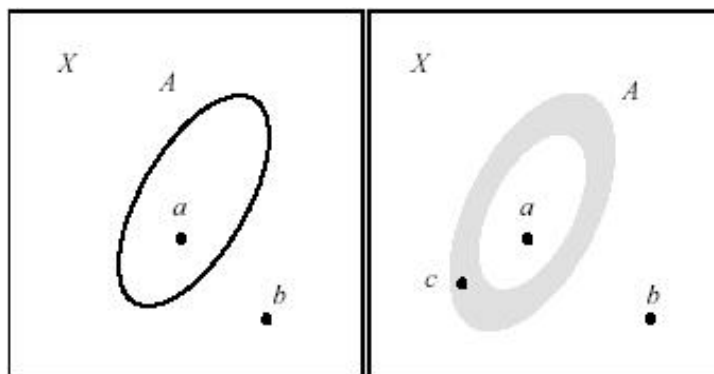


Figura 9. Conjuntos Clássicos X Conjuntos Fuzzy (NAGANIME, 2001).

O primeiro quadro ilustra um Conjunto Tradicional A. Neste caso, ou o elemento “pertence”, no caso de a , ou o elemento não “pertence”, caso de b .

O segundo quadro ilustra um Conjunto Fuzzy A. Neste conjunto, os limites não são abruptos, permitindo definir elementos como “parcialmente” membros do conjunto A, como é o caso de c .

Assim sendo, um Conjunto Fuzzy é um conjunto cuja função de pertinência não é determinística e sim possibilística (NAGANIME, 2001).

A função de pertinência, no caso de Conjuntos Tradicionais, é o critério que define se um determinado objeto pertence ou não a um conjunto, ou seja, a pertinência dos objetos é absoluta. No contexto de Conjuntos Fuzzy, a pertinência não necessariamente é absoluta. Assim, a função de pertinência serve para definir o grau em que um determinado objeto pertence a um conjunto (TATAI, 2003).

Ao considerar Conjuntos Fuzzy como uma extensão dos Conjuntos Tradicionais (FABRI, 2001) torna-se importante revisar, ainda que de forma breve, os conceitos da teoria dos Conjuntos Tradicionais.

3.2.1 Teoria dos Conjuntos Tradicionais

Um conjunto A sobre o conjunto universo X pode ser definido pelos seguintes métodos (FABRI, 2001):

1. Enumeração $A = \{a_1, a_2, a_3\}$
2. Propriedade $A = \{x|P(x)\}$

$$3. \text{ Característica} \quad \gamma_A(x) = 1 \text{ para } x \in A \\ 0 \text{ para } x \notin A$$

A primeira definição é aplicada somente em casos de conjuntos finitos. Como apresentado, um conjunto A cujos membros são a_1 , a_2 e a_3 .

Já a segunda definição diz que o conjunto A é definido como o conjunto de todos os elementos de X para qual a proposição $P(x)$ é verdadeira.

Na terceira definição, $\gamma_A(x)$ representa a *função característica*, que define quais elementos de X são membros do conjunto e quais não são.

Aos conjuntos que não contêm nenhum membro denominam-se conjuntos vazios, representados pelo símbolo \emptyset . Neste caso, a função característica é nula, $\emptyset(x)=0$ (PECRYCZ, 1998).

Com respeito às operações de conjuntos, destacam-se a união, a intersecção e o complemento, representados por \cup , \cap , \neg , respectivamente. Suas definições são apresentadas a seguir:

1. $A \cup B = \{x \mid x \in A \text{ ou } x \in B\}$;
2. $A \cap B = \{x \mid x \in A \text{ e } x \in B\}$;
3. $\neg A = \{x \mid x \in X \text{ e } x \notin A\}$;

Na Tabela 1 são demonstradas as principais propriedades das operações mencionadas, onde A , B e C são conjuntos definidos sobre o universo X (FABRI, 2001).

Propriedade	Representação
Absorção	$A \cup (A \cap B) = A$ $A \cap (A \cup B) = A$
Absorção por X e \emptyset	$A \cup X = X$ $A \cap \emptyset = \emptyset$
Associatividade	$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$ $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
Comutatividade	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$

Distributividade	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Idempotência	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
Identidade	$A \cup \emptyset = A$ $A \cap X = A$
Involução	$\neg \neg A = A$
Lei de Contradição	$A \cap \neg A = \emptyset$
Lei De Morgan's	$\neg (A \cup B) = \neg A \cap \neg B$ $\neg (A \cap B) = \neg A \cup \neg B$
Lei do Meio Excluído	$A \cup \neg A = X$

Tabela 1. Propriedades das operações sobre conjuntos (FABRI, 2001).

3.2.2 Teoria dos Conjuntos Fuzzy

Como descrito anteriormente, o valor de pertinência determina o quanto um objeto pertence a um Conjunto Fuzzy. Assim sendo, um “Conjunto Fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência que mapeia os elementos de um domínio, espaço ou universo de discurso X para o um dado intervalo” (ZADEH, 1965), normalmente assumido entre 0 e 1 $[0,1]$.

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

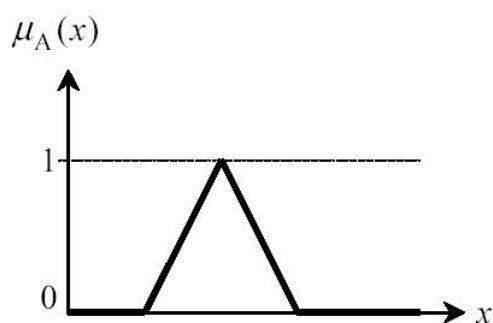


Figura 10. Exemplo de função de pertinência (NAGANIME, 2001)

O valor “0” da função $\mu_A(x)$ indica que o elemento não pertence ao Conjunto A. No outro extremo, se $\mu_A(x) = "1"$, então o elemento x pertence ao

conjunto A. Os valores intermediários de $\mu_A(x)$ indicam a pertinência parcial. O uso dos valores “0” e “1” para representar os limites não quer dizer que a representação de Conjuntos Fuzzy esteja somente neste intervalo. Foram utilizados no exemplo devido ao fato de serem os valores normalmente utilizados na literatura.

Pela definição acima, um Conjunto Fuzzy A em \mathbf{X} pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de elementos $x \in \mathbf{X}$ e seu grau de pertinência: $A = \{(A(x)/ x) | x \in \mathbf{X}\}$ (PEDRYCZ, 1998). Este é o conceito de *fuzziness*, o qual generaliza a função característica de modo que ela possa assumir um número infinito de valores diferentes no intervalo, no caso mostrado na figura, 0 e 1.

Dada a relevância da função de pertinência para Conjuntos Fuzzy, é importante que estas expressem o modo que se pensa sobre um determinado assunto (BARRETO, 2001). Assim sendo, sua escolha deve ser feita de forma criteriosa. Em seu trabalho, Barreto (2001) definiu dois modos: o *modo experimental*, baseado em estatística e o *modo conceitual*, baseado em experiência psicológica.

Podem ser utilizadas diferentes notações para Conjuntos Fuzzy, pois estes conjuntos são definidos em universos finitos ou em universos infinitos. Um vetor n-dimensional pode ser utilizado em situações que o universo é discreto e finito e cuja cardinalidade seja n , onde as coordenadas do vetor denotam a pertinência do elemento de X.

Quanto às formas de representar a função de pertinência, Thé (2001) sugere duas maneiras, de acordo com o universo de discurso:

- Método numérico – para universo de discurso discreto. Utiliza um vetor cuja dimensão depende do grau de discretização do universo de discurso.
- Método funcional – para universo de discurso contínuo. Utiliza uma função contínua $\mu(u)$.

3.2.3 Tipos de Funções de Pertinência

Uma das formas de representar um Conjunto Fuzzy é através de funções, sendo as mais comuns (PEDRYCZ, 1998; FREITAS, 2003):

- Função Linear

É a função mais simples e sua aplicação é indicada para casos onde se tem pouco conhecimento do conceito ou de seu comportamento

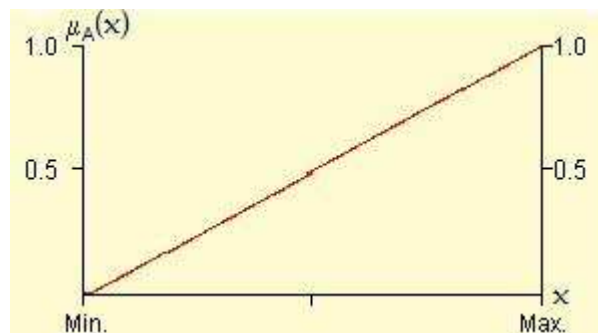


Figura 11. Representação de função linear

- Função Triangular

Indica apenas um ponto máximo de um Conjunto Fuzzy, definido pela função:

$$\text{Triang}(x,a,b,c) = \max(0, \min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)])$$

x – ponto de domínio da curva;

a – ponto de troca de estado para o valor verdade;

b – ponto de entrada para o valor verdade e o ponto de troca de estado para o valor falso;

c – ponto de troca de estado para o valor falso;

Possui aplicabilidade semelhante a função trapezoidal, mas é mais restritiva, contendo apenas um ponto de troca de estado.

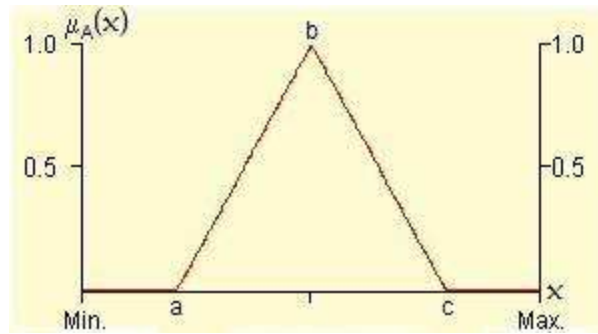


Figura 12. Representação de função triangular

- Função S

Também conhecida como *Curva Sigmóide*, a característica desta função é que sua curva possui o ponto de flexão (*crossover*) a 50% do grau de pertinência. Aplicada em situações onde os valores são aproximações de uma variável randômica.

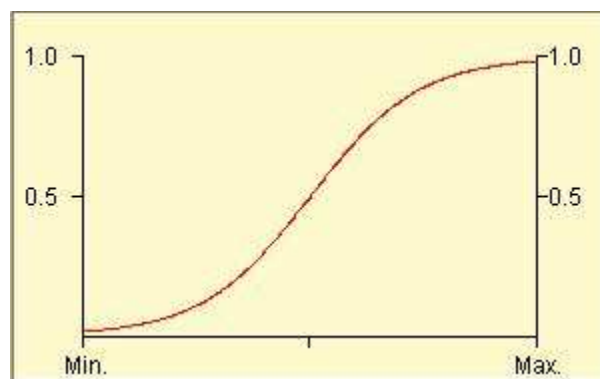


Figura 13. Representação de função sigmóide

- Função Trapezoidal

Representa um intervalo de pontos de máximo de um conjunto Fuzzy, definido pela função:

$$\text{Trapez}(x,a,b,c,d) = \max(0, \min[(x-a)/(b-a), 1, (d-x)/(d-c)])$$

x – ponto de domínio da curva;

a – ponto de troca de estado para o estado verdade;

b – ponto de entrada para o estado verdade;

c – ponto de troca de estado para o estado falso;

d – ponto de entrada para o estado falso;

Aplicável em controle de início e fim de operação.

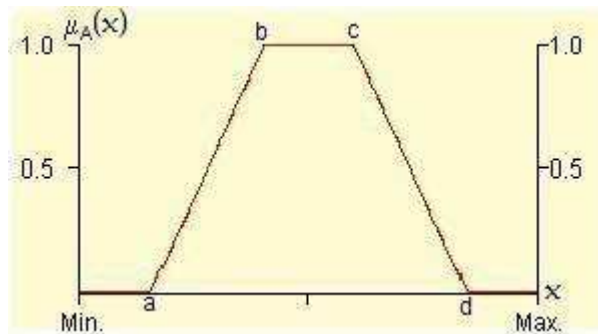


Figura 14. Representação de função trapezoidal

- Função Exponencial

Também conhecida como *Gaussiana*, É definida pela função:

$$Gauss(x,k,y) = e^{-k(y-x)^2}$$

x – ponto de domínio da curva;

k – indica o tamanho entre o meio da curva e o seu final;

y – indica o ponto central onde a curva é construída.

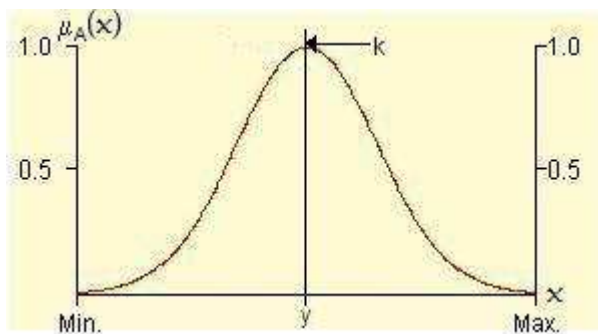


Figura 15. Representação de função exponencial

3.3 Operações com Conjuntos Fuzzy

O objetivo agora é apresentar algumas operações e propriedades importantes com Conjuntos Fuzzy. Entretanto, é necessário primeiramente definir os dois operadores mais utilizados, *max* e *min* (KAUFMANN, 1975; ZADEH, 1965):

- *min*

$$a \wedge b = \min(a,b) = a, \text{ se } a \leq b$$

$$a \wedge b = \min(a,b) = b, \text{ se } a > b$$

- *max*

$$a \vee b = \max(a,b) = a, \text{ se } a \geq b$$

$$a \vee b = \max(a,b) = b, \text{ se } a < b$$

Ou ainda, considerando **A** e **B** conjuntos definidos no universo de discurso **X** e $(A \cap B)(x)$ e $(A \cup B)(x)$, funções de pertinência resultantes da intersecção e união de **A** e **B**, respectivamente:

- $(A \cap B)(x) = \min(A(x), B(x)) = A(x) \wedge B(x)$
- $(A \cup B)(x) = \max(A(x), B(x)) = A(x) \vee B(x)$

A seguir serão apresentadas as principais operações com Conjuntos Fuzzy. considerando A e B Conjuntos Fuzzy definidos em um universo de discurso X.

- **Complemento** – o complemento A' de um Conjunto Fuzzy A, no universo de discurso 0 e 1.

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

- **Igualdade** – dois Conjuntos Fuzzy são considerados iguais somente se suas funções de pertinência forem iguais.

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

- **União**

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

- **Intersecção**

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

- **Produto**

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \forall x \in X$$

- **Inclusão** – também denominado de subconjunto

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

Ao utilizar operações de união, intersecção e complemento em Conjuntos Fuzzy, é possível detectar que as mesmas propriedades algébricas definidas para os Conjuntos Tradicionais podem ser utilizadas em Conjuntos Fuzzy (TANSCHKEIT, 2001).

3.4 Variáveis Lingüísticas

Esta seção apresenta a definição de variáveis lingüísticas, além de outros conceitos relacionados. As variáveis lingüísticas são fundamentais no contexto de Conjuntos Fuzzy e essenciais na Lógica Fuzzy.

Geralmente, as variáveis são definidas de acordo com os estados que caracterizam um determinado fenômeno, pode-se utilizar como exemplo a variável temperatura, onde seus estados podem ser frio, morno e quente.

Diferente do sentido comum de variável, as variáveis lingüísticas são consideradas variáveis cujos valores são números Fuzzy, ou seja, uma variável lingüística é caracterizada pela quintupla (PEDRYCZ, 1998):

$$\{X, T(X), \mathbf{X}, G, M\}$$

onde:

X é o nome da variável,

$T(X)$ é o conjunto de termos de X , cujos elementos são rótulos de valores lingüísticos de X ,

G é uma gramática para geração de nomes de X ,

M é uma regra semântica que associa com cada rótulo $L \in T(X)$ seu significado

$M(L)$, que é um Conjunto Fuzzy no universo X cuja variável base é x .

Considere o exemplo mostrado na Figura 16:

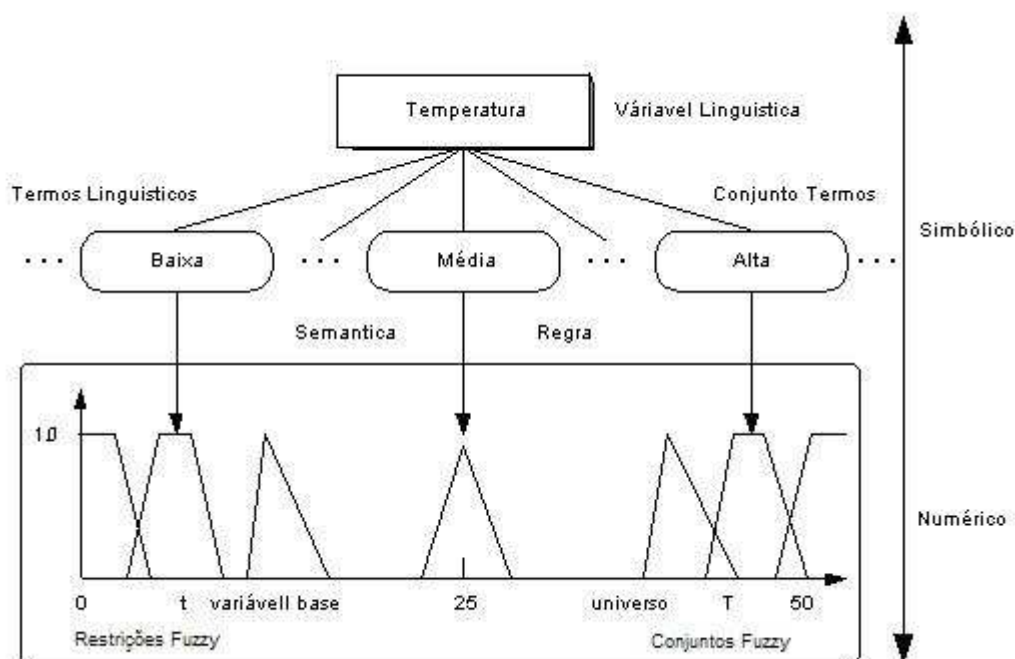


Figura 16. Exemplo de variáveis linguísticas (PEDRYCZ,1998).

O exemplo apresenta *temperatura* como uma variável linguística ($X=temperatura$), com $T[0, 50]$ e com conjunto de termos $T(X) = \{..., baixo, ..., média, ..., alta, ...\}$, onde cada elemento é um rótulo de um valor linguístico de X .

O significado $M(T)$ de cada rótulo de $T(X)$ é definido como sendo a restrição $T(t)$ na variável base t imposta pelo nome de T .

Uma variável linguística é composta da concatenação de termos atômicos, que podem ser dos seguintes tipos (TANSCHKEIT, 2001) :

- *Termos primários*

São os rótulos definidos para um determinado universo, como *pequeno*, *médio* e *grande*. Estes termos apresentam funções de pertinência contínuas, descontínuas e discretizadas.

As funções de pertinência contínuas são definidas por intermédio de funções analíticas, enquanto que funções de pertinência descontínuas são formadas por segmentos lineares, que resultaram em formas triangulares e trapezoidais. Por último, as funções de pertinência discretizadas são formadas por conjuntos de valores discretos que correspondem a elementos discretos do universo.

- A *negação não* (not) e os *conectivos e* (and) e *ou* (or);

Os conectivos são utilizados com variáveis e são definidos em termos das operações de complementação, intersecção e união.

- *Modificadores*

Utilizados para aumentar o conjunto de valores de uma variável lingüística a partir de uma coleção de termos primários.

São os valores lingüísticos que determinaram a granularidade ou a quantidade de partições Fuzzy de um universo. Assim, uma quantidade maior de valores apresenta uma partição mais fina, enquanto que uma pequena quantidade de valores uma partição mais esparsa (PEDRYCZ, 1998).

A Figura 17 ilustra esta granularidade, com uma partição mais esparsa e outra mais fina, respectivamente:

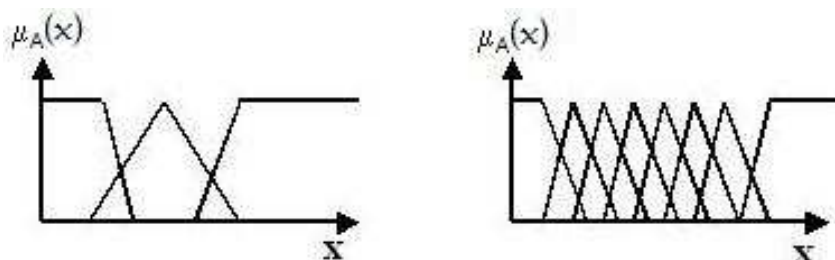


Figura 17. Partições Fuzzy - granularidade. Adaptado de PEDRYCZ (1998)

Com os termos primários e modificadores definidos, é possível definir o significado de um termo composto. Mas poderá ocorrer que conjuntos Fuzzy, resultantes desta computação, não correspondam a nenhum dos termos do conjunto de termos de uma variável lingüística.

Neste caso, deve-se utilizar a *aproximação lingüística* (PEDRYCZ, 1998), que aproximará o rótulo lingüístico a um Conjunto Fuzzy resultante. Esta aproximação é um processo de combinar um Conjunto Fuzzy a uma coleção de primitivas Fuzzy, que estão associadas com os termos disponíveis de uma variável lingüística.

3.5 Sistema de Inferência Fuzzy

Continuando com a fundamentação da teoria dos Conjuntos Fuzzy, esta seção descreve o processo de inferência Fuzzy, a sua estrutura e seus elementos.

O processo de inferência Fuzzy trabalha com um conjunto de proposições Fuzzy, representando um domínio específico, e com um conjunto de dados de entrada. O sistema avalia o grau de compatibilidade das entradas baseado em seu conjunto de regras e chega a uma conclusão, baseado nos graus de pertinência (FREITAS, 2003).

O raciocínio Fuzzy está baseado em dados imprecisos, que são representados por graus de pertinência a um conjunto nebuloso. Assim sendo, envolve processos tais como: “Fuzzyficação” e “Defuzzyficação”. A Figura 18 ilustra a estrutura geral de um sistema Fuzzy:

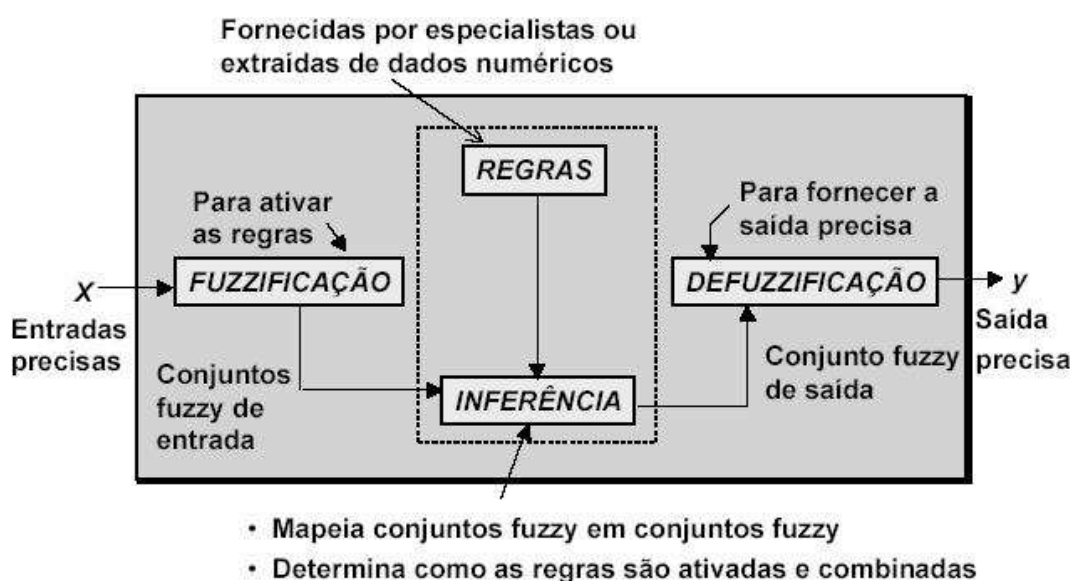


Figura 18. Sistema de Inferência Fuzzy (TANSCHKEIT, 2004)

O processo inicia com a entrada de variáveis numéricas (*crisp*), que passarão pelo processo de “Fuzzyficação” transformando os valores escalares em valores Fuzzy, utilizando para isto funções de pertinência. As funções mapeiam os valores “*crisp*” em graus de pertinência.

Assim que os valores “*crisp*” já estão mapeados para valores Fuzzy, ocorre o processo de inferência Fuzzy, cuja função é combinar (matching) os

valores Fuzzy calculados com os antecedentes das regras do sistema e, com isso, ativar os conseqüentes das regras. Nota-se, neste momento, a necessidade da base de regras, pois ela contém as proposições Fuzzy necessárias ao motor de inferência.

O último processo é o de “Defuzzyficação”. Após, o motor de inferência realizar todas implicações e gerar os valores Fuzzy, estes valores são passados por um método de “Defuzzyficação” resultando em valores “*crisp*”, isto é, valores escalares, “não fuzzy”.

A seguir, são detalhados os processos que compreendem o sistema de inferência Fuzzy. Ver-se-á que alguns conceitos são adaptações do que já se delineou como Sistemas Especialistas.

- Base de Regras

Corresponde ao local em que estão armazenados os conjuntos de regras/proposições Fuzzy, onde as variáveis antecedentes/conseqüentes são variáveis lingüísticas e seus valores são representados por Conjuntos Fuzzy (ABEL, 1998). As regras se constituem em um aspecto fundamental no desempenho do motor de inferência. Geralmente, são fornecidas por especialistas em forma de sentenças lingüísticas ou extraídas de dados numéricos e são expressas como declarações do tipo “SE.....ENTÃO”.

Assim sendo, cada regra é formada por uma parte antecedente (SE) e uma parte conseqüente (ENTÃO), onde o antecedente descreve uma condição e o conseqüente descreve uma conclusão, como foi discutido na seção 2.2.

- “Fuzzyficação”

O propósito deste processo é transformar valores “*crisp*” de entrada em valores Fuzzy, através de funções de pertinência pré-estabelecidas, definindo o grau de pertinência para cada valor de entrada.

- Motor de Inferência

Cabe ao motor de inferência, a partir de uma base de regras, realizar a combinação entre os valores Fuzzy calculados com os antecedentes das

regras, com isso, ativando os seus conseqüentes. É neste momento que ocorrem as operações de implicação entre antecedentes e conseqüentes.

- “Defuzzyficação”

Este processo é o inverso do processo de “Fuzzyficação”, pois sua função é transformar os resultados Fuzzy da inferência em valores escalares (“*crisp*”) de saída. Para isto existem os métodos de “Defuzzyficação”, dos quais os mais utilizados são:

Média de Máximos – neste método, a saída é obtida a partir da média aritmética dos pontos onde a função de pertinência atinge seus valores máximos, isto é, calcula-se a média dos valores de saída que tenham os maiores graus de possibilidade.

Centro de gravidade – a saída é o valor do universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais.

Primeiro máximo – a saída é obtida através do ponto em que o grau de pertinência da distribuição da ação de controle atinge o primeiro valor máximo.

Outros métodos podem ser encontrados em Simões (1999).

4 Análise e Diagnóstico de Transformadores

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns dos conceitos e definições que envolvem a manutenção de transformadores de potência, além de discorrer sobre os processos de análise e diagnóstico de sua condição operativa. Juntamente com o processo de análise são apresentados as normas e critérios para definição de diagnósticos.

Por fim, é apresentado o domínio da aplicação proposta. As definições e os conceitos utilizados nesta seção foram extraídos de Suñe (2001), NBR 7274 (1981) e ITAIPU (2004) e estão dentro do contexto de equipamentos de potência.

O âmbito do sistema idealizado no trabalho é o *Sistema de Supervisão e Diagnóstico dos Equipamentos de Transmissão – SSD* que está sendo desenvolvido em Itaipu. A presente proposta corresponde a um dos módulos do SSD, abrangendo o diagnóstico a partir da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante.

O objetivo principal do sistema SSD é fornecer subsídios à engenharia da manutenção na análise da qualidade operacional dos equipamentos de transmissão instalados na Central Hidrelétrica de Itaipu. Os módulos deste sistema são citados na seção 4.6.

4.2 Definições e conceitos

Entende-se por manutenção toda ação de controle, conservação ou restauração realizada sobre um equipamento com objetivo de que o mesmo permaneça em funcionamento ou retorne a suas funções requeridas. A manutenção pode ser corretiva, preventiva ou preditiva (SUÑE, 2001):

- *Manutenção Corretiva* – é invocada pela detecção de um defeito ou falha no equipamento, ocasionando na sua intervenção para reparar ou corrigir o defeito.
- *Manutenção Preventiva* – corresponde ao planejamento da manutenção do equipamento, ou seja, é a intervenção prevista, preparada e programada antes da data do provável aparecimento da falha e seu objetivo é reduzir a probabilidade de falhas nos equipamentos.
- *Manutenção Preditiva* – esta manutenção pode ocorrer com o equipamento em funcionamento, cumprindo com suas funções requeridas e o seu objetivo é prever o momento de falhas. A manutenção preditiva procura identificar, analisando o equipamento, os componentes que possam gerar falhas e com isso, determinar sua troca na próxima parada de manutenção do equipamento.

A função requerida corresponde ao conjunto de condições de funcionamento para o qual o equipamento foi projetado, fabricado ou instalado.

Assim sendo, o defeito é caracterizado como qualquer alteração no estado do equipamento que não o impeça de desempenhar sua função requerida, mas levando este a operar com restrições. A falta de reparo no defeito pode levar o equipamento à falha, impedindo-o de desempenhar sua função requerida e conduzindo-o à indisponibilidade.

O objeto da manutenção, o transformador, é um equipamento elétrico que, por indução elétrica, transforma tensão em corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos, com a mesma frequência e, geralmente, com valores diferentes de tensão e corrente (ITAIPU, 2003).

A Figura 19 apresenta o desenho esquemático de um transformador de potência. Esta figura é apenas ilustrativa e não representa um modelo de transformador utilizado em Itaipu.

Nesta ilustração, cada número circulado indica um componente do transformador. O óleo, indicado pelo número 5, representa o elemento básico pelo qual se analisa e diagnostica o estado operativo do equipamento, no caso do método de ensaio DGA.

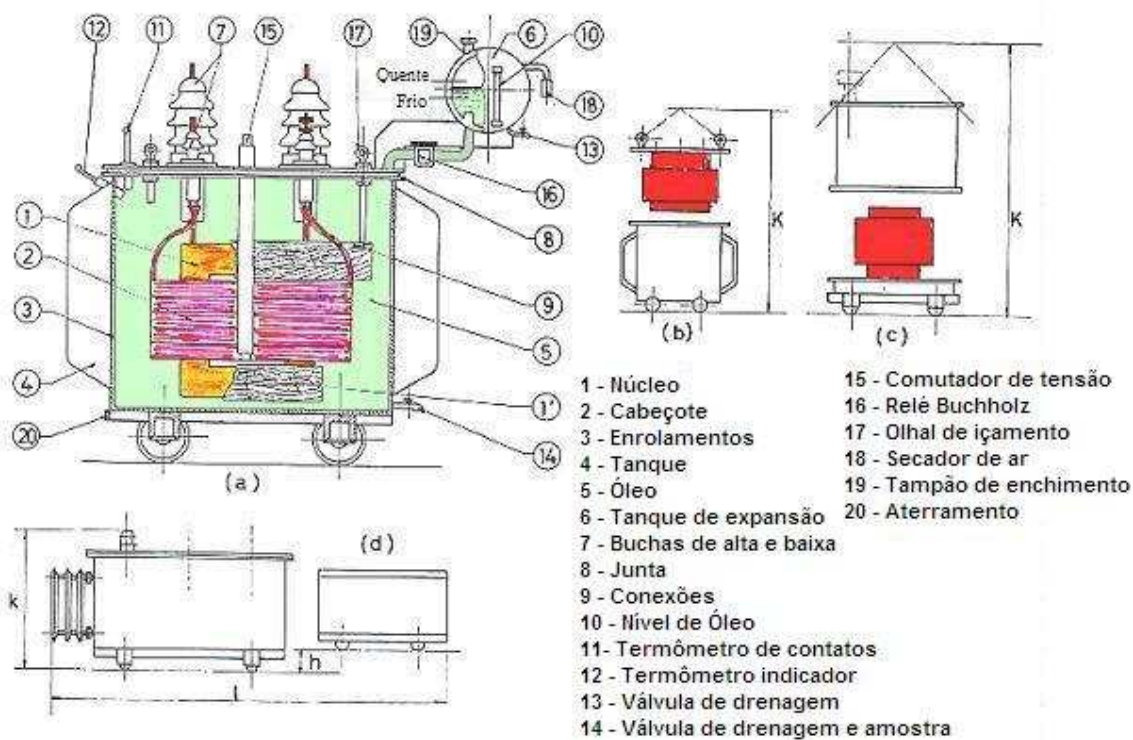


Figura 19. Figura esquemática de um transformador de potência
 (EXTREMADURA, 2001)

A Figura 20 mostra um transformador monofásico de 525kV utilizado nas unidades geradoras da Central Hidrelétrica Itaipu. Este modelo é de fabricação da BBC Brown Boveri. Conforme já mencionado, cada unidade geradora possui um banco de três transformadores deste tipo, um para cada fase.



Figura 20. Transformador 525 kV, 50 Hz, 265 MVA monofásico

4.3 Transformadores de Itaipu

A Itaipu Binacional possui atualmente em seu parque de geração 90 transformadores assim divididos:

- 58 transformadores 18/525 kV monofásicos (4 são reservas)
- 04 transformadores 6.8/13.8 kV trifásicos
- 04 transformadores reguladores 13.8/13.8kV trifásicos
- 08 transformadores abaixadores 525/13.8kV trifásicos
- 02 transformadores 69/13.8 kV trifásicos com regulação de tensão
- 02 transformadores de aterramento
- 03 autotransformadores 52/245 kV trifásicos
- 03 transformadores reguladores 245/245 kV trifásicos
- 02 transformadores 13.8/0,480 kV trifásicos e 2 transformadores 23/69 kV trifásicos.

- 02 Transformadores 23/69 kV trifásicos

Como a usina possui atualmente 18 unidades geradoras em operação (2 novas unidades em implantação), sendo 9 de 50 Hz e 9 de 60 Hz, cada unidade possui um banco de 3 de transformadores monofásicos, perfazendo um total de 29 transformadores de 50 Hz e 29 de 60 Hz.

Além dos transformadores, existem ainda 54 buchas H1 de 500 kV, sendo uma para cada transformador 18/525 kV monofásico.

Portanto, um total de 140 equipamentos serão atendidos pelo sistema proposto neste trabalho.

4.4 Análise da Situação Operativa do Transformador

Esta seção e a próxima discorrem sobre o processo de avaliação da situação operativa do transformador. São apresentados os métodos e as técnicas de análise do óleo isolante, enfatizando o método de *Análise dos Gases Dissolvidos* (NBR7274, 1981).

Nos métodos descritos a seguir, o óleo isolante e o papel são os principais produtos de análise para diagnosticar o estado operativo do transformador, bem como seu tempo de vida. Ambos compõem o sistema isolante elétrico do equipamento

- O papel é utilizado como parte da isolação sólida, principalmente no enrolamento, no revestimento das conexões e barreiras (SUÑE, 2001).
- A principal função do óleo, além da isolação térmica, é o de refrigeração do sistema (ITAIPU, 2003).

O envelhecimento do transformador está diretamente relacionado à degradação de seu sistema isolante elétrico (ITAIPU, 2003).

O processo de verificação da condição operativa do transformador inicia na retirada da amostra de óleo do transformador. A maneira correta de se obter a amostra de óleo é regulamentada pela norma NBR 7070. A amostra é conduzida, mais rápido possível, ao laboratório para realização dos ensaios. Existe um tempo limite de duas semanas entre a extração da amostra e sua

análise final (SUÑE, 2001). Os dados obtidos a partir do ensaio variam de acordo com o método utilizado, sendo os mais comuns:

- *Método de Análise Físico-Química (AFQ)* – os dados obtidos do ensaio correspondem aos elementos físico-químicos presentes no óleo, que sofrem alterações ao longo do tempo, alterando a capacidade de estabilidade do óleo sob campos elétricos e a capacidade de transferir calor. Isto se deve a oxidações, umidades, temperatura e reação com outros materiais utilizados na fabricação (ITAIPU, 2003). As características físico-químicas que definem a condição operativa do óleo são obtidas pelos elementos: *Rigidez Dielétrica, Água, Cor, Acidez e Tensão Interfacial*.
- *Método de Contagem de Partículas* – o objetivo é identificar a quantidade de partículas, por tamanho, em suspensão no óleo e verificar se estão dentro dos limites aceitáveis.
- *Método 2Fal* – este método considera o papel como o elemento mais importante na definição do tempo de vida do equipamento, pois constitui como isolante primário do sistema e é de difícil substituição (FERNANDEZ, 1998). Assim sendo, a degradação da isolação sólida resulta da diminuição do grau de polimerização do papel e na formação de compostos solúveis no óleo, como óxido de carbono (CO e CO₂) e derivados furânicos. Os principais dados obtidos para a análise são o grau de polimerização do papel e o teor de 2-furfuraldeído, um dos compostos de furano. O 2-furfuraldeído é o composto de furano mais utilizado porque é o que melhor representa a condição de fim-de-vida da isolação celulósica (SUÑE, 2001).
- *Método Análise dos Gases Dissolvidos (DGA)* – a concentração dos gases dissolvidos no óleo são os principais dados para análise deste método. O óleo isolante, o papel e outros isolantes sólidos sofrem, sob a ação da temperatura e de esforços elétricos, decomposições químicas que resultam na formação de gases. Estes gases ficam dissolvidos no óleo e são extraídos através do processo de cromatografia (ITAIPU, 2003), por isso, este método também é conhecido como *análise cromatográfica do óleo isolante* ou *ensaio gás-cromatográfico*.

O método de análise utilizado neste trabalho é o DGA, portanto somente o processo de diagnóstico deste método será explicado na seção seguinte.

4.5 Diagnóstico a Partir da Análise dos Gases Dissolvidos

A amostra de óleo retirada do equipamento passa pelo ensaio, onde são examinados os gases com o cromatógrafo, aparelho utilizado para medir a concentração em partes por milhão (ppm) de cada gás. O processo de extração dos gases no laboratório está descrito com mais profundidade por Suñe (2001).

A concentração dos gases dissolvidos (sensibilidade), expressa em ppm, é obtida pela divisão do volume de cada gás pelo volume do óleo extraído, geralmente 25ml, à temperatura de 23° C.

Os gases obtidos no ensaio, bem como a sensibilidade para cada gás, estão listados na Tabela 2.

Gás		Sensibilidade(ppm) (vol. gás/vol. óleo)
H ₂	Hidrogênio	0.5
O ₂	Oxigênio	0.7
N ₂	Nitrogênio	1.0
CH ₄	Metano	2.0
CO	Monóxido de Carbono	3.0
CO ₂	Dióxido de Carbono	3.0
C ₂ H ₄	Etileno	1.0
C ₂ H ₆	Etano	2.0
C ₂ H ₂	Acetileno	3.0
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre	(*)

Tabela 2. Gás medido e sensibilidade de cada gás (SUÑE, 2001)

Para a análise, também devem ser consideradas a concentração total dos gases dissolvidos e a concentração total dos gases combustíveis, apresentados na Tabela 13.

Determinada a quantidade dos gases, a análise dos resultados é realizada de acordo com regras e regulamentações definidas em normas e critérios, apresentados a seguir.

4.5.1 Normas e Métodos utilizados para Diagnóstico

Conforme evoluíram as técnicas para diagnóstico de transformadores a partir da concentração de gases dissolvidos, tanto laboratórios como pesquisadores e entidades normativas definiram diversas normas e critérios. Entre elas, podem ser citadas (SCM47; SUÑE, 2001):

- Norma NBR 7274;
- Critério de Rogers;
- Critério desenvolvido pelo Laborelec;
- Critério de Duval;
- Critério de Dörnemburg;
- Critério de Pugh;
- Critério de Gás-Chave

Tanto o critério de Rogers como a NBR 7274 são utilizados no processo de diagnóstico dos transformadores da Central Hidrelétrica de Itaipu. Entretanto, para este trabalho será utilizado apenas critério de Rogers, pois apresenta uma relação de gases a mais que a norma NBR 7274, conseqüentemente mais combinações entre as relações (vide Tabela 3) e um número maior de diagnósticos (vide Tabela 4). Portanto, a solução apresentada pelo critério de Rogers é melhor que a apresentada pela norma NBR 7274.

Processo de Análise e Diagnóstico

Esta seção expõe, de forma simplificada, como obter os diagnósticos utilizando as tabelas de conhecimento definidas pelo critério Rogers. No capítulo seguinte

está demonstrado o aprimoramento realizado sobre estas tabelas (SUÑE, 2001).

O critério de Rogers consiste, essencialmente, em associar quatro relações entre cinco dos gases obtidos no ensaio à condição operativa do equipamento.

A Tabela 3 apresenta as relações entre os gases metano e hidrogênio (R1), etano e metano (R2), etileno e etano (R3), acetileno e etileno. Desta forma, basta localizar os dados na tabela.

	R1=CH₄/H₂	R2=C₂H₆/CH₄	R3=C₂H₄/C₂H₆	R4=C₂H₂/C₂H₄
0.1 > R	5	0	0	0
0.1 ≤ R < 1	0	0	0	1
1 ≤ R < 3	1	1	1	1
R ≥ 3	2	1	2	2

Tabela 3. Relações propostas pelo critério Rogers. Adaptado de SUÑE (2001)

Encontrado os valores das relações, conforme exige a Tabela 3, os resultados obtidos devem ser aplicados na segunda tabela (Tabela 4), que apresenta os diagnósticos associados aos valores de cada relação.

Diagnóstico		Relações			
		CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₆ / CH ₄	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄
1	Deterioração Normal	0	0	0	0
2	Descargas parciais de baixa energia	5	0	0	0
3	Descargas parciais de alta energia	5	0	0	1
4	Descargas de baixa energia, arco sem potência	0	0	0	1
5	Descargas de baixa energia, potencial em flutuação	0	0	1	1
6	Descargas de baixa energia, potencial em flutuação	0	0	1	2
7	Descargas de alta energia	0	0	2	1
8	Descargas de alta energia	0	0	2	2
9	Sobreaquecimento do condutor isolado	0	0	1	0
10	Falha térmica baixa (<150 °C)	0	1	0	0
11	Falha térmica média (100 - 200 °C)	0	1	0	0
12	Falha térmica média (100 - 200 °C)	1	1	0	0
13	Falha térmica média (100 - 200 °C)	2	1	0	0
14	Falha térmica alta (150 – 300 °C)	1	0	1	0
15	Falha térmica muito alta (300-700 °C)	1	0	2	0
16	Falha térmica muito alta (300-700 °C)	2	0	2	0

Tabela 4. Diagnósticos do critério Rogers. Adaptado de SUÑE (2001)

Assim, obtidos os valores através das relações, basta encontrar a linha em que os mesmos se enquadram e então apresentar o diagnóstico.

Entretanto, observando a Tabela 4, verifica-se que ela não é completa o suficiente para definir todas as condições possíveis que as relações podem gerar. Esta tabela apresenta 16 diagnósticos, mas considerando as combinações possíveis das 4 relações, a tabela completa deveria apresentar 72 diagnósticos, descritos na Tabela 8. Verifica-se que existem 56 combinações sem diagnóstico proposto.

Um exemplo de combinação não contemplada pela Tabela 4 é apresentado na Tabela 5.

CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₆ /CH ₄	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄
1	0	0	0

Tabela 5. Exemplo de combinação não atendida pelo critério Rogers.

Durante as pesquisas de seu trabalho, Suñe (2001) considerou 7822 amostras e chegou às seguintes conclusões quanto à norma NBR 7274 e ao critério de Rogers:

- Utilizando o critério de Rogers, com 32,639% dos casos não são obtidos diagnósticos.
- Utilizando a norma NBR 7274, com 11,57% dos casos não são obtidos diagnósticos.

No capítulo de implementação do sistema, onde são demonstrados os resultados da pesquisa de Suñe (2001) para tratar destas falhas, será constatado que o diagnóstico para a combinação mostrada na Tabela 5 será *Falha Térmica Baixa (150 °C)*.

4.6 Sistema de Supervisão e Diagnóstico dos Equipamentos de Transmissão

Como citado no início da seção 2.4, este trabalho implementa o módulo DGA do sistema SSD, utilizando como técnica de análise e diagnóstico o critério de Rogers.

O sistema SSD é composto dos seguintes módulos

- **DGA** - Análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo isolante do transformador. Este método de ensaio indica a condição operativa do equipamento a partir da análise dos gases presentes no óleo. Este módulo deverá contemplar as técnicas de análise e diagnóstico do critério de Rogers, da norma NBR 7274 e da norma Laborelec.

- **AFQ** - Análise Físico Química do óleo isolante indica a condição físico-química do óleo isolante como rigidez dielétrica, tangente delta, teor de água, cor, acidez, tensão interfacial, etc;
- **Furfural** – Objetivo deste método de ensaio é definir o teor de 2-furfuraldeído dissolvido no óleo do transformador e, com isso, verificar o envelhecimento da isolação sólida do transformador;
- **Partículas** – Quantifica o número de partículas em suspensão no óleo isolante e, de acordo com a quantidade obtida, diagnostica-se o estado operativo do transformador.
- **Diag** – emitir diagnósticos a partir de dados oriundos do sistema de monitoramento em tempo real. Ex. temperatura, umidade, corrente, - tensão, quantidades de ppm de gases dissolvidos, etc.
- **Vibração** – Analisar o estado operativo do equipamento a partir do resultado da vibração obtida nos sensores distribuídos sobre o transformador.

O sistema proposto neste trabalho é sobre o método de ensaio DGA. Mais especificamente deseja-se gerar diagnóstico a partir do critério de Rogers. Além deste critério, a mesma lógica utilizada será aplicada nos critério Laborelec e na norma NBR 7274, que são outras saídas de diagnóstico para o ensaio DGA.

Para o ensaio AFQ, Adriana (2004) fez pesquisas sobre a viabilidade da aplicação de lógica Fuzzy na otimização dos valores limites deste ensaio e seus diagnósticos.

5 Proposta e Desenvolvimento do Sistema

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta o projeto e implementação do Sistema Especialista Fuzzy para Diagnóstico de Transformadores de Potência. Como metodologia, foram consideradas as etapas de levantamento de requisitos, estruturação e representação do conhecimento, projeto do sistema, implementação e testes.

No projeto também são apresentadas as melhorias e aprimoramentos no critério de Rogers, propostas por Suñe (2001), para eliminar as falhas deste método mostradas na seção 4.4.

Cabe ressaltar que detalhes técnicos sobre a definição de tabelas e fluxos relativos ao processo de diagnósticos estão além do escopo deste trabalho. Este capítulo está dirigido a apresentar um modelo de Sistema Especialista Fuzzy sobre normas e critérios de análise e diagnóstico já estabelecidos. Mais informações sobre definição de métodos de ensaio e diagnóstico de transformadores podem ser encontradas no trabalho de Suñe (2001).

Assim sendo, este capítulo foi estruturado de acordo com as etapas do desenvolvimento do sistema, ficando assim distribuído:

- Seleção da ferramenta para implementação do sistema
- Definir as formas de aquisição do conhecimento e sua representação
- Projeto do Sistema
- Módulo Rogers
 - Dados de Entrada
 - Base de Conhecimento
- Módulo Gás-Chave
 - Dados de Entrada
 - Base de Conhecimento
 - “Fuzzyficação”
 - “Defuzzyficação”

- Módulo Gás-Chave Rogers
 - Dados de Entrada
 - Base de Conhecimento
- Verificação e exemplo de aplicação
- Testes

5.2 Ferramenta de Implementação do Sistema

A escolha da ferramenta para implementação do trabalho deveria atender aos seguintes requisitos:

- Software de uso livre, gratuito e de fácil aquisição;
- Possível de ser obtida pela Internet;
- Integração com Java, de preferência podendo gerar código nesta linguagem para deixar o sistema portátil;
- Ambiente de desenvolvimento com interface gráfica, de uso fácil e intuitivo

Dentro dessas requisições, foi escolhida a ferramenta Xfuzzy (XFUZZY, 2004) na versão 3.0, construída pelo Instituto de Microeletrônica de Sevilha – Espanha.

O seu ambiente de desenvolvimento, escrito em Java, foi projetado especificamente para construção de sistemas Fuzzy. Ela possui um conjunto de ferramentas que abrangem os diferentes estágios do processo de desenvolvimento.

Entre as principais características desta ferramenta está a capacidade de desenvolver sistemas complexos e a flexibilidade para fornecer ao usuário a possibilidade de estender o conjunto de funções disponíveis.

O Projeto da ferramenta Xfuzzy contempla quatro módulos, conforme ilustra a Figura 21:

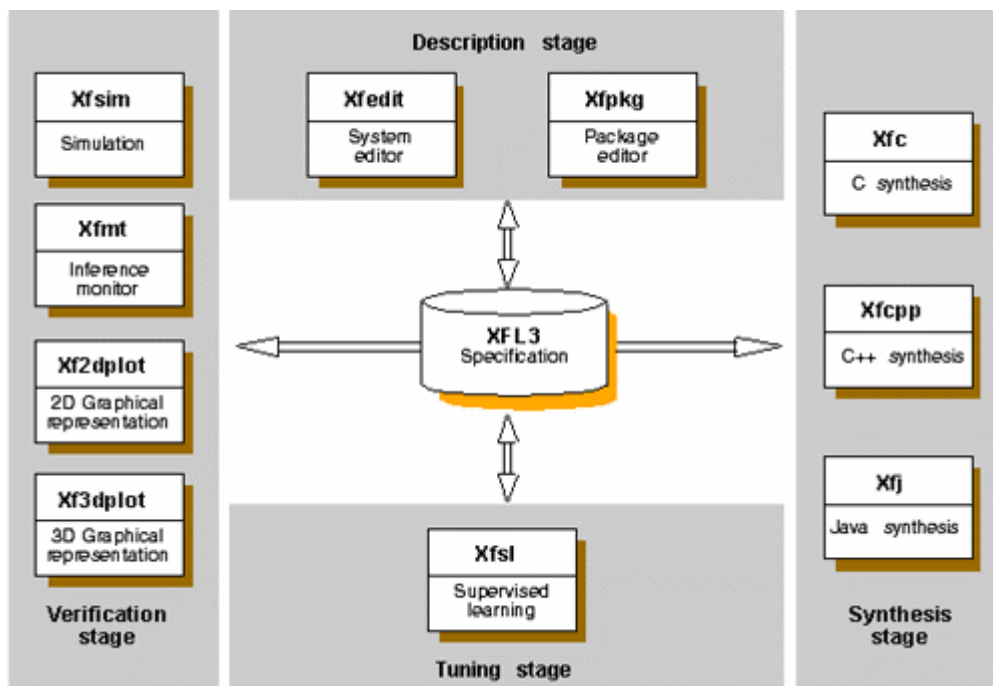


Figura 21. Módulos da ferramenta Xfuzzy (XFUZZY, 2004)

O primeiro módulo, de descrição (*Description stage*), possui duas ferramentas gráficas para definição do sistema Fuzzy, o *xfedit* e o *xfpkg*. O primeiro é uma interface com várias janelas que facilitam descrição do sistema, permitindo criar e editar os operadores, os tipos das variáveis lingüísticas e a base de regras. A Figura 22 apresenta esta interface.

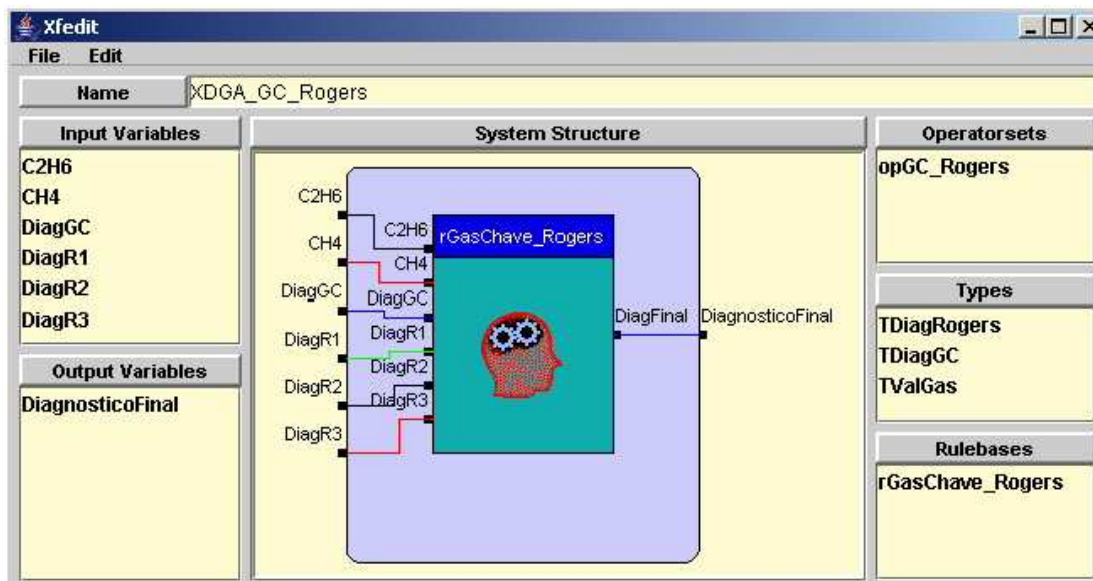


Figura 22. Xfedit –Tela principal do XFuzzy.

O *xfpkg* é uma ferramenta exclusiva para edição dos pacotes, onde estão especificadas as descrições matemáticas das funções usadas nos conectivos, nas variáveis lingüísticas, nas funções de pertinência e nos métodos de “Defuzzyficação”. A Figura 23 apresenta esta ferramenta.

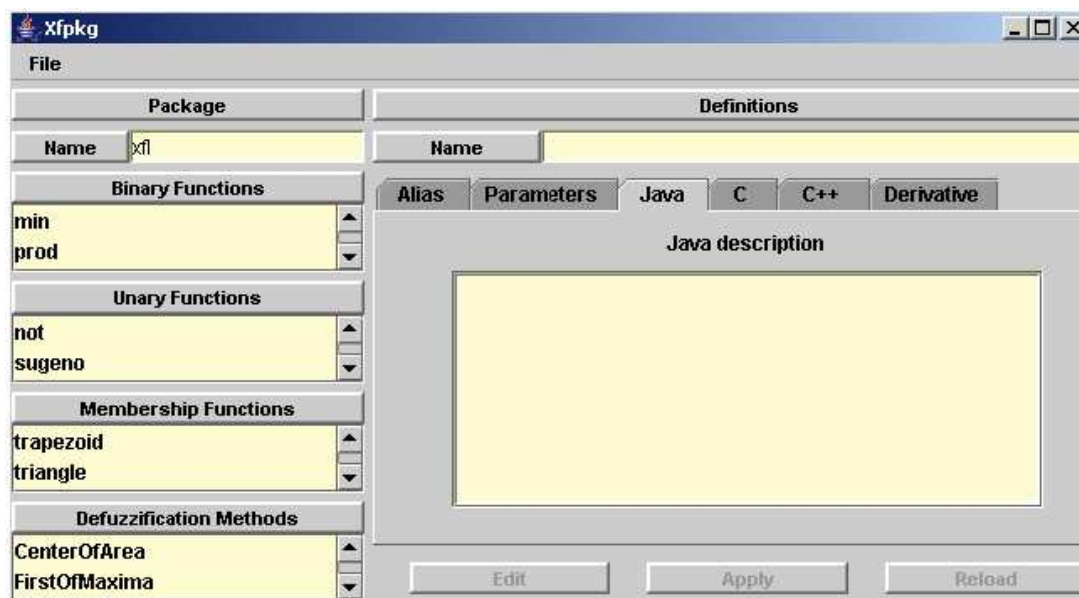


Figura 23. Xfpkg – Tela para edição de pacotes do Xfuzzy

O módulo de verificação contém ferramentas para simulação, monitoramento e representação gráfica do comportamento do sistema. O

objetivo deste módulo é permitir o estudo do comportamento do sistema Fuzzy durante seu desenvolvimento.

Para isto, o Xfuzzy disponibiliza quatro ferramentas, o *xf2dplot*, o *xf3dplot*, o *xfmt* e o *xfsim*. Os dois primeiros são representações gráficas em duas e três dimensões, respectivamente, do comportamento do sistema, conforme demonstra a Figura 24 e a Figura 25.

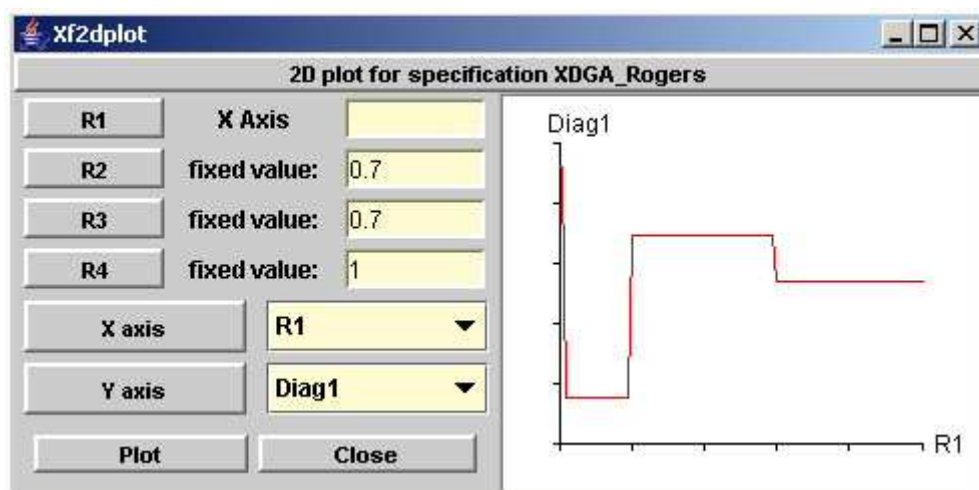


Figura 24. Xf2dplot – Representação gráfica em duas dimensões.

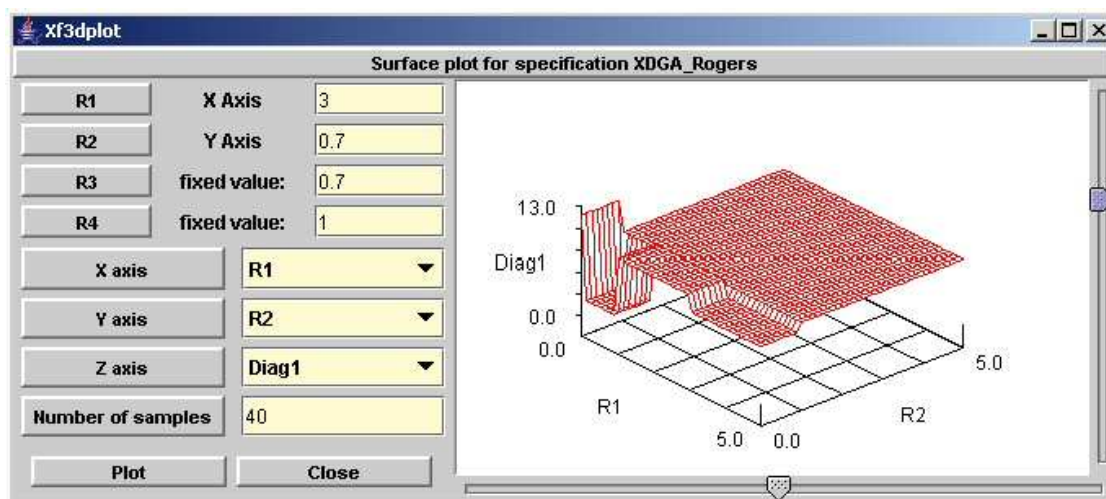


Figura 25. Xf3dplot – Representação gráfica em três dimensões.

O *xfmt* é a ferramenta que permite monitorar o comportamento do sistema, bem como o valor de cada variável lingüística e a regra lógica, conforme são alterados os valores de entrada. A Figura 26 demonstra esta ferramenta em uso para verificar os valores do sistema.

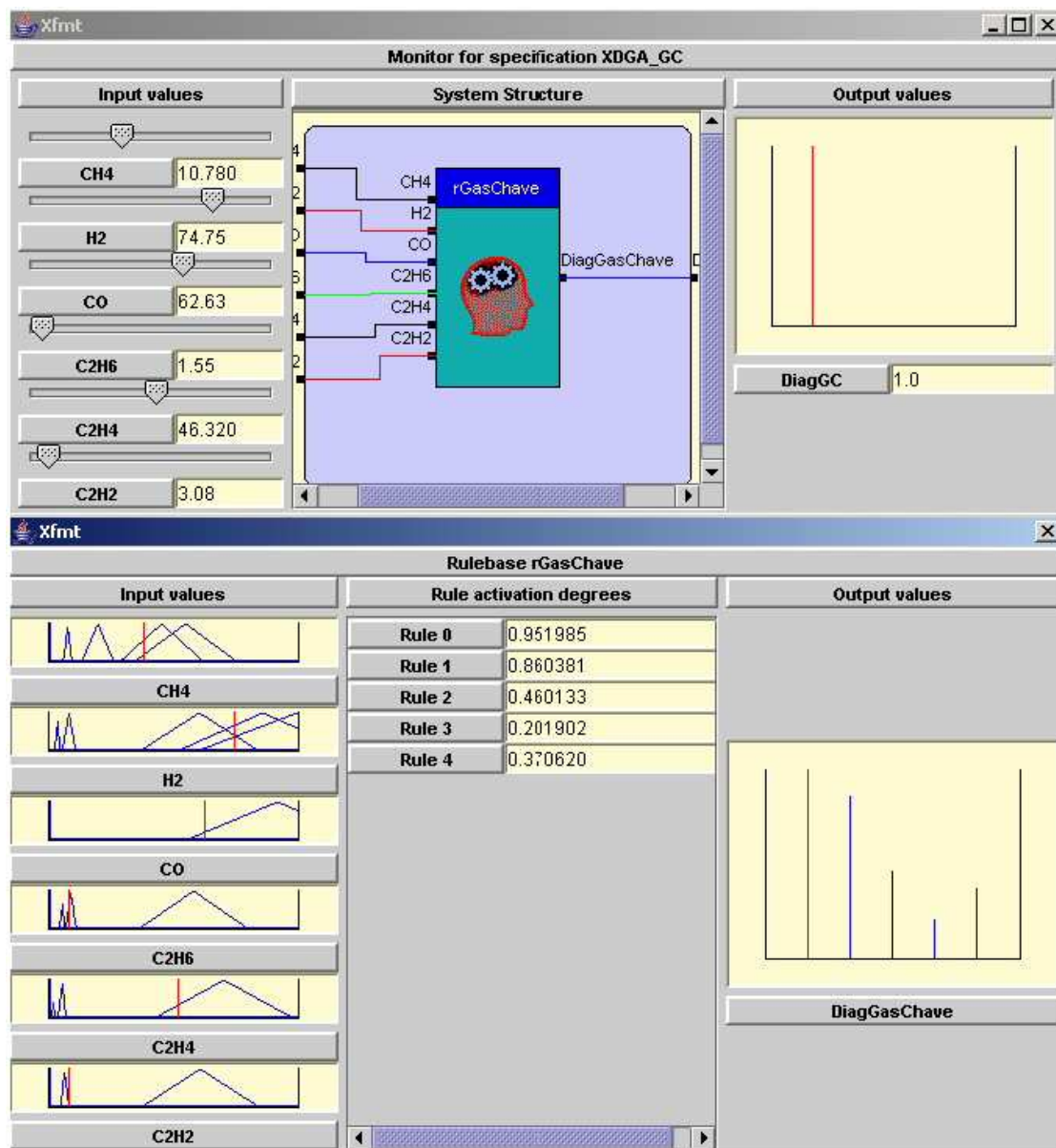


Figura 26. Xfimt – Monitora o comportamento do sistema

O *xfsim* é uma ferramenta que possibilita estudar o sistema a partir de seu “feedback”. Para isto, deve ser criada uma classe que implementa a interface *xfuzzy.PlantModel*. O Anexo A possui a implementação de uma classe utilizada para testar o sistema. A Figura 27 apresenta esta ferramenta configurada para testar um dos módulos do sistema:

The screenshot shows the Xfsim software window titled "Simulation for specification XDGA". The interface is divided into several sections:

- Simulation model:**
 - Plant model: `simula.XDGAModel`
 - Simulation limit: `< 100.0 & VCH4 > 0.0 & VC`
 - Initial values: `default`
- Evolution:**
 - Iteration (`_n`): 1.0
 - Time (`_t`): 0.0 ms
- Plant state:**

CH4	2.55
H2	63.06
CO	31.85
C2H6	0.64
C2H4	1.91
C2H2	0.0
R1	0.7
R2	2.0
R3	0.7
R4	0.7
VC2H6	15.0
VCH4	5.0
- Fuzzy system output:**
 - DiagnosticFinal: 2.0
- Simulation output:** A large empty yellow area with the text `plot(_n,DiagnosticFinal,0)` at the top.

At the bottom of the window, there are five buttons: Load, Save, Run, Reload, and Close.

Figura 27. Xfsim – Efetua testes no sistema através de simulações

O módulo de *tunning* permite identificar necessidades de ajustes no sistema, conforme são ajustados os diferentes parâmetros das funções de pertinência. Por se tratar de um trabalho que demanda muito esforço, alterando simultaneamente os parâmetros, o Xfuzzy disponibiliza um mecanismo para automatizar este processo, o *xfs/*, que é baseado no uso de algoritmos de aprendizado supervisionado. A Figura 28 apresenta a interface desta ferramenta de *tunning*.

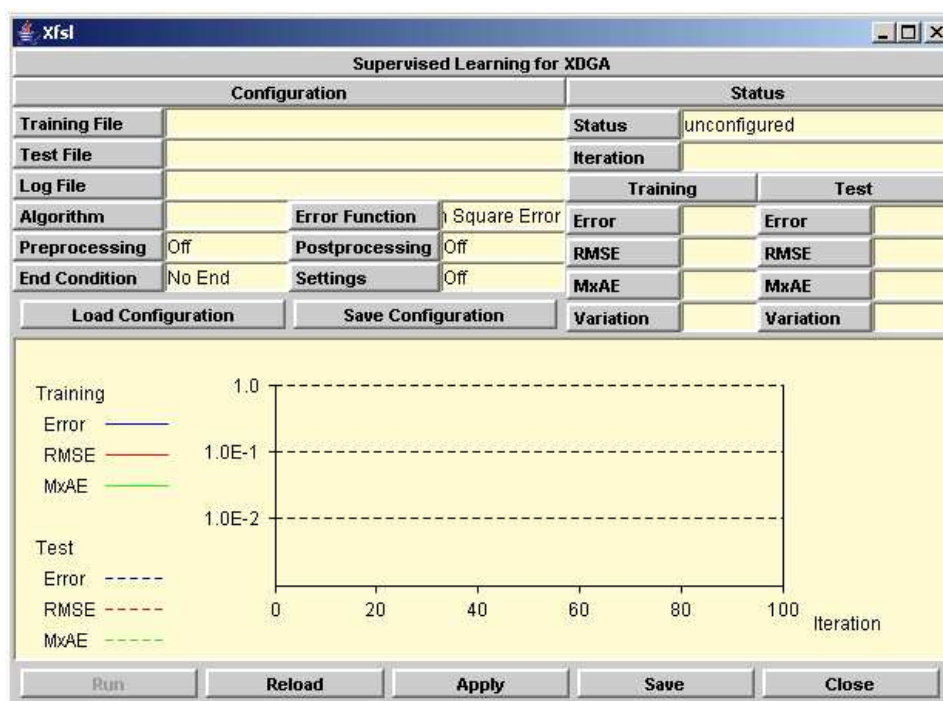


Figura 28. Xfsl – Permite fazer ajustes nos sistemas

O último módulo é responsável por gerar uma representação que pode ser usada externamente ao Xfuzzy, ou seja, cabe ao módulo *synthesis* gerar código tanto para linguagem de alto nível (Java, C e C++) como para circuito microeletrônico, em VHDL (BERTASI, 2002).

5.3 Aquisição do Conhecimento e Forma de Representação

A principal forma de aquisição do conhecimento foi através da realização de entrevistas junto ao especialista. Como parte do processo investigativo, também foram pesquisados diversos trabalhos e publicações sobre o assunto, além dos materiais técnicos sugeridos pelo especialista e de materiais produzidos e/ou utilizados pela Itaipu, todos com suas referências na bibliografia deste trabalho.

O conhecimento obtido será representado de acordo com o padrão definido pela técnica de regras de produção.

5.4 Projeto Sistema Especialista Fuzzy

De acordo com o problema definido, o Sistema Especialista Fuzzy foi projetado conforme demonstrado na Figura 29:

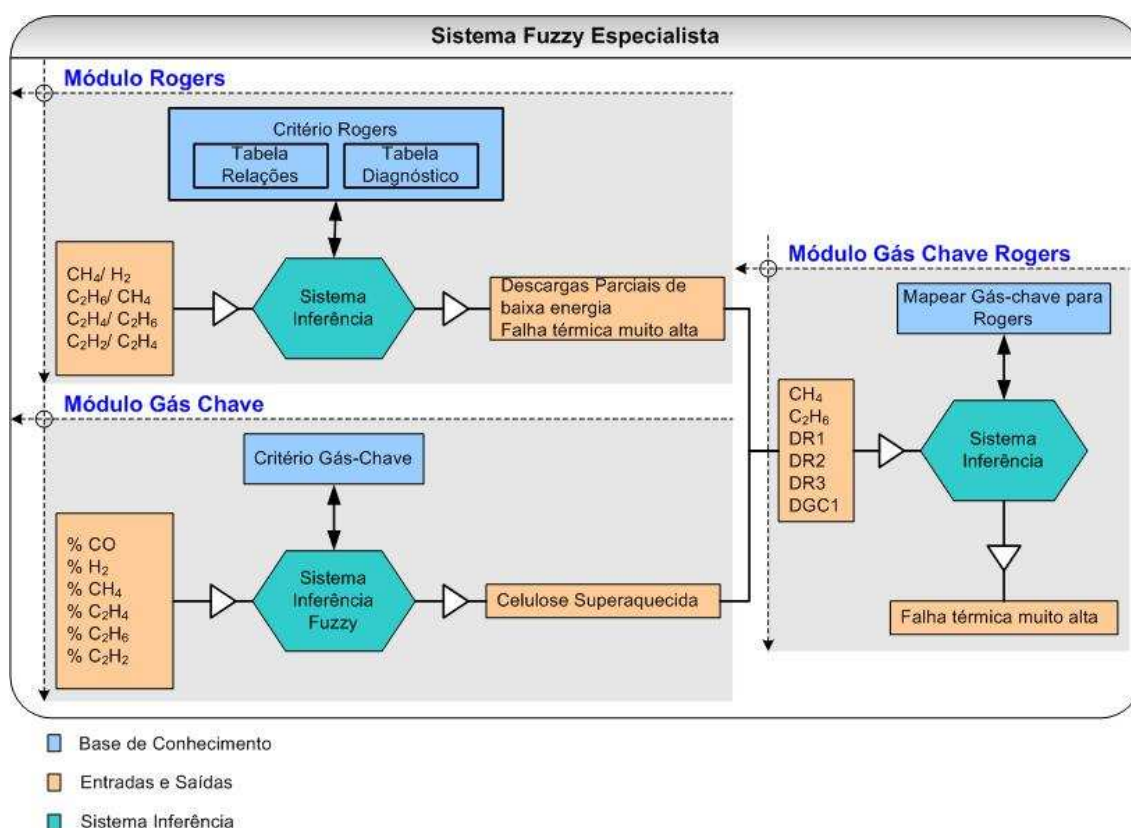


Figura 29. Projeto Sistema Especialista Fuzzy

Este modelo foi criado e apresentado ao especialista. A base de definição deste modelo é seu trabalho sobre manutenção preditiva inteligente de transformadores via análise cromatográfica (SUÑE, 2001).

O projeto do sistema foi estruturado em três módulos:

- Módulo Rogers – contempla o diagnóstico definido pelo critério de Rogers;

- Módulo Gás-Chave – contempla o diagnóstico definido pelo critério de Gás-Chave, onde cada diagnóstico corresponde a uma função de pertinência para cada gás.;
- Módulo Gás-Chave Rogers – contém as regras que decidem entre os diagnósticos gerados por Rogers, de acordo com o diagnóstico gerado por Gás-Chave.

De forma sucinta, o sistema recebe o valor de cada gás obtido na amostra de óleo, passa pelo motor de inferência do módulo *Rogers* e apresenta o resultado. Caso este resultado apresente dois diagnósticos (D1 e D2), o módulo *Gás-Chave* é chamado para definir qual o mais pertinente. Para isto, são calculados os percentuais de cada gás e passados ao motor de inferência Fuzzy. O resultado (DF1), juntamente com os diagnósticos D1 e D2 e os gases C_2H_6 e CH_4 , são passados ao próximo motor de inferência do módulo *Gás-Chave Rogers*, que definirá se o diagnóstico final é D1 ou D2.

Este processo é explicado com detalhes nas seções a seguir, que tratam de cada módulo do sistema em específico.

É importante ressaltar que o sistema, depois de implementado na ferramenta Xfuzzy, foi transformado em código Java através de um utilitário desta ferramenta. Assim sendo, foi criada uma classe Java que faz a chamada a cada módulo do sistema e obtém seus resultados para apresentar ao usuário.

A Figura 30 apresenta a classe que faz as invocações aos três módulos do Sistema Especialista Fuzzy:

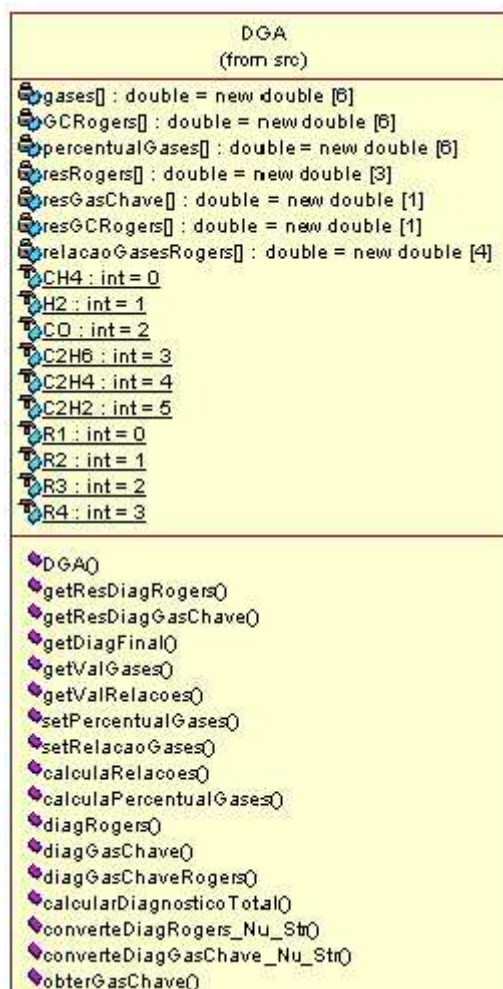


Figura 30. Classe DGA

O projeto de classe do sistema, que contém as classes e interfaces geradas pela ferramenta, está no Anexo B.

5.5 Sistema: Módulo Rogers

O Módulo Rogers implementa as regras definidas pelo critério de Rogers para diagnóstico de transformadores a partir da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante (Capítulo 4).

A Figura 31 ilustra as entradas, saídas e o motor de inferência deste módulo:

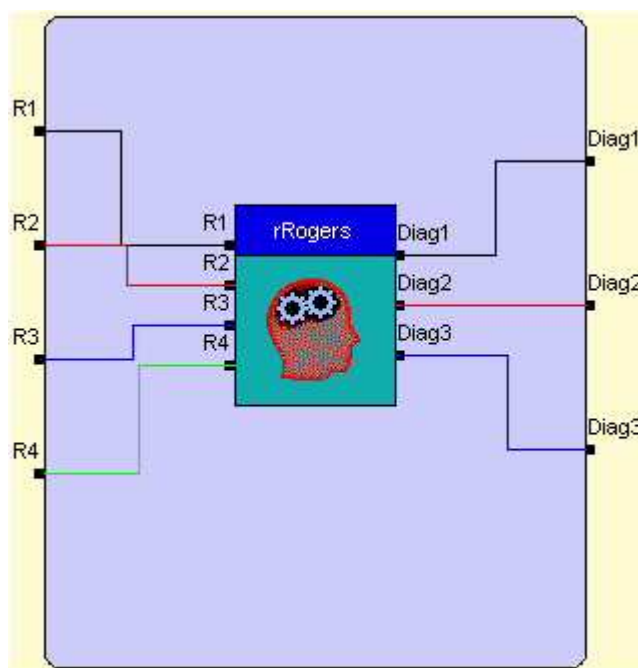


Figura 31. Representação do Módulo Rogers no Xfuzzy

Conforme apresentado no capítulo 4, a aplicação direta deste critério não contempla todas as possibilidades de diagnóstico, pois em seu conjunto de regras existem muitas condições sem diagnóstico proposto. Devido a isto, este módulo implementa as melhorias propostas por Suñe (2001), que visam reduzir o percentual de ensaios que não possuíam diagnóstico.

Com o objetivo de diminuir a quantidade de possibilidades sem diagnóstico, Suñe (2001) utilizou algumas técnicas, em especial *Rough Sets* (PAWLAK, 1991; PAWLAK, 1996). Como resultado, a tabela de diagnóstico foi transformada de forma a suprir as falhas.

O objetivo deste trabalho não é explicar as técnicas nem demonstrar os métodos que resultam nas tabelas ajustadas, sendo que este trabalho exige conhecimentos de química e física, relacionados à construção e manutenção dos transformadores. Assim, serão apenas apresentados de forma sucinta, pois são requisitos para a elaboração do trabalho proposto. As técnicas e métodos utilizados para ajustar as tabelas do Critério Rogers são apresentados com detalhes no trabalho de Suñe (2001).

A nova tabela de diagnóstico, após a aplicação de *Rough Sets*, está mostrada na Tabela 8 (pg. 68-72).

Anteriormente, das 72 combinações de resultados possíveis, 56 não apresentavam diagnóstico proposto.

Com a aplicação da técnica de *Rough Sets*, das 72 combinações possíveis de resultado, 70 combinações passaram a apresentar diagnóstico proposto. Porém, com 28 possibilidades de duplo diagnóstico e com 10 possibilidades de triplo diagnóstico, como pode ser notado na Tabela 5, que apresenta saídas idênticas para entradas diferentes.

Entretanto, com os aprimoramentos realizados na tabela, um novo problema surgiu. Como uma mesma entrada pode gerar mais de um diagnóstico, qual diagnóstico deve ser considerado?

Como solução para este problema, serão utilizados os conceitos de *Conjuntos Fuzzy* juntamente com o *Critério de Gás-Chave* (NBR7274, 1981), Este novo critério de análise é apresentado na seção 5.6.

5.5.1 Dados de Entrada do Módulo Rogers

Como entrada de dados estão as relações entre os gases (SUÑE, 2001), apresentados na Tabela 6.

Relações	
R1	CH ₄ /H ₂
R2	C ₂ H ₆ /CH ₄
R3	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
R4	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆

Tabela 6. Dados de entrada Módulo Rogers - relações dos gases

Obtidos os dados com as concentrações dos gases, estes são processados com base em tabelas padrões, definidas por normas e critérios, utilizadas para fazer relação entre os gases e apresentar os diagnósticos.

5.5.2 Base de Conhecimento

A base de conhecimento corresponde aos valores dos diagnósticos bem como as regras necessárias à obtenção dos diagnósticos em cada situação.

Diagnósticos	
01	Deterioracao_Normal
02	Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia
03	Sem_Diagnostico
04	Sobreaquecimento_Condutor_Isolado
05	Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao
06	Descargas_Alta_Energia
07	Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C
08	Falha_Termica_Media_100_200_C
09	Falha_Termica_Baixa_150C
10	Falha_Termica_Alta_150_300C
11	Descargas_Parciais_Baixa_Energia
12	Descargas_Parciais_Alta_Energia

Tabela 7. Tabela de diagnósticos - Módulo Rogers

A seguir, é apresentado o código fonte para implementação da Tabela 7 na ferramenta XFuzzy. A utilização de função *singleton* garante que os valores não apresentarão dispersão.

```
type TDiagRogers [0.0,13.0;256] {
    Deterioracao_Normal xfl.singleton(1.0);
    Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia xfl.singleton(2.0);
    Sem_Diagnostico xfl.singleton(3.0);
    Sobreaquecimento_Condutor_Isolado xfl.singleton(4.0);
    Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao xfl.singleton(5.0);
    Descargas_Alta_Energia xfl.singleton(6.0);
    Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C xfl.singleton(7.0);
    Falha_Termica_Media_100_200_C xfl.singleton(8.0);
    Falha_Termica_Baixa_150C xfl.singleton(9.0);
    Falha_Termica_Alta_150_300C xfl.singleton(10.0);
    Descargas_Parciais_Baixa_Energia xfl.singleton(11.0);
```

```

Descargas_Parciais_Alta_Energia xfl.singleton(12.0);
}

```

- *Define o valor da variável R1*
 - SE $(0 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 0.1)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R1 = cinco
 - SE $(0.1 \leq \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R1 = zero
 - SE $(1 \leq \text{CH}_4/\text{H}_2 < 3)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R1 = um
 - SE $(\text{CH}_4/\text{H}_2 \geq 3)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R1 = dois

- *Define o valor da variável R2*
 - SE $(0 < \text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4 < 0.1)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R2 = zero
 - SE $(0.1 \leq \text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4 < 1)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R2 = zero
 - SE $(1 \leq \text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4 < 3)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R2 = um
 - SE $(\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4 \geq 3)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R2 = um

- *Define o valor da variável R3*
 - SE $(0 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R3 = zero
 - SE $(0.1 \leq \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R3 = zero
 - SE $(1 \leq \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 3)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R3 = um
 - SE $(\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 \geq 3)$ = VERDADEIRO
ENTÃO R3 = dois

- *Define o valor da variável R4*

SE $(0 < C_2H_2/C_2H_4 < 1) = \text{VERDADEIRO}$

ENTÃO R4 = zero

SE $(0.1 \leq C_2H_2/C_2H_4 < 1) = \text{VERDADEIRO}$

ENTÃO R4 = um

SE $(1 \leq C_2H_2/C_2H_4 < 3) = \text{VERDADEIRO}$

ENTÃO R4 = um

SE $(C_2H_2/C_2H_4 \geq 3) = \text{VERDADEIRO}$

ENTÃO R4 = dois

- *Definir os Diagnósticos*

Como existem 72 combinações possíveis, mostrados na Tabela 8, de acordo com o resultado das regras anteriores, a representação das regras de diagnóstico será realizada através de tabela, pois desta forma a leitura fica mais simples. As definições do conjunto de regras utilizadas pela ferramenta Xfuzzy estão demonstradas no Anexo C.

Utilizando a primeira linha da Tabela 8 como exemplo de leitura das regras:

SE (R1 = zero) E (R2 = zero) E (R3 = zero) E (R4 = zero)

ENTÃO Diagnostico = "Deterioração normal"

	R1	R2	R3	R4	Diagnósticos (D1, D2, D3)
1	zero	zero	zero	zero	Deterioração normal
2	zero	zero	zero	um	Descarga baixa energia, arco sem potência.
3	zero	zero	zero	dois	Sem diagnostico proposto
4	zero	zero	um	zero	Sobreaquecimento condutor isolado
5	zero	zero	um	um	Descarga baixa energia: potencial flutuação
6	zero	zero	um	dois	Descarga baixa energia: potencial flutuação.
7	zero	zero	dois	zero	Descarga de alta energia
8	"	"	"	"	Falha térmica muito alta (300 – 700)
9	zero	zero	dois	um	Descarga de alta energia
10	zero	zero	dois	dois	Descarga de alta energia

11	zero	um	zero	zero	Falha térmica média(100-200C)
12	zero	um	zero	um	Falha térmica média(100-200C)
13	”	”	”	“	Descarga de alta energia, arco sem potência
14	zero	um	zero	dois	Falha térmica média (100-200C)
15	zero	um	um	zero	Falha térmica média (100-200C)
16	”	”	”	“	Sobreaquecimento condutor isolado
17	zero	um	um	um	Falha térmica média (100-200C)
18	”	”	”	“	Descarga baixa energia :potencial flutuação.
19	zero	um	um	dois	Falha térmica média (100-200C)
20	”	”	”	“	Descarga baixa energia :potencial flutuação.
21	zero	um	dois	zero	Falha térmica média (100-200C)
22	”	”	”	“	Descarga de alta energia
23	”	”	”	“	Falha térmica muito alta(300-700C)
24	zero	um	dois	um	Falha térmica média (100-200C)
25	”	”	”	“	Descarga de alta energia
26	zero	um	dois	dois	Falha térmica média (100-200C)
27	”	”	”	“	Descarga de alta energia
28	um	zero	zero	zero	Falha térmica baixa(150C)
29	um	zero	zero	um	Falha térmica baixa(150C)
30	um	zero	zero	dois	Falha térmica baixa(150C)
31	um	zero	um	zero	Falha térmica alta(150 -300C)
32	um	zero	um	um	Falha térmica alta(150 -300C)
33	”	”	”	“	Descarga baixa energia :potencial flutuação.
34	um	zero	um	dois	Falha térmica alta(150 -300C)
35	”	”	”	“	Descarga baixa energia :potencial flutuação.
36	um	zero	dois	zero	Falha térmica muito alta(300 -700C)
37	um	zero	dois	um	Falha térmica muito alta(300 -700C)
38	”	”	”	“	Descarga de alta energia
39	um	zero	dois	dois	Falha térmica muito alta(300 -700C)
40	”	”	”	“	Descarga de alta energia
41	um	um	zero	zero	Falha térmica média(100 -200C)
42	um	um	zero	um	Falha térmica média (100 -200C)

43	um	um	zero	dois	Falha térmica média (100 -200C)
44	um	um	um	zero	Falha térmica média (100 -200C)
45	”	”	”	“	Falha térmica alta(150-300C)
46	um	um	um	um	Falha térmica muito alta(100 -200C)
47	”	”	”	“	Falha térmica alta(150-300C)
48	”	”	”	“	Descarga baixa energia :potencial flutuação.
49	um	um	um	dois	Falha térmica média (100-200C)
50	”	”	”	“	Falha térmica alta (150-300C)
51	”	”	”	“	Descarga baixa energia: potencial flutuação
52	um	um	dois	zero	Falha térmica média (100-200C)
53	”	”	”	“	Falha térmica muito alta (300-700C)
54	um	um	dois	um	Falha térmica média (100-200C)
55	”	”	”	“	Falha térmica muito alta (300-700C)
56	”	”	”	“	Descarga de alta energia
57	um	um	dois	dois	Falha térmica média (100-200C)
58	”	”	”	“	Falha térmica muito alta (300-700C)
59	”	”	”	“	Descarga de alta energia
60	dois	zero	zero	zero	Falha térmica muito alta (300-700C)
61	dois	zero	zero	um	Falha térmica muito alta (300-700C)
62	dois	zero	zero	dois	Falha térmica muito alta (300-700C)
63	dois	zero	um	zero	Falha térmica muito alta (300-700C)
64	dois	zero	um	um	Falha térmica muito alta (300-700C)
65	”	”	”	“	Descarga baixa energia: potencial flutuação
66	dois	zero	um	dois	Falha térmica muito alta (300-700C)
67	”	”	”	“	Descarga baixa energia: potencial flutuação
68	dois	zero	dois	zero	Falha térmica muito alta (300-700C)
69	dois	zero	dois	um	Falha térmica muito alta (300-700C)
70	”	”	”	“	Descarga de alta energia
71	dois	zero	dois	dois	Falha térmica muito alta (300-700C)
72	”	”	”	“	Descarga de alta energia
73	dois	um	zero	zero	Falha térmica média (100-200C)
74	dois	um	zero	um	Falha térmica média (100-200C)
75	dois	um	zero	dois	Falha térmica média (100-200C)

76	dois	um	um	zero	Falha térmica média (100-200C)
77	dois	um	um	um	Falha térmica média (100-200C)
78	"	"	"	"	Descarga baixa energia :potencial flutuação
79	dois	um	um	dois	Falha térmica média (100-200C)
80	"	"	"	"	Descarga baixa energia :potencial flutuação
81	dois	um	dois	zero	Falha térmica média (100-200C)
82	"	"	"	"	Falha térmica muito alta (300-700C)
83	dois	um	dois	um	Falha térmica média (100-200C)
84	"	"	"	"	Falha térmica muito alta (300-700C)
85	"	"	"	"	Descarga baixa energia
86	dois	um	dois	dois	Falha térmica média (100-200C)
87	"	"	"	"	Falha térmica muito alta (300-700C)
88	"	"	"	"	Descarga alta energia
89	cinco	zero	zero	zero	DP baixa energia
90	cinco	zero	zero	um	DP alta energia
91	cinco	zero	zero	dois	Sem diagnósticos proposto
92	cinco	zero	um	zero	DP baixa energia
93	cinco	zero	um	um	DP alta energia
94	"	"	"	"	Descarga baixa energia : potencial flutuação
95	cinco	zero	um	dois	Descarga baixa energia : potencial flutuação
96	cinco	zero	dois	zero	DP baixa energia
97	"	"	"	"	Falha térmica muito alta (300-700C)
98	cinco	zero	dois	um	DP alta energia
99	"	"	"	"	Descarga alta de energia
100	cinco	zero	dois	dois	Descarga alta de energia
101	cinco	um	zero	zero	Falha térmica média (100-200C)
102	"	"	"	"	DP alta energia
103	cinco	um	zero	um	Falha térmica média(100-200C)
104	"	"	"	"	DP alta energia
105	cinco	um	zero	dois	Falha térmica média (100-200C)
106	cinco	um	um	zero	Falha térmica média (100-200C)
107	"	"	"	"	DP baixa energia
108	cinco	um	um	um	DP alta energia

109	”	”	”	“	Falha térmica média (100-200C)
110	”	”	”	“	Descarga baixa energia : potencial flutuação
111	cinco	um	um	dois	Falha térmica média (100-200C)
112	”	”	”	“	Descarga baixa energia : potencial flutuação
113	cinco	um	dois	zero	DP Baixa energia
114	”	”	”	“	Falha térmica média (100-200C)
115	”	”	”	“	Falha térmica muito alta (300-700C)
116	cinco	um	dois	um	DP alta energia
117	”	”	”	“	Falha térmica média (100-200C)
118	”	”	”	“	Descarga alta de energia
119	cinco	um	dois	dois	Falha térmica média (100-200C)

Tabela 8. Regras para definição de diagnósticos do Módulo Rogers

Conforme mencionado no início desta seção, existem situações em que as combinações das equações podem gerar mais de um diagnóstico para a mesma entrada de valores, como mostra a Tabela 9, onde dois diagnósticos são possíveis para a mesma entrada:

7	zero	zero	Dois	zero	Descarga de alta energia
8	”	”	”	“	Falha térmica muito alta (300 – 700)

Tabela 9. Exemplo de situação com diagnósticos conflitantes

Nestes casos, são utilizadas técnicas de Conjuntos Fuzzy para definir, em termos de pertinência, qual o diagnóstico a ser considerado. A responsabilidade por este processo pertence aos dois módulos seguintes.

5.6 Sistema: Módulo Gás-Chave

Conforme descrito anteriormente, este módulo é necessário no momento em que mais de um diagnóstico é obtido no módulo *Rogers*.

Assim sendo, o objetivo principal deste módulo e do módulo *Gás-Chave Rogers* é decidir entre diagnósticos conflitantes. Para isto, o sistema utilizará o critério de Gás-Chave (NBR7274, 1981) para verificar qual gás combustível é

predominante na amostra de óleo e, após isso, aplicar o resultado ao conjunto de regras que mapeia o resultado do critério Gás-Chave ao critério Rogers.

A Figura 32 ilustra as entradas, saídas e o motor de inferência deste módulo:

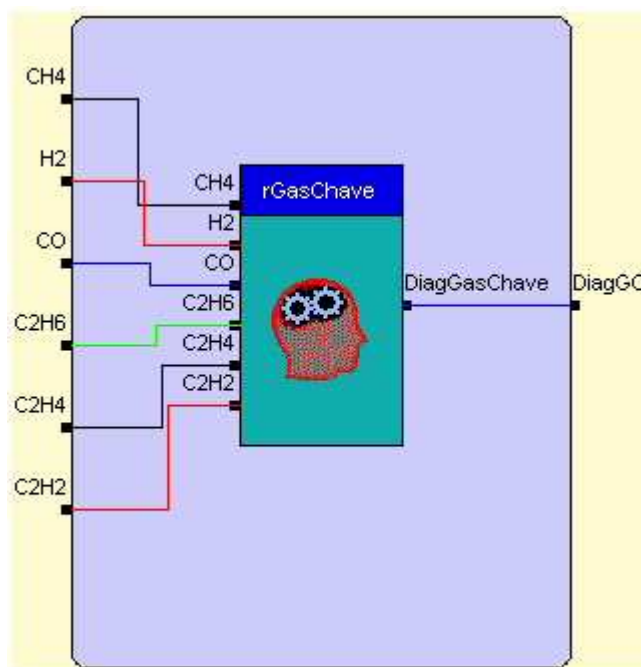


Figura 32. Representação do Módulo Gás-Chave no Xfuzzy

O critério de Gás-Chave (NBR7274, 1981) considera em seus diagnósticos o percentual de cada gás dissolvido no óleo isolante. Cada condição de falha é caracterizada por uma combinação de gases, sendo que o gás predominante é chamado de gás-chave (SUÑE, 2001).

A norma NBR 7274, em seu anexo A, apresenta figuras, tabelas e diagramas. Além das associações entre os gases e o “diagnósticos/falhas” relacionados. A seguir, são apresentados os diagnósticos e os gases associados, conforme esta norma.

- Arco – Grandes quantidades de hidrogênio e acetileno são produzidas, com pequenas quantidades de metano e etileno. Dióxido e monóxido de carbono também podem ser formados caso a falha envolva a celulose. O óleo poderá ser Carbonizado.

Gás-chave – Acetileno.

- Descargas Parciais – Descargas parciais de baixa energia produzem hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etano e etileno.

Quantidades comparáveis de monóxido e dióxido de carbono podem resultar de descargas em celulose.

Gás-chave – Hidrogênio.

- Óleo Superaquecido – Os produtos de decomposição incluem etileno e metano, juntamente com quantidades menores de hidrogênio e etano. Traços de acetileno podem ser formados se a falha é severa ou se envolver contatos elétricos.

Gás-chave – Etileno.

- Celulose Superaquecida – Grandes quantidades de dióxido e monóxido de carbono são liberadas da celulose superaquecida. Hidrocarbonetos gasosos, como metano e etileno, serão formados se a falha envolver uma estrutura impregnada em óleo.

Gás-chave – Monóxido de carbono.

- Eletrólise – A decomposição eletrolítica da água ou a decomposição da água associada com a ferrugem resulta na formação de grandes quantidades de hidrogênio, com pequenas quantidades dos outros gases combustíveis.

Gás-Chave – Hidrogênio.

No anexo F são apresentados gráficos de barra com os valores dos gases em cada um dos diagnósticos propostos por este critério.

5.6.1 Dados de Entrada

Os gases considerados por este critério são mostrados na Tabela 10. Os valores de entrada são expressos em percentual da concentração de cada gás, onde a soma dos percentuais totaliza 100%.

Sigla	Nome	%
CO	Monóxido de Carbono	X ₁
H ₂	Hidrogênio	X ₂
CH ₄	Metano	X ₃
C ₂ H ₄	Etileno	X ₄
C ₂ H ₆	Etano	X ₅
C ₂ H ₂	Acetileno	X ₆

Tabela 10. Dados entrada Módulo Gás-Chave

5.6.2 Base de Conhecimento

A partir dos gases mencionados na Tabela 10, o critério de gás-chave define cinco diagnósticos possíveis, conforme mencionado no início da seção 5.6.

A Tabela 11 relaciona o Gás-chave ao respectivo diagnóstico.

Gás-Chave	Diagnóstico	
C ₂ H ₂	Arco no óleo	D1
H ₂	Descarga Parcial no Óleo	D2
C ₂ H ₄	Óleo Superaquecido	D3
CO	Celulose Superaquecida	D4
H ₂	Eletrólise	D5

Tabela 11. Base conhecimento Módulo Gás-Chave

No Anexo F estão os gráficos que mostram a concentração dos gases em cada diagnóstico proposto por este critério. A Tabela 12 apresenta os valores percentuais de cada gás nos cinco diagnósticos propostos pelo critério (NBR 7274).

Diagnóstico	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
D1 Arco no óleo	0.01	60	5	1.6	3.5	30
D2 Descargas parciais	0.2	86	13	0.5	0.2	0.1
D3 Óleo superaquecido	<0.01	2	16	17	63	2
D4 Celulose superaquecida	92	6.7	1.2	<0.01	<0.01	<0.01
D5 Eletrólise	<0.01	99.9	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

Tabela 12. Valores dos gases para cada diagnóstico

Os valores dos gases, após aplicação da dispersão, são apresentados na seção seguinte.

5.6.3 “Fuzzyficação”

O processo de “Fuzzyficação” consiste em mapear as variáveis de entrada em graus de pertinência, segundo funções de pertinência definidas. No caso em questão, a partir dos valores de percentual dos gases, deve-se definir a pertinência de cada diagnóstico nos seis gases do critério Gás-Chave.

O processo de “Fuzzyficação” é ilustrado pela Figura 33. A entrada são os valores percentuais dos gases e após o processo de “Fuzzyficação” são apresentados os valores fuzzy de cada termo.

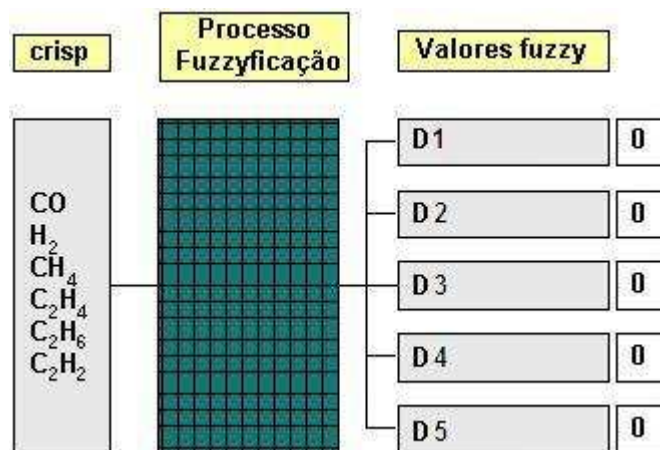


Figura 33. Ilustração do processo de “Fuzzyficação”

Os gráficos a seguir, apresentam as funções de pertinência dos cinco diagnósticos em cada gás, definidos por este critério.

Nos valores de percentual dos gases foi aplicada uma dispersão de 40% de forma a determinar qual o diagnóstico mais pertinente de cada gás, segundo o valor de percentual do gás. Esta dispersão foi definida por Suñe (2001) após pesquisa sobre o comportamento dos gases e o histórico de ensaios.

Entretanto, ao analisar os valores apresentados na Tabela 12, notou-se que a diferença de valor entre os gases em cada diagnóstico é bastante alta. Pode-se tomar de exemplo o diagnóstico Arco no Óleo (D1), onde a maior diferença, 30%, está entre os Gases C₂H₂ e CO.

O mesmo ocorre observando o valor de cada gás nos 5 diagnósticos. Por exemplo, a maior diferença de valor é de mais de 90% para o CO. O valor deste gás em D4 é de 92%, enquanto em D2 é 0,2%.

As grandes diferenças entre os valores dos gases, mostradas nos dois parágrafos anteriores, demonstram as lacunas que existirão no universo de discurso de cada função de pertinência, mesmo com a dispersão de 40% destes valores.

Por causa disto, foram definidos os termos SD1, SD2, SD3 e SD4 para serem colocados nestas lacunas indicando que não existe diagnóstico proposto nestes intervalos nas funções de pertinência.

A seguir, abaixo de cada figura, está sua definição em código da ferramenta Xfuzzy. Cada figura é representada por um “tipo(type)”. Neste tipo estão definidas as funções de pertinência, cada qual com seus parâmetros.

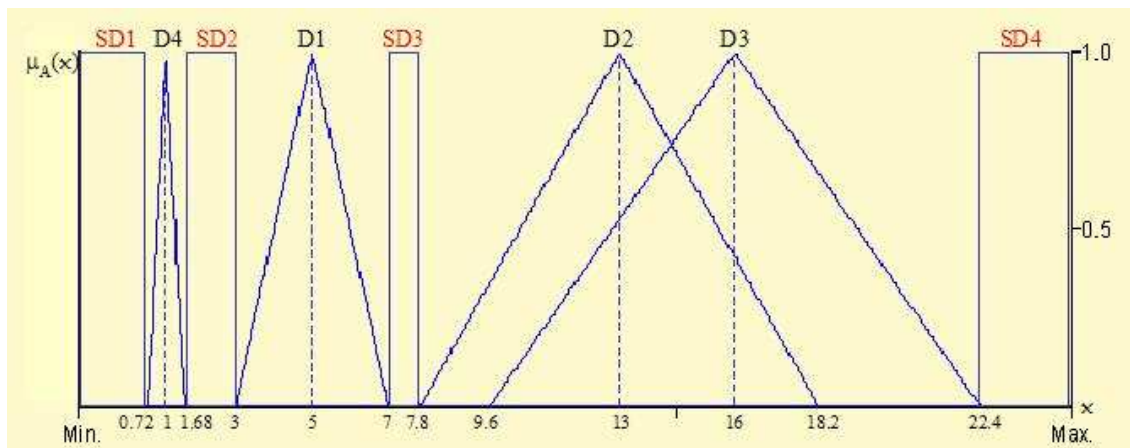


Figura 34. Funções de pertinência do gás metano - CH₄

```

type TCH4 [-1.0,30.0;256] {
    D2 xfl.triangle(7.8,13.0,18.2);
    D4 xfl.triangle(0.72,1.2,1.68);
    D1 xfl.triangle(3.0,5.0,7.0);
    D3 xfl.triangle(9.6,16.0,22.4);
    D5 xfl.singleton(-1.0);
    SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.71);
    SD2 xfl.rectangle(1.69,2.99);
    SD3 xfl.rectangle(7.1,7.79);
    SD4 xfl.rectangle(22.5,30.0);
}

```

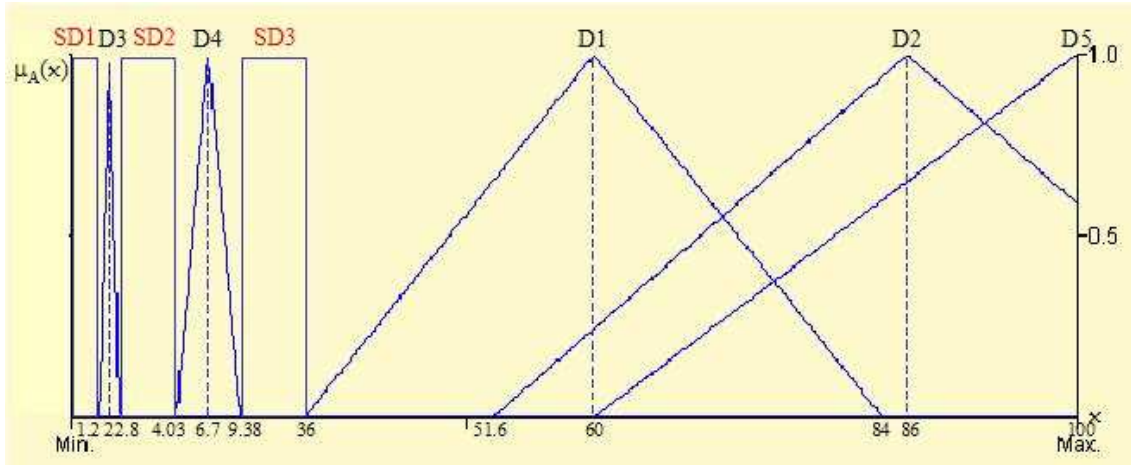


Figura 35. Funções de pertinência do gás hidrogênio – H₂

```

type TH2 [-1.0,100.0;256] {
    D1 xfl.triangle(36.0,60.0,84.0);
    D2 xfl.triangle(51.6,86.0,120.4);
    D3 xfl.triangle(1.2,2.0,2.8);
    D4 xfl.triangle(4.03,6.7,9.38);
    D5 xfl.triangle(59.94,99.9,139.86);
    SD1 xfl.rectangle(-1.0,1.19);
    SD2 xfl.rectangle(2.9,4.02);
    SD3 xfl.rectangle(9.39,35.9);
    SD4 xfl.singleton(-1.0);
}

```

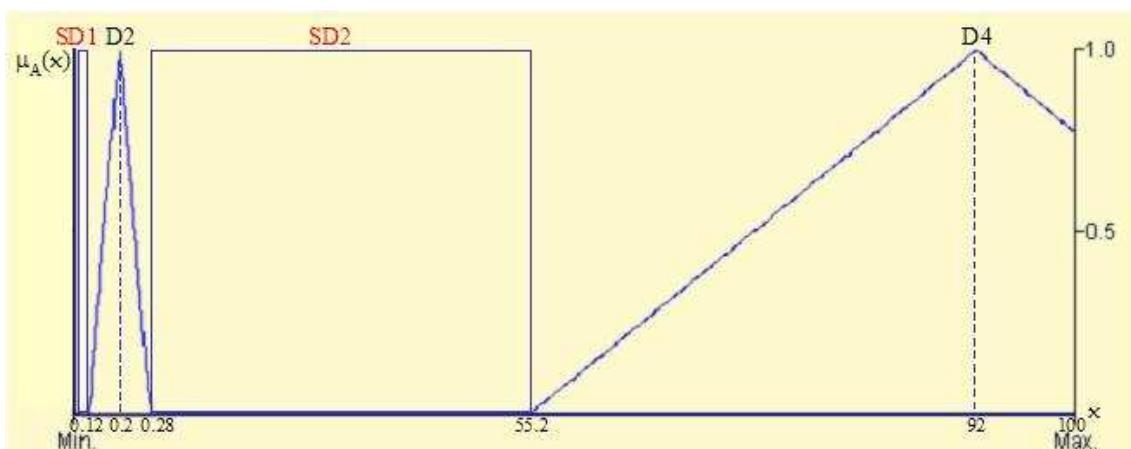


Figura 36. Funções de pertinência do gás monóxido de carbono – CO

```

type TCO [-1.0,100.0;500] {
  D4 xfl.triangle(55.2,92.0,128.0);
  D2 xfl.triangle(0.12,0.2,0.28);
  D1 xfl.singleton(-1.0);
  D3 xfl.singleton(-1.0);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.11);
  SD2 xfl.rectangle(0.29,55.19);
  SD3 xfl.singleton(-1.0);
  SD4 xfl.singleton(-1.0);
}

```

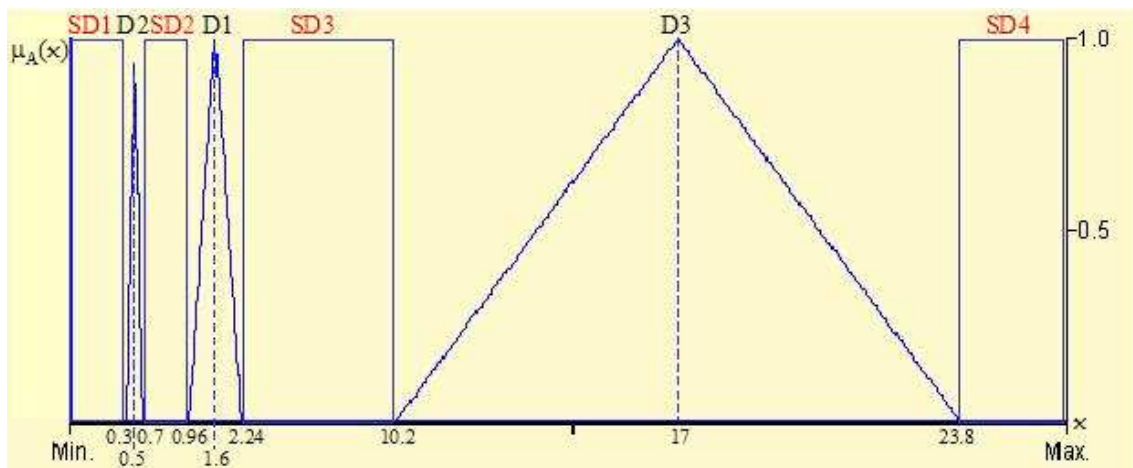


Figura 37. Funções de pertinência do gás etano – C_2H_6

```

type TC2H6 [-1.0,30.0;256] {
  D1 xfl.triangle(0.96,1.6,2.24);
  D2 xfl.triangle(0.3,0.5,0.7);
  D3 xfl.triangle(10.2,17.0,23.8);
  D4 xfl.singleton(-1.0);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.29);
  SD2 xfl.rectangle(0.71,0.95);
  SD3 xfl.rectangle(2.25,10.1);
  SD4 xfl.rectangle(23.9,30.0);
}

```

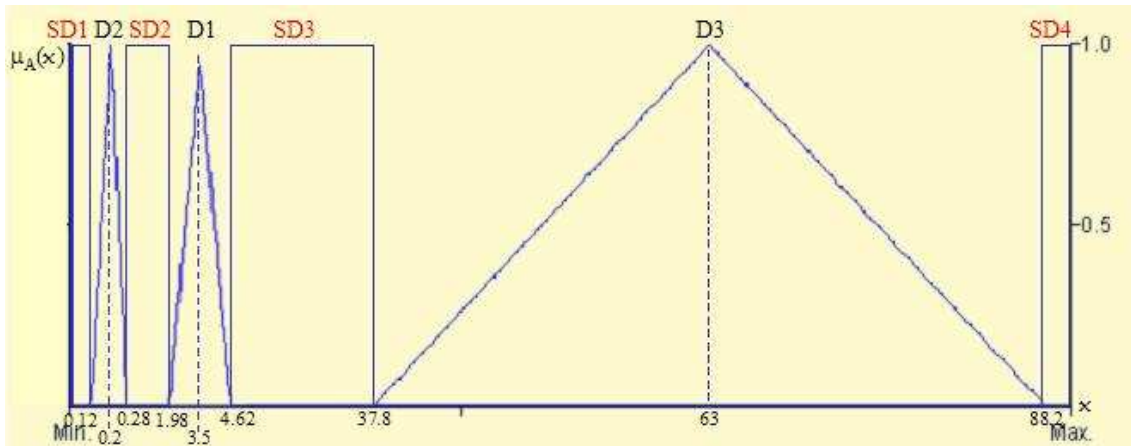


Figura 38. Funções de pertinência do gás etileno - C_2H_4

```

type TC2H4 [-1.0,90.0;256] {
    D1 xfl.triangle(1.98,3.5,4.62);
    D2 xfl.triangle(0.12,0.2,0.28);
    D3 xfl.triangle(37.8,63.0,88.2);
    D4 xfl.singleton(-1.0);
    D5 xfl.singleton(-1.0);
    SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.11);
    SD2 xfl.rectangle(0.29,1.97);
    SD3 xfl.rectangle(4.63,37.79);
    SD4 xfl.rectangle(88.21,90.0);
}

```

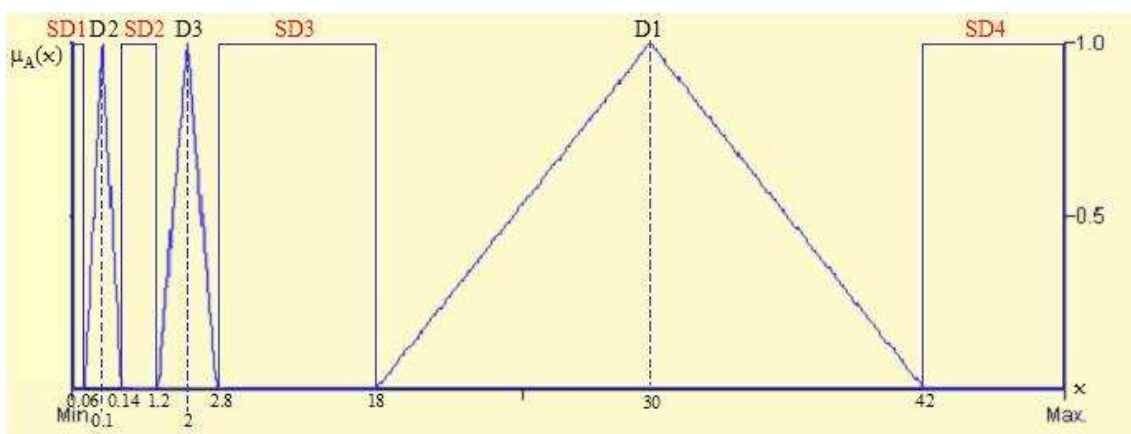


Figura 39. Funções de pertinência do gás acetileno – C_2H_2

```

type TC2H2 [-1.0,50.0;256] {
    D1 xfl.triangle(18.0,30.0,42.0);
    D2 xfl.triangle(0.06,0.1,0.14);
    D3 xfl.triangle(1.2,2.0,2.8);
    D4 xfl.singleton(-1.0);
    D5 xfl.singleton(-1.0);
    SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.05);
    SD2 xfl.rectangle(0.15,1.19);
    SD3 xfl.rectangle(2.81,17.99);
    SD4 xfl.rectangle(42.1,50.0);
}

```

5.6.4 “Defuzzyficação”

Neste instante os resultados da inferência são valores Fuzzy. Assim, é de responsabilidade deste processo transformar estes valores Fuzzy que ele recebe, em valores determinísticos (“*crisp*”).

Após a realização dos processos anteriores, tem-se o valor de pertinência de cada termo em cada variável, no caso os valores D1, D2, D3 e D4 nos seis gases.

O processo de “Defuzzyficação” deve somar o valor de pertinência dos termos de cada gás determinando o maior valor e então, a partir do conjunto de regras descrito a seguir, definir o diagnóstico.

Operador utilizado pela regra:

```

operatorset opGasChave {
    or xfl.sum();
    defuz xfl.MaxLabel();
}

```

Definição dos valores de saída:

```

type TDiagGC [0.0,6.0;2] {
    Arco_Oleo xfl.singleton(1.0);
    Descargas_Parciais xfl.singleton(2.0);
    Oleo_Superaquecido xfl.singleton(3.0);
}

```



```

Celulose_Superaquecida xfl.singleton(4.0);
Eletrolise xfl.singleton(5.0);
}

```

Conjunto de regras que definem a saída

```

rulebase rGasChave (TCH4 CH4, TH2 H2, TCO CO, TC2H6 C2H6,
TC2H4 C2H4, TC2H2 C2H2 : TDiagGC DiagGasChave) using
opGasChave {

if(CH4 == D1 | H2 == D1 | CO == D1 | C2H6 == D1 | C2H4 == D1 |
C2H2 == D1) -> DiagGasChave = Arco_Oleo;

if(CH4 == D2 | H2 == D2 | CO == D2 | C2H6 == D2 | C2H4 == D2 |
C2H2 == D2) -> DiagGasChave = Descargas_Parciais;

if(CH4 == D3 | H2 == D3 | CO == D3 | C2H6 == D3 | C2H4 == D3 |
C2H2 == D3) -> DiagGasChave = Oleo_Superaquecido;

if(CH4 == D4 | H2 == D4 | CO == D4 | C2H6 == D4 | C2H4 == D4 |
C2H2 == D4) -> DiagGasChave = Celulose_Superaquecida;

if(CH4 == D5 | H2 == D5 | CO == D5 | C2H6 == D5 | C2H4 == D5 |
C2H2 == D5) -> DiagGasChave = Eletrolise;

if((CH4 == SD1 | CH4 == SD2 | CH4 == SD3 | CH4 == SD4) &
(H2 == SD1 | H2 == SD2 | H2 == SD3 | H2 == SD4) &
(CO == SD1 | CO == SD2 | CO == SD3 | CO == SD4) &
(C2H6 == SD1 | C2H6 == SD2 | C2H6 == SD3 | C2H6 == SD4) &
(C2H4 == SD1 | C2H4 == SD2 | C2H4 == SD3 | C2H4 == SD4) &
(C2H2 == SD1 | C2H2 == SD2 | C2H2 == SD3 | C2H2 == SD4))
-> DiagGasChave = Sem_Diagnostico_GC;

}

```

A última regra do conjunto de regras define a condição onde não é possível determinar um dos cinco diagnósticos.

O resultado final deste módulo será a determinação de um dos diagnósticos propostos pelo critério Gás-Chave.

Este diagnóstico, juntamente com os diagnósticos conflitantes gerados pelo Módulo Rogers, servirá como dado de entrada para o módulo seguinte.

5.7 Sistema: Módulo Gás-Chave Rogers

O último módulo do sistema contém as regras que, a partir dos diagnósticos gerados pelos módulos anteriores, definem qual, entre as duas ou três saídas geradas pelo Rogers, deve ser o diagnóstico final.

Assim como o Gás-Chave, este módulo somente é invocado quando o módulo Rogers gera mais de um diagnóstico para a mesma entrada.

A Figura 40 ilustra as entradas, saídas e o motor de inferência deste módulo:

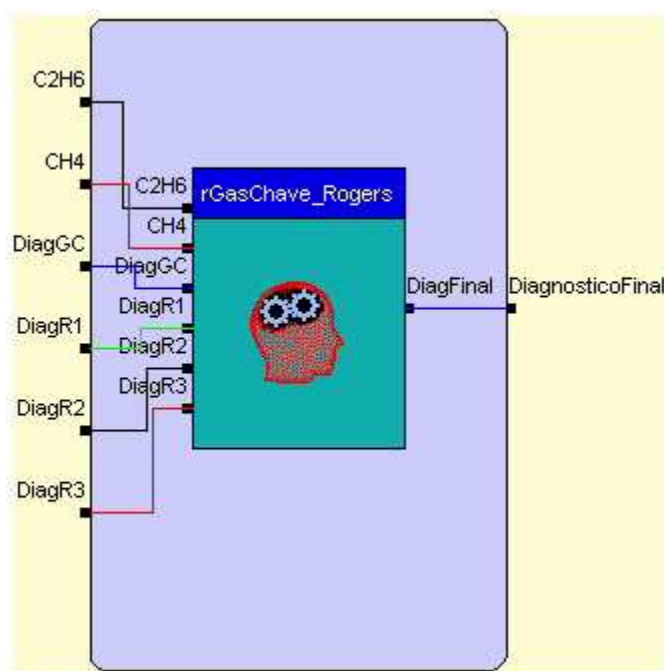


Figura 40. Representação do módulo Gás-Chave Rogers no Xfuzzy

5.7.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada deste módulo correspondem às saídas geradas pelos diagnósticos anteriores. Acrescenta-se ainda o valor dos gases C_2H_6 e CH_4 , conforme listado a seguir:

- C₂H₆ – valor do gás Etano obtido no ensaio de cromatografia;
- CH₄ – valor do gás Metano obtido no ensaio de cromatografia;
- DiagGC – Diagnóstico gerado pelo módulo Gás-Chave;
- DiagR1 – Diagnóstico gerado pelo módulo Rogers;
- DiagR2 – Diagnóstico gerado pelo módulo Rogers;
- DiagR3 – Diagnóstico gerado pelo módulo Rogers;

5.7.2 Base de Conhecimento

A base de conhecimento corresponde às regras definidas pelo especialista (SUÑE, 2001) para mapear diagnósticos do critério Rogers a partir de diagnósticos do critério Gás-Chave.

Abaixo estão as regras definidas para a aplicação através da ferramenta XFuzzy.

```
rulebase rGasChave_Rogers (TValGas C2H6, TValGas CH4, TDiagGC
DiagGC, TDiagRogers DiagR1, TDiagRogers DiagR2, TDiagRogers DiagR3 :
TDiagRogers DiagFinal) using opGC_Rogers {
  if(DiagR1 == Descargas_Alta_Energia & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;

  if(DiagR1 == Descargas_Alta_Energia & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & (DiagGC == Descargas_Parciais |
DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;

  if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia & (DiagGC == Arco_Oleo |
DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) ->
DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia;

  if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia & (DiagGC ==
```

Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Sobreaquecimento_Condutor_Isolado & DiagGC ==
Celulose_Superaquecida) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Sobreaquecimento_Condutor_Isolado & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Oleo_Superaquecido | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Sobreaquecimento_Condutor_Isolado;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC ==
Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal =
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Arco_Oleo |
DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Alta_Energia & (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Alta_Energia & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC ==

Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal =
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Arco_Oleo |
DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Alta_150_300C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR2 ==
Descargas_Alta_Energia & (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR2 ==
Descargas_Alta_Energia & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR3 !=
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC == Arco_Oleo) ->
DiagFinal = Falha_Termica_Alta_150_300C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR3 !=
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC ==
Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida | DiagGC ==
Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 != Descargas_Alta_Energia

```
& DiagGC == Arco_Oleo) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 != Descargas_Alta_Energia
& (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida |
DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR3 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC == Arco_Oleo) ->
DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR3 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC != Arco_Oleo &
C2H6 == Total & CH4 <= Total) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Alta_150_300C;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR3 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC != Arco_Oleo &
CH4 == Total & C2H6 <= Total) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 == Descargas_Alta_Energia
& DiagGC == Arco_Oleo) -> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 == Descargas_Alta_Energia
```

```
& DiagGC != Arco_Oleo & C2H6 == Total & CH4 <= Total) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
```

```
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 == Descargas_Alta_Energia
& DiagGC != Arco_Oleo & CH4 == Total & C2H6 <= Total) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

```
if(DiagR1 == Descargas_Parciais_Baixa_Energia | DiagR1 ==
Descargas_Parciais_Alta_Energia | DiagR2 ==
Descargas_Parciais_Baixa_Energia | DiagR2 ==
Descargas_Parciais_Alta_Energia) -> DiagFinal = Sem_Diagnostico;
}
```

A última regra quer dizer que, se um dos diagnósticos de Rogers se apresentar como “Descargas_Parciais_Baixa_Energia” ou “Descargas_Parciais_Alta_Energia”, o módulo Gás-Chave Rogers não possui diagnóstico proposto. A regra que trata destes dois diagnósticos ainda está em estudo pelos especialistas responsáveis.

5.8 Verificação e Exemplo de Aplicação

Esta seção demonstra o uso do sistema sugerido através de um exemplo. Inicia desde o momento de entrada dos valores dos gases, passando cada passo e apresentando o resultado final. Para ilustrar melhor, serão utilizadas figuras, com os gráficos gerados pelo simulador da ferramenta Xfuzzy.

Gases		Qtde. Medida em ppm
CO	Monóxido de Carbono	55
H ₂	Hidrogênio	35
CH ₄	Metano	65
C ₂ H ₄	Etileno	110
C ₂ H ₆	Etano	140
C ₂ H ₂	Acetileno	95
Total de Gases Combustíveis		500
CO ₂	Dióxido de Carbono	1031
N ₂	Nitrogênio	26132
O ₂	Oxigênio	5613
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre	0
Total de Gases		33276

Tabela 13. Valor dos gases obtidos no ensaio

Os valores dos gases da Tabela 13 são passados ao sistema no momento de instanciação da classe principal:

```
DGA dga = new DGA(55,35,65,110,140,95);
```

A seguir, devem ser invocados os métodos que calculam a relação entre os gases, segundo o critério Rogers e o que calcula o percentual de cada gás:

```
dga.calculaPercentualGases();
dga.calculaRelacoes();
```

Executados os métodos, o valor das relações entre gases e o valor do percentual dos gases serão indicados nas Tabelas 14 e 15:

Relações	
R1	1.57
R2	2
R3	1.27
R4	0.68

Tabela 14. Valor da relação entre os gases

Gás	%
CH ₄	11
H ₂	7
CO	13
C ₂ H ₆	22
C ₂ H ₄	28
C ₂ H ₂	19

Tabela 15. Percentual dos gases

Com todos parâmetros inicializados, basta agora invocar os métodos que geram o diagnóstico de cada módulo. Cada método retorna um vetor do tipo Double, com os valores dos diagnósticos gerados.

```
resRogers = dga.diagRogers();
if (resRogers[0] > 0 && resRogers[1] > 0) {
    resGC = dga.diagGasChave();
    res = dga.diagGasChaveRogers();
}
```

O primeiro a ser requisitado é o módulo Rogers. Os outros dois métodos somente serão requisitados se o módulo Rogers gerar um, dois ou três diagnósticos, conforme Tabela 8. De acordo com os valores obtidos das relações, é acionada a regra abaixo, resultando nos três diagnósticos possíveis.

```
if (R1 == um & R2 == um & R3 == um & R4 == um) ->
    Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
    Diag2 = Falha_Termica_Alta_150_300C,
    Diag3 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
```



Figura 41. Resultado do diagnóstico do Módulo Rogers.

Como foi gerado mais de um diagnóstico, conforme ilustrado na Figura 41, o sistema deve requisitar os outros dois módulos para decidir qual deve ser o diagnóstico final.

De acordo com o percentual de gases passado ao módulo Gás-Chave, foram obtidas as seguintes pertinências em cada gás, indicadas na Figura 42.

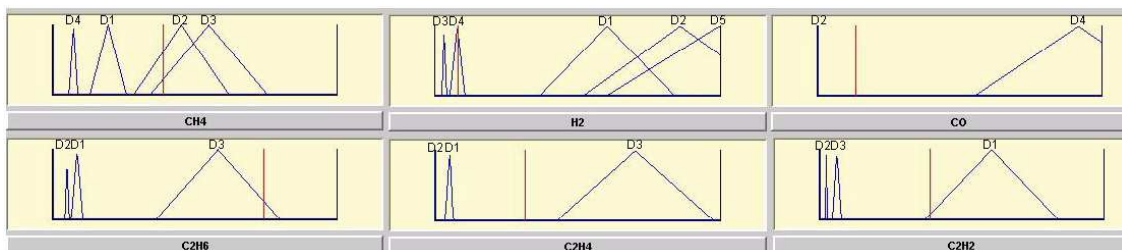


Figura 42. Pertinência de cada gás do Módulo Gás-Chave

A pertinência de cada regra é mostrada na Figura 43, onde verifica-se que a regra de maior pertinência é a regra 3, que equivale à regra 4 do critério Gás-Chave.

```
If (CH4==D4 | H2==D4 | CO==D4 | C2H6==D4 | C2H4==D4 | C2H2==D4) ->
  DiagGasChave = Celulose_Superaquecida;
```

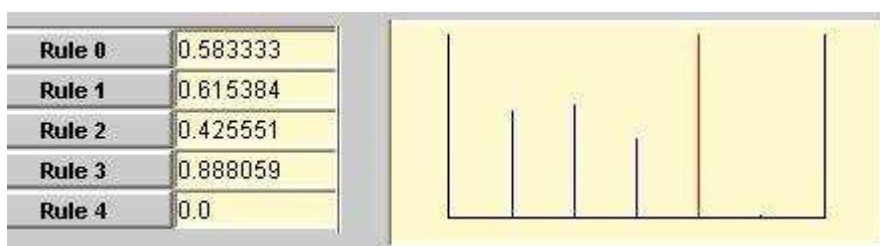


Figura 43. Pertinência das regras do Módulo Gás-Chave

Os diagnósticos obtidos nos módulos anteriores são passados como dados de entrada para módulo Gás-Chave Rogers, juntamente com o valor dos gases C_2H_6 e CH_4 .

De acordo com estes dados, a regra 19 apresenta maior pertinência (ver base de conhecimento do Módulo Gás-Chave Rogers, seção 3.7.2), com isso, determinando qual o diagnóstico final.

```

if ( DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
      DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
      DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
      DiagGC != Arco_Oleo & C2H6 == Total & CH4 <= Total) ->
      DiagFinal = Falha_Termica_Alta_150_300C;

```

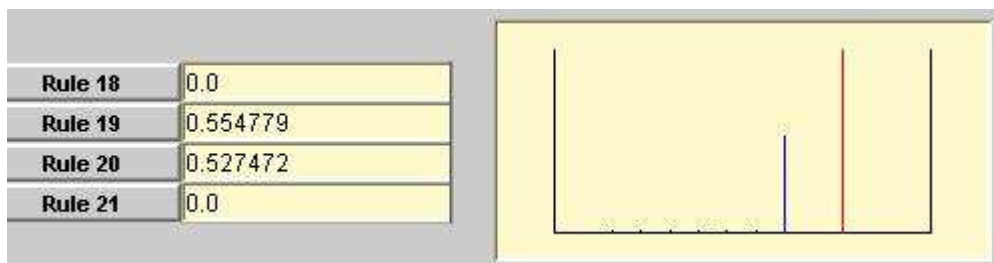


Figura 44. Pertinência das regras do Módulo Gás-Chave Rogers

Por fim, o sistema gera a saída apresentando os diagnósticos obtidos em cada módulo:

```

-----
Diagnostico Roger: 8.0 - Falha Térmica Media (100-200C)
Diagnostico Roger: 10.0 - Falha Térmica Alta (150-300C)
Diagnostico Roger: 5.0 - Descargas Baixa Energia Potencial Flutuação
Diagnostico Gás-Chave: 4.0 - Celulose Superaquecida
Diagnostico Final: 10.0 - Falha Térmica Alta (150-300C)
-----

```

A interface do aplicativo está ilustrada no Anexo G, com os valores de entrada do teste e suas respectivas saídas.

5.9 Testes do Sistema

Nesta seção são mostrados os testes realizados sobre a aplicação bem como seus resultados obtidos.

Os testes objetivam verificar se a aplicação se comporta conforme o esperado, ou seja, segundo os valores definidos nas normas e nos ajustes elaborados por Suñe (2001).

Foram realizados testes unitários e teste de integração. Nos testes unitários, cada módulo foi submetido ao teste separadamente. Desta forma, foi possível verificar se as saídas correspondiam ao conjunto de entradas de dados.

Já nos testes de integração, a ferramenta foi testada como um todo, agregando todos os módulos. Para este teste, o objetivo é assegurar que cada resultado com mais de um diagnóstico de Rogers gere o diagnóstico final correto, considerando as variações de entrada.

Assim sendo, os testes focaram as condições de entrada que gerem mais de um diagnóstico no Critério de Rogers, conforme demonstra a planilha representada pela Tabela 16:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	No.	R1	R2	R3	R4	CH4	H2	CO	C2H6	C2H4	C2H2	ValC2H6	ValCH4	DiagR	DiagGC	DiagFinal
2	1	0.7	0.7	3	0.05	2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			7	1	6
3						12.8	40.5	37	1.7	8.3	0			6	2	7
4	2	0.7	2	0.7	2	2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			8	1	2
5						12.8	40.5	37	1.7	8.3	0			2	2	8
6	3	0.7	2	2	0.05	1.1	45	21.9	23.7	8.3	0			8	4	8
7						2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			4	1	4
8	4	0.7	2	2	2	7.8	45	21.7	17.2	8.3	0			8	3	5
9						2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			5	1	8
10	5	0.7	2	4	0.05	7.8	45	21.7	17.2	8.3	0			8	3	6
11						2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			6	1	8
12	6	2	0.7	2	2	7.8	45	21.7	17.2	8.3	0			10	3	5
13						2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			5	1	10
14	7	2	0.7	3	2	7.8	45	21.7	17.2	8.3	0			7	3	6
15						2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			6	1	7
16	8	2	2	2	0.05	2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			8	1	10
17						1.1	45	21.9	23.7	8.3	0			10	4	8
18	9	2	2	3	0.05	2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			8	1	7
19						1.1	45	21.9	23.7	8.3	0			7	4	8
20	10	2	2	2	2	2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			8	1	5
21						1.1	45	21.9	23.7	8.3	0	25	10	10	4	10
22						1.1	45	21.9	23.7	8.3	0	10	25	5	4	8
23	11	2	2	4	2	2.7	58.5	22.2	1.5	8.3	0.8			8	1	6
24						1.1	45	21.9	23.7	8.3	0	75	50	7	4	7
25						1.1	45	21.9	23.7	8.3	0	50	75	6	4	8

Tabela 16. Casos de teste do sistema

As quatro primeiras colunas correspondem aos valores resultantes das relações entre os gases, identificadas pelas letras R1, R2, R3 e R4. Os percentuais dos gases são identificados pelas siglas dos mesmos e iniciam na coluna 6 até a coluna 11. As colunas 12 e 13 correspondem aos valores dos gases C_2H_6 e CH_4 , respectivamente, obtidos no ensaio de cromatografia. Note-se que estes são os valores dos gases medidos em ppm e não o percentual relativo ao total de gases da amostra. Nas últimas três colunas estão os diagnósticos esperados de cada módulo.

Os valores de saída (*DiagR*, *DiagGC* e *DiagFinal*) estão expressos em números. Para verificar sua descrição, deve-se consultar a base de conhecimento do módulo que gerou o diagnóstico, presentes nas seções 3.5.2 e 3.6.2.

Além dos testes realizados sobre o sistema depois de gerado o código JAVA, também foi feito teste diretamente no aplicativo XFuzzy. Este aplicativo possui uma ferramenta de simulação, permitindo acompanhar o comportamento do sistema e verificar todas as saídas e regras consideradas, conforme são alterados os valores de entrada.

As figuras 42, 43, 44, 45, 46 e 47 mostram, de forma gráfica, os valores resultantes do sistema para cada caso de teste definido na Tabela 16. Os valores das variáveis DiagR1, DiagR2 e DiagR3 equivalem aos diagnósticos gerados pelo módulo *Rogers*. O valor da variável DiagGC corresponde ao diagnóstico gerado pelo módulo *Gás-Chave*.

A Figura 45 apresenta os seguintes valores de entrada para realizar o caso de Teste 1:

- *DiagR1 = Descargas_Alta_Energia(6)*
- *DiagR2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C (7)*
- *DiagGC = Arco_ Óleo(1).*

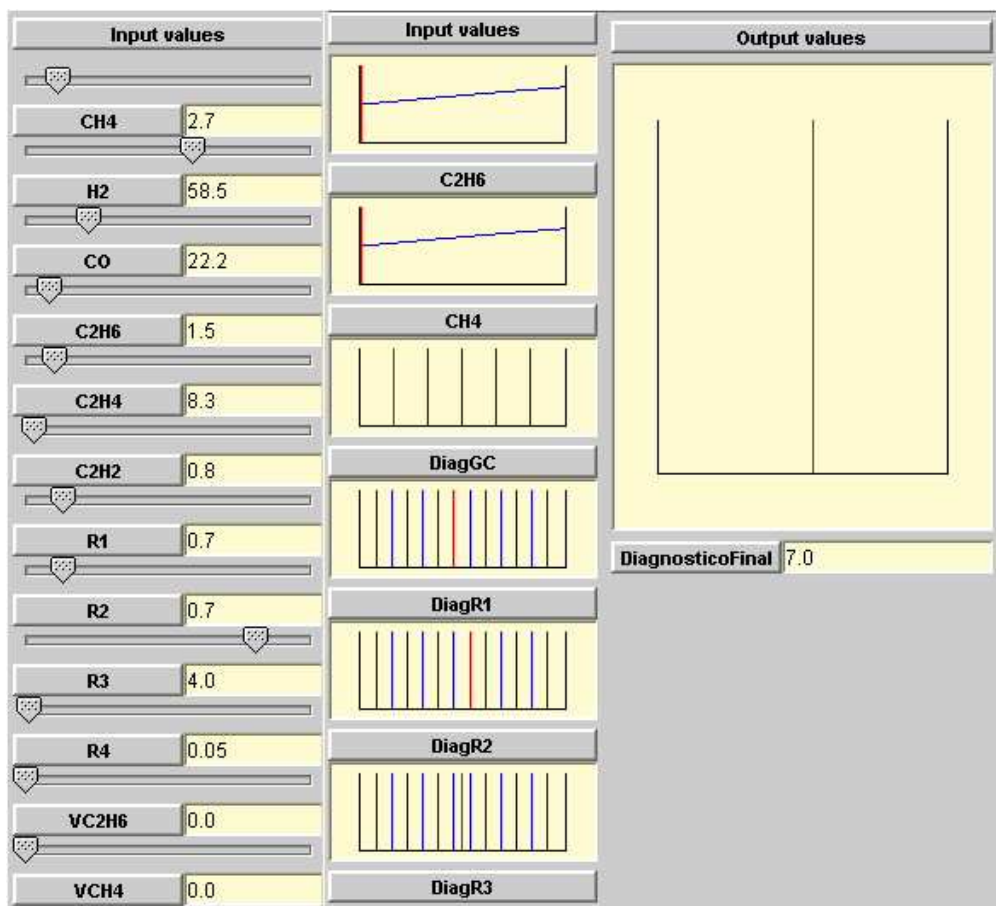


Figura 45. Resultado: Caso de teste 1

A regra do módulo Gás-Chave Rogers, correspondente aos valores de entrada, está apresentada a seguir, determinando o diagnóstico como *Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C*.

```
if (DiagR1 == Descargas_Alta_Energia &
    DiagR2 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C &
    (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
    Celulose_Superaquecida))
-> DiagFinal = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
```

Ao alterar o valor do percentual dos gases de forma que a variável DiagGC seja *Descargas_Parciais* ou *Eletrolise*, a regra mudará, definindo o diagnóstico como *Descargas_Alta_Energia*, conforme apresentado a seguir.

```
if (DiagR1 == Descargas_Alta_Energia &
    DiagR2 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C &
```

```
(DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise))
-> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;
```

A Figura 46 apresenta os seguintes valores de entrada para realizar o caso de Teste 2:

- *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C(8)*
- *DiagR2 = Descarga_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia(2)*
- *DiagGC = Arco_Oleo(1).*

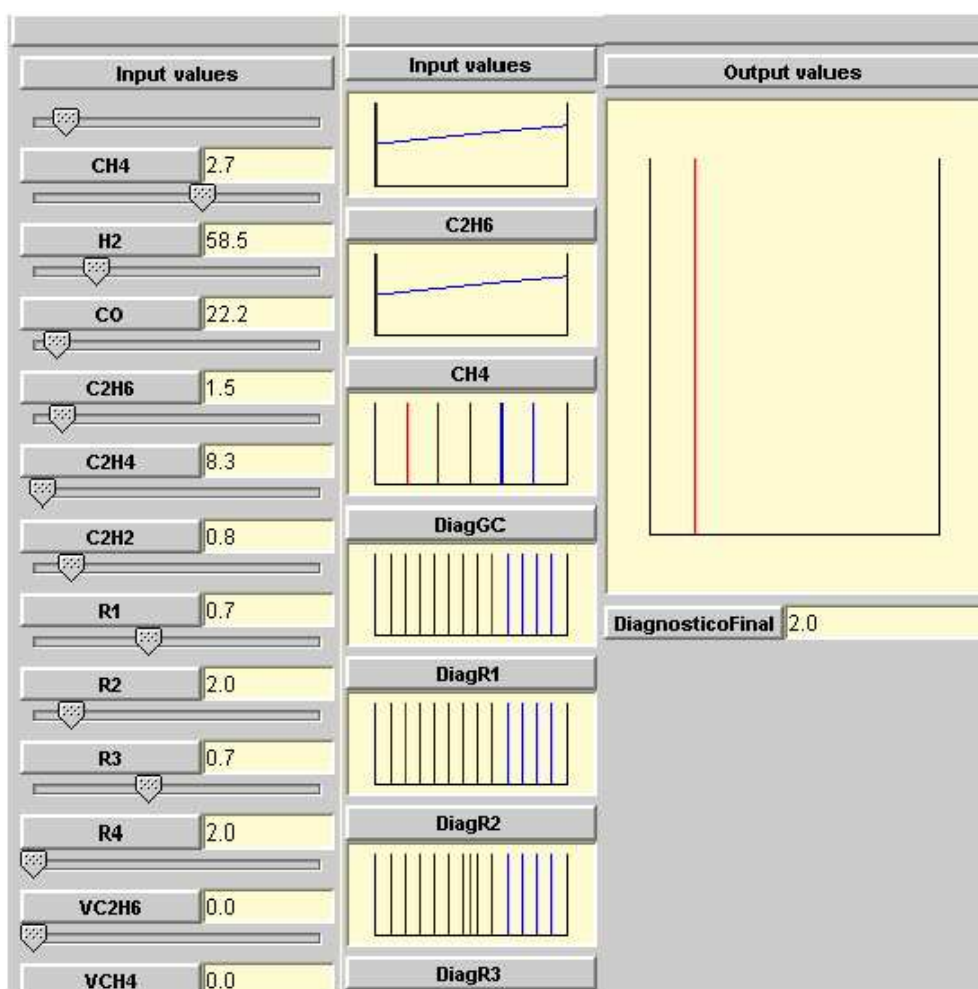


Figura 46. Resultado: Caso de teste 2

A regra do módulo Gás-Chave Rogers, correspondente aos valores de entrada, está apresentada a seguir, determinando o diagnóstico como *Descarga_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia*.

```

If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia &
    (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
        Celulose_Superaquecida))
-> DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia;

```

Ao alterar o valor do percentual dos gases de forma que a variável DiagGC seja *Descargas_Parciais* ou *Eletrolise*, a regra mudará definindo o diagnóstico como *Falha_Termica_Media_100_200C*, conforme apresentado a seguir.

```

If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia &
    (DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise))
-> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;

```

A Figura 47 apresenta os seguintes valores de entrada para realizar o caso de Teste 2:

- *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C(8)*
- *DiagR2 = Sobreaquecimento_Condutor_Isolado(4)*
- *DiagGC = Celulose_Superaquecida(4).*

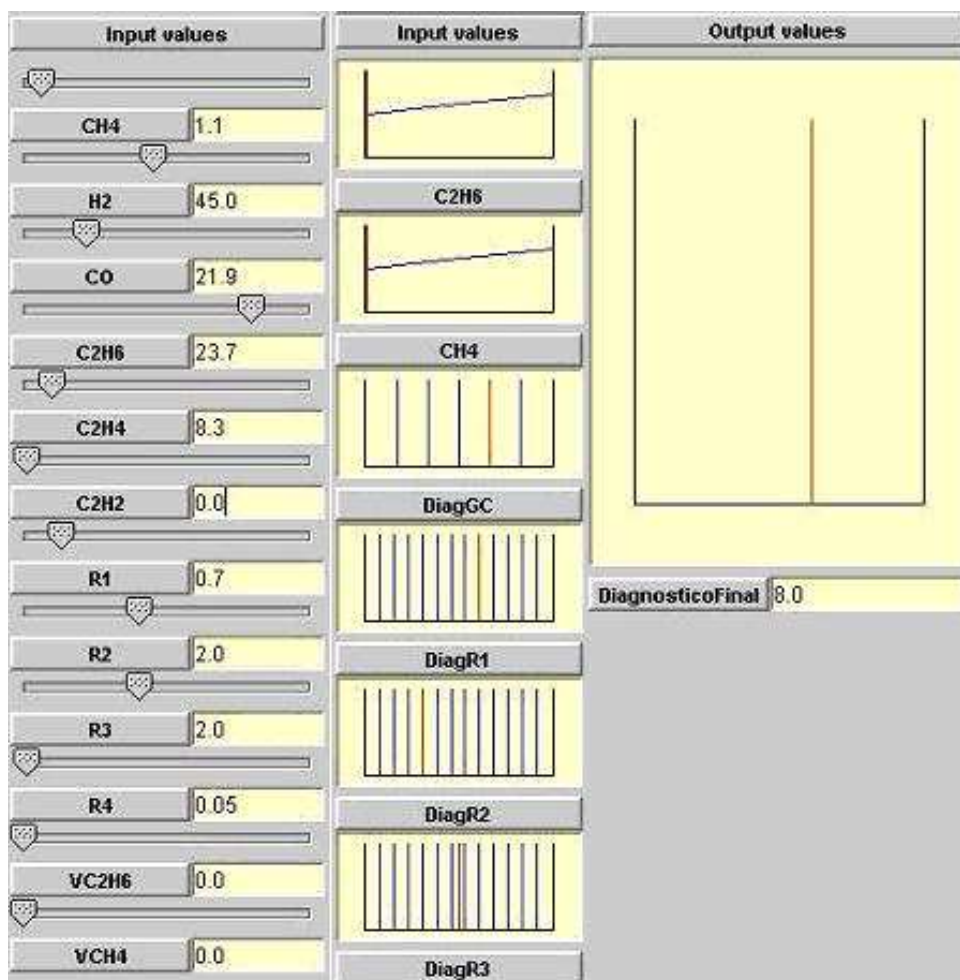


Figura 47. Resultado: Caso de teste 3

A regra do módulo Gás-Chave Rogers, correspondente aos valores de entrada, está apresentada a seguir, determinando o diagnóstico como *Falha_Termica_Media_100_200C*.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Sobreaquecimento_Condutor_Isolado &
    DiagGC == Celulose_Superaquecida)
-> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

Ao alterar o valor do percentual dos gases de forma que a variável DiagGC seja *Arco_Oleo*, *Descargas_Parciais*, *Oleo_Superaquecido* ou *Eletrolise*, a regra mudará, definindo o diagnóstico como *Sobreaquecimento_Condutor_Isolado*, conforme apresentado a seguir.

```

If DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
  DiagR2 == Sobreaquecimento_Condutor_Isolado &
  (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
  Eletrolise))
-> DiagFinal = Sobreaquecimento_Condutor_Isolado;

```

A Figura 48 apresenta os seguintes valores de entrada para realizar o caso de teste 4:

- *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C(8)*
- *DiagR2 = Descarga_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao(5)*
- *DiagGC = Oleo_Superaquecido (3).*

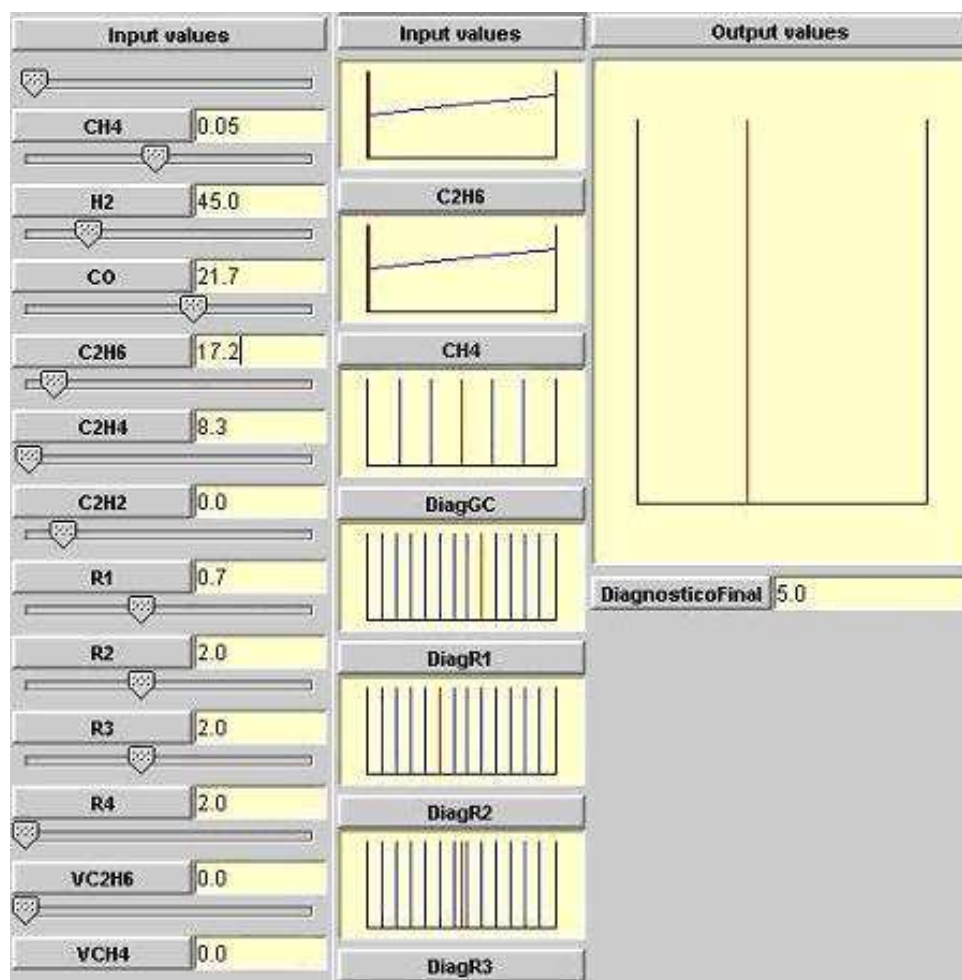


Figura 48. Resultado: Caso de teste 4

A regra do módulo Gás-Chave Rogers, correspondente aos valores de entrada, está apresentada a seguir, determinando o diagnóstico como *Descarga_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao*.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
    (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida))
-> DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
```

Ao alterar o valor do percentual dos gases de forma que a variável DiagGC seja *Arco_Oleo*, *Descargas_Parciais* ou *Eletrolise*, a regra mudará definindo o diagnóstico como *Falha_Termica_Media_100_200C*, conforme apresentado a seguir.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
    (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC ==
    Eletrolise))
-> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

Os casos de teste 5, 6 e 7 utilizam a mesma lógica do caso anterior, mudando apenas os diagnósticos gerados por Rogers. Assim sendo, estes casos de teste não serão demonstrados para evitar textos repetitivos. No entanto, os testes realizados sobre eles geraram resultados satisfatórios, obtendo êxito em todas situações.

A Figura 49 apresenta os seguintes valores de entrada para realizar o caso de teste 8:

- o *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C (8)*
- o *DiagR2 = Falha_Termica_Alta_150_300C (10)*
- o *DiagGC = Arco_Oleo (1).*

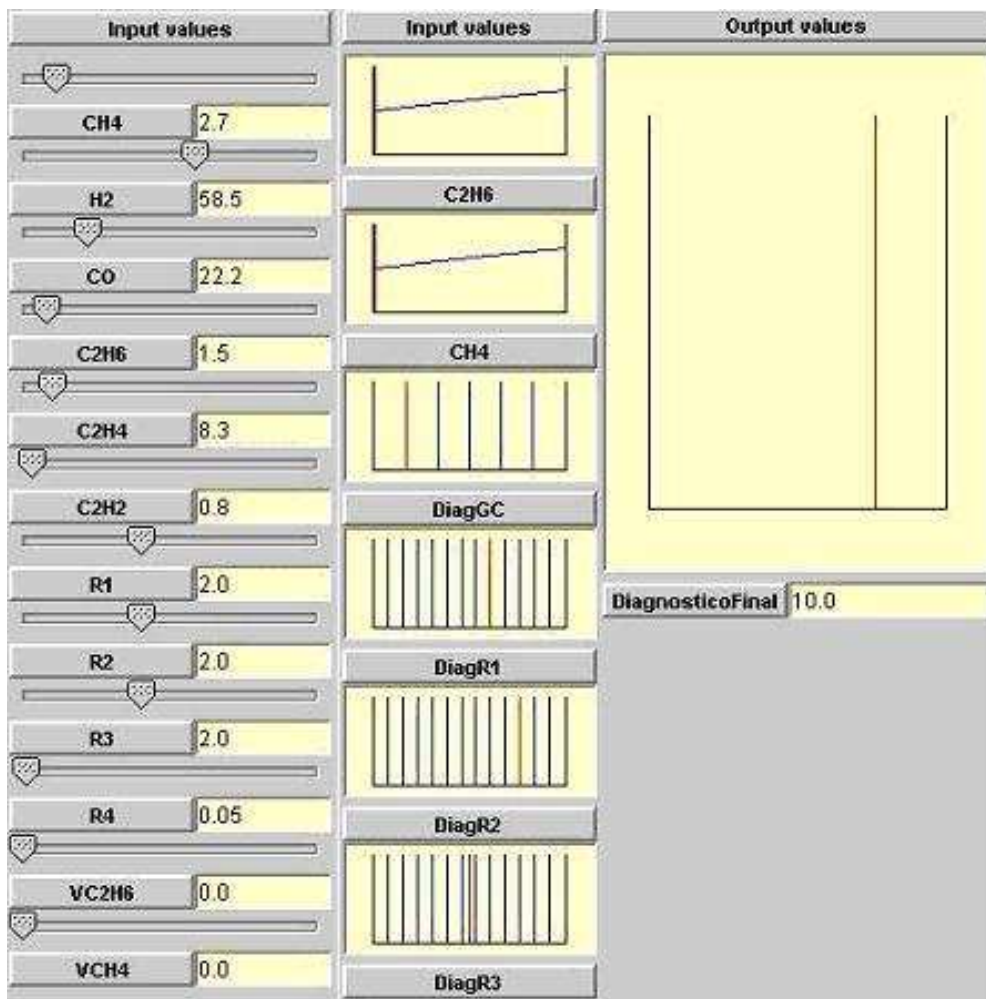


Figura 49. Resultado: Caso de teste 8

A regra do módulo Gás-Chave Rogers, correspondente aos valores de entrada, está apresentada a seguir, determinando o diagnóstico como *Falha_Termica_Alta_150_300C*.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
    DiagR3 != Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
    DiagGC == Arco_Oleo)
-> DiagFinal = Falha_Termica_Alta_150_300C;
```

Ao alterar o valor do percentual dos gases de forma que DiagGC seja *Descargas_Parciais*, *Oleo_Superaquecido*, *Celulose_Superaquecida* ou

Eletrólise, a regra mudará definindo o diagnóstico como *Falha_Termica_Media_100_200C*, conforme apresentado a seguir.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
    DiagR3 != Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
    (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida |
    DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise))
-> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

A mesma lógica se aplica ao caso de teste 9, onde os diagnósticos gerados são *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C(8)* e *DiagR2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C(7)*.

A Figura 50 apresenta os seguintes valores de entrada para realizar o caso de teste 10:

- *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C (8)*
- *DiagR2 = Falha_Termica_Alta_150_300C (10)*
- *DiagR3 = Descarga_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao (5)*
- *DiagGC = Arco_Oleo (1).*

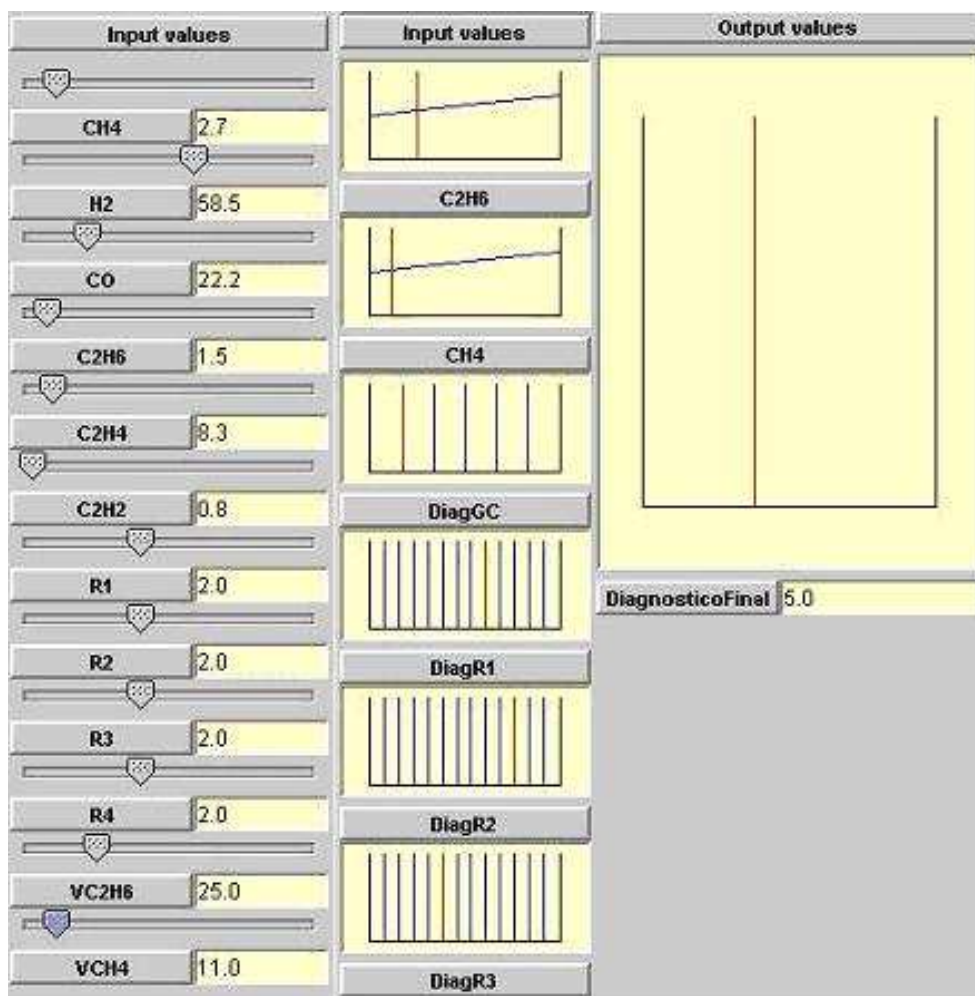


Figura 50. Resultado: Caso de teste 10

A regra do módulo Gás-Chave Rogers, correspondente aos valores de entrada, está apresentada a seguir, determinando o diagnóstico como *Descarga_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao*.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
    DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
    DiagGC == Arco_Oleo)
-> DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
```

Ao alterar o valor do percentual dos gases de forma que DiagGC seja *Descargas_Parciais*, *Oleo_Superaquecido*, *Celulose_Superaquecida* ou

Eletrolise e o valor de VC2H6 \geq VCH4, a regra mudará definindo o diagnóstico como *Falha_Termica_Alta_150_300C*, conforme apresentado a seguir.

```
If (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
    DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao &
    DiagGC != Arco_Oleo & C2H6 == Total & CH4 <= Total)
-> DiagFinal = Falha_Termica_Alta_150_300C;
```

Entretanto, se o valor de VCH4 > VC2H6, a regra mudará definindo o diagnóstico como Falha_Termica_Media_100_200C, conforme apresentado a seguir:

```
if (DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C &
    DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
    DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC !=
    Arco_Oleo & CH4 == Total & C2H6 <= Total)
-> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
```

A mesma lógica se aplica para o caso de teste 11 (Tabela 16), onde os diagnósticos gerados são *DiagR1 = Falha_Termica_Media_100_200C(8)* e *DiagR2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C(7)* e *DiagR3 = Descargas_Alta_Energia(6)*.

Após ajustes no sistema, todos os testes obtiveram sucesso. Onde foi encontrada alguma falha nas regras, esta foi corrigida e testada novamente garantindo o êxito da alteração.

5.9.1 Testes com dados reais

Continuando com a etapa de testes, nesta seção são mostrados os realizados com o Sistema Especialista Fuzzy, sobre dados reais.

Os dados de testes foram obtidos a partir de casos verídicos, sobre amostras de óleo dos equipamentos de Itaipu, realizados pelo laboratório de eletro-eletrônica do Departamento de Engenharia da Manutenção.

Em conjunto com os diagnósticos emitidos pela ferramenta proposta, também são apresentados os resultados gerados pela ferramenta utilizada atualmente, que não contempla os aprimoramentos implementados neste trabalho.

Os casos de testes reais foram realizados sobre o histórico de ensaio de dois equipamentos, cujas características são descritas à seguir:

Equipamento 1:	Transformador monofásico
Ponto Coleta:	Tanque Principal
Num Série:	SP 15104
Fabricante:	ABB
Tensão:	525 kV
Potência:	265 MVA
Frequência:	50 Hz

Equipamento 2:	Bucha H1
Num Série:	8201646M
Fabricante:	Felten & Guilleaume
Tensão:	500 kV

A Tabela 17 apresenta os valores dos gases obtidos a partir do ensaio de cromatografia. Os ensaios de 1 a 5 foram realizados sobre as amostras de óleo retiradas do equipamento 1. Os demais ensaios foram realizados sobre amostras retiradas do equipamento 2.

Ensaio	Gases					
	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
1	142	5	23	2	20	0
2	162	5	23	2	17	0
3	128	2	24	4	31	0
4	179	5	22	2	22	0
5	136	9	24	3	29	0
6	72	135	16	2	2	0
7	89	146	20	2	3	0
8	160	142	11	1	3	0
9	2595	2015	288	129	20	224
10	2867	2254	318	143	22	243

Tabela 17. Valores reais de ensaios de cromatografia

Os dados dos ensaios são submetidos à ferramenta, que gerou as relações de gases segundo definições do critério Rogers (vide Tabela 3). A Tabela 18 mostra as relações geradas em cada ensaio.

Ensaio	Relações			
	R1	R2	R3	R4
1	4.6	0.87	1.5	0
2	4.6	0.74	0.12	0
3	5	1.29	0.13	0
4	4.6	0.96	0.09	0
5	2.67	1.21	0.1	0
6	0.12	0.13	1	0
7	0.14	0.15	0.67	0
8	0.08	0.27	0.33	0
9	0.14	0.07	5	1.74
10	0.14	0.07	5	1.7

Tabela 18. Valor das relações dos dados reais.

Por fim, a Tabela 19 apresenta os diagnósticos gerados pelo sistema atual (segunda coluna) e pela ferramenta proposta (terceira coluna).

Ensaio	Diagnóstico Sistema Atual	Diagnóstico Sistema Fuzzy
1	Falha não caracterizada por este método de análise. Tente outro método	Falha Térmica Muito Alta (300-700C)
2	Falha não caracterizada por este método de análise. Tente outro método	Falha Térmica Alta (150-300C)
3	Falha Térmica Média (100-200C)	Falha Térmica Média (100-200C)
4	Falha não caracterizada por este método de análise. Tente outro método	Falha Térmica Alta (150-300C)
5	Falha Térmica Média (100-200C)	Falha Térmica Média (100-200C)
6	Nenhuma falha; Deterioração Normal,	Sobreaquecimento Condutor Isolado
7	Nenhuma falha; Deterioração Normal,	Deterioração Normal, - Sem Falha
8	Descargas Parciais com Baixa Densidade de Energia	Descargas Parciais Baixa Energia
9	Descargas Alta Energia, Arco com potência	Descargas Alta Energia
10	Descargas Alta Energia, Arco com potência	Descargas Alta Energia

Tabela 19. Resultados dos testes. Sistema proposto X Sistema Atual

A diferença de diagnóstico que mais se destaca está nos ensaios 1, 2 e 4. Na ferramenta atual, estes ensaios são diagnosticados como *Falha não caracterizada por este método de análise*, enquanto que no sistema proposto os diagnósticos são *Falha Térmica Muito Alta (300-700C)*, *Falha Térmica Alta (150-300C)* e *Falha Térmica Alta (150-300C)*, respectivamente.

A deficiência apresentada na ferramenta atual denota que sua base de conhecimento não possui regras para o conjunto de valores de entrada. Isto ocorre porque esta ferramenta implementa somente as regras definidas pelo critério Rogers, sem as melhorias sugeridas por SUÑE (2001) na base de conhecimento deste critério.

Outra diferença que se destaca está no ensaio 6; a ferramenta atual considera que não há falhas, ou que a deterioração ocorre de forma normal (*Nenhuma falha; Deterioração Normal*). Entretanto, o sistema proposto diagnosticou que pode ocorrer um sobreaquecimento do condutor isolado (*Sobreaquecimento Condutor Isolado*).

Com respeito aos demais ensaios, os resultados obtidos pelo sistema proposto foram semelhantes à ferramenta atual, mudando apenas a descrição do diagnóstico.

6 Conclusão

6.1 *Análise do Trabalho Proposto*

O uso da tecnologia de Sistemas Especialistas, juntamente com Conjuntos Fuzzy, mostrou-se apropriada para diagnosticar a condição operativa dos transformadores.

Isto comprova as pesquisas realizadas, que mostram a grande quantidade de sistemas especialistas já implantados ou em fase de definição, nas mais diversas áreas de negócio. Conseqüentemente, há o crescimento de empresas especializadas no desenvolvimento deste tipo de aplicação.

No que diz respeito às etapas de estudo e desenvolvimento do trabalho, como qualquer produto de estudo e pesquisa, foram encontradas diversas dificuldades durante a elaboração do sistema.

As primeiras dificuldades surgiram pela característica do trabalho em tratar da especificidade de um domínio, no caso manutenção de transformadores. Para superar esta dificuldade foi necessário, mesmo que sem muita profundidade, um estudo das técnicas de manutenção, análise e diagnóstico destes equipamentos.

A etapa de extração do conhecimento do especialista foi a mais trabalhosa, sendo necessárias várias reuniões e utilização de técnicas e ferramentas para obtenção do conhecimento. Além do estudo das normas, critérios e procedimentos padrões definidos por entidades normativas.

O plano de desenvolvimento do trabalho e construção do sistema foi bastante satisfatório, facilitando a elaboração do trabalho sem perder o foco. Os primeiros esforços foram concentrados em definir o problema e delimitar seu escopo, para então estudar as técnicas de Inteligência Artificial que poderiam ser aplicadas e sua viabilidade.

O primeiro modelo construído foi um Sistema Especialista que contemplava o conjunto de regras definido pelo critério de Rogers. Entretanto, verificou-se que este modelo não atenderia por completo os requisitos da empresa, pois os resultados demonstraram várias lacunas nas regras de

geração de diagnóstico do critério de Rogers. Estas lacunas nas regras impediam que, para determinados valores de entradas, fosse obtido o diagnóstico do transformador.

Assim sendo, foi necessário estender a pesquisa para encontrar uma forma de suprir estas deficiências.

Conjuntamente com o especialista, decidiu-se empregar as melhorias propostas por Suñe (2001) para diminuir a quantidade de lacunas presentes nas regras do critério de Rogers. Esta decisão exigiu mais um esforço em pesquisar os conceitos e aplicações de Conjuntos Fuzzy, além de exigir o emprego de uma ferramenta específica, que atendesse os requisitos levantados na seção 5.2.

Construído o sistema, foram realizados diversos testes, inclusive com dados reais. Os resultados obtidos pelo sistema foram bastante satisfatórios e atenderam os requisitos da empresa, demonstrando que o objetivo principal da proposta de trabalho foi alcançado.

Os testes com dados reais foram bastante expressivos, demonstrando que a aplicação proposta é capaz de gerar diagnósticos precisos, inclusive em situações que a tabela de regras do Critério de Rogers não atende.

Os modelos de especificação e projeto foram registrados em documentos de caso de uso e em fluxogramas, anexados aos documentos. Além destes recursos, os conhecimentos e regras estão armazenadas em forma de regras de produção, mecanismo de representação do conhecimento utilizado neste trabalho.

6.2 Conclusão e Trabalhos Futuros

A construção do sistema proposto foi resultado da necessidade, por parte da área de engenharia, de uma ferramenta capaz de emitir diagnósticos precisos sobre a situação operativa dos equipamentos.

Este fator é estratégico para empresa, pois o conhecimento deste processo estava restrito a alguns especialistas, dificultando a disseminação deste conhecimento especializado para outros empregados.

A dificuldade em disseminar o conhecimento é natural, devido às tarefas do dia a dia dos empregados. O comprometimento com prazos e a carga de trabalho a que o especialista está sujeito diminui o seu tempo para repassar seu conhecimento.

A falta de ferramenta automatizada agrava mais este problema, pois o processo de diagnóstico é trabalhoso e custoso. Envolve a análise de tabelas e realização de diversos cálculos, além do “feeling” e da experiência dos especialistas.

A construção do sistema supriu estas dificuldades mencionadas, tornando acessível a todos os empregados e aos futuros, o conhecimento e as experiências dos especialistas.

Além da documentação gerada, que contém as especificações e as decisões de projeto, o uso do sistema permite que um não-especialista possa realizar o processo de análise e diagnosticar o estado operativo dos equipamentos.

Este trabalho serviu ainda para consolidar as melhorias, propostas pelo especialista (SUÑE, 2001), nas normas e critérios de diagnóstico do ensaio de gás-cromatografia do óleo isolante.

Prova disto foram os resultados satisfatórios gerados a partir de dados do histórico de ensaios de gás-cromatografia. Ensaio cujo conjunto de valores dos gases não apresentava diagnóstico para o critério de Rogers, com o sistema proposto passaram a apresentar diagnósticos adequados.

Quanto à ferramenta utilizada na implementação, o XFuzzy demonstrou ser uma ótima escolha, pois além de possuir uma interface amigável, o que

torna o tempo de aprendizado para seu uso muito curto, facilitou em muito a estruturação do conhecimento. Outros dois fatores de destaque são a possibilidade de simular o comportamento do sistema e a geração de código para linguagem Java, garantindo a portabilidade da aplicação.

Os benefícios deste trabalho se estenderam até o Departamento de Desenvolvimento de Sistemas de Itaipu. Utilizando a ferramenta Xfuzzy para construção do núcleo do sistema que gera os diagnósticos, ganhou-se em tempo de desenvolvimento. Cálculos breves estimam que houve uma economia de mais de 200 horas em relação ao desenvolvimento em uma linguagem convencional, sem o auxílio de uma ferramenta especializada.

Considera-se para isto que, ao utilizar uma ferramenta especializada no desenvolvimento de sistemas que utilizam técnicas de Conjuntos Fuzzy, não é necessária a codificação de muitas funcionalidades inerentes a estas técnicas, como funções de pertinência.

Enfim, os resultados obtidos pelo sistema foram adequados e atenderam às necessidades da área técnica da empresa, com isto, atingindo os objetivos descritos no início do trabalho.

Como prova de adequação, o sistema desenvolvido neste trabalho será agregado ao Sistema SSD, mencionado na seção 4.6. Para isto, deverá estar em conformidade com os padrões arquiteturais definidos pela empresa, entre eles, a camada de apresentação deve ser construída no padrão Web.

Por se tratar de um Sistema Especialista, o sistema possui limitações no que diz respeito à capacidade de inferir novos conhecimentos e lidar com novas situações. Mas, uma vez que uma boa base de conhecimentos já consolidados tenha sido definida, o sistema pode fornecer constante e consistentemente diagnósticos da condição operativa dos transformadores. Pode ainda diagnosticar situações que não seriam notadas, devido à necessidade de conhecimento altamente especializado e porque acarretaria grande esforço humano e financeiro, o que inviabilizaria a realização de todo este processo manualmente.

Deve-se também completar a base de conhecimento do sistema, pois faltam algumas regras que devem ser definidas para o Módulo Gás-Chave

Rogers quando o resultado da relação $CH_4/H_2 < 0.01$. Este estudo está sendo realizado junto ao especialista e posteriormente será agregado ao sistema.

Sugere-se que outras técnicas sejam estudadas e testadas como ferramentas para solução deste problema, além de Sistemas Especialistas e Conjuntos Fuzzy, aqui adotado.

O uso de redes neurais artificiais é um exemplo que pode ser aplicado. Wang (2000), utilizando as tabelas de conhecimento definidas por padrões IEEE e IEC, em conjunto com os conhecimentos adquiridos de especialistas, construiu uma rede neural artificial combinando técnicas de Sistemas Especialistas para o diagnóstico de falhas em transformadores de potência. Concluiu em seu trabalho que o uso conjunto das duas técnicas gerou melhores resultados que o seu uso separado.

Como trabalho futuro, serão implementados, como módulos do sistema, as regras das outras normas e critérios mencionados na seção 4.5.1, também utilizados para diagnosticar o estado do transformador a partir dos gases dissolvidos no óleo isolante.

Um módulo de estatísticas também pode ser construído, com estudos que permitam verificar a evolução dos gases a partir do histórico de ensaios dos equipamentos, apresentando os resultados em forma de gráficos para melhor visualização.

Com o objetivo de enriquecer mais a ferramenta, uma sugestão de trabalho seria estudar o emprego de alguma técnica de aprendizado, permitindo que o sistema possa aprender a partir de novas situações.

Outra proposta de trabalho é estudar a viabilidade do uso de sensores nos transformadores, a fim de obter os dados dos gases, em tempo real, e passá-los diretamente ao sistema, que definirá a condição operativa do equipamento.

Bibliografia

ABEL, Mara. **Sistemas Especialistas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

ANEEL. **Estabelecimento da Tarifa de Repasse da Potência de ITAIPU, a partir de 1º de janeiro de 2005**. Nota Técnica nº. 312/2004. Agência Nacional de Energia Elétrica. Acessado em 01/05/2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>.

ARBEX, Roberto Taiar. **Controle Fuzzy – Circuito e aplicações**. Revista Inspec. Jun 1994, pp.18-22.

BAPTISTA, Elesandro Antonio. **Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Otimização do Processo de Usinagem**. Dissertação (mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, 2000. Acessado em: 02/10/2003 Disponível em: <http://www.unimep.br/~ncoppini/CopDT.htm>

BARRETO, Jorge Muniz. **Inteligência Artificial no Limiar do Século XXI**. Florianópolis: Editora PPP, 2001, 3º ed.

BARRETO, Jorge Muniz. **Sistemas Especialistas**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Acessado em 03/04/2004. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~barreto/IA/especialista.htm>

BARRELA, Wagner D. **Sistemas Especialistas Modulados e Abrangentes para a Gestão de Operações**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

BERTASI, Débora. **Implementação de um Sistema de Síntese de Alto Nível Baseado em Modelos Java**. Dissertação (mestrado) – Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Fev. 2002.

BITTENCOURT, Guilherme. **Inteligência Artificial – Ferramentas e Teorias**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, 2º ed.

BITTENCOURT, Guilherme. **Inteligência Computacional**. Departamento de Automação de Sistemas – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Out. 2003. Acessado em: 03/04/2004. Disponível em: <http://www.das.ufsc.br/gia/softcomp>

CHORAFAS, D. N. **Sistemas Especialistas – Aplicações Comerciais**. São Paulo: McGraw-Hill. 1988.

CIPCIGAN, L. et al. **Expert system for Voltage Control and Synchronised Switching Command in a 400 kV Power Substation**. IEEE Porto Power Tech Conference. Porto (Portugal), 2001.

COSTA, Alex da et all. **Lógica Fuzzy – Conceitos e Aplicações**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2004. Acessado em: 03/04/2004 Disponível em: <http://www.inf.unisinos.br/~jrbitt/mages/>

CUPINNI, N. L.; BATOCCHIO M.C.A. **Sistema Especialista para Condições de Usinagem**. In: Anais do Encontro Nacional de Usuários de Automação Industrial, 1992, pp. 93-104. São Paulo.

DANAHER, Maurice. **Expert Systems – A Design Application**. School of Computer and Information Science – Edith Cowan University. Perth(Australia), 2000.

DURKIN, John. **Expert Systems – Design and Development**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.

EXTREMADURA. **Máquinas Eléctricas**. Departamento de Eletrónica e Engenharia Electromecânica. Universidade de Extremadura, 2001. Acessado em 01/05/2005. Disponível em http://tauro.unex.es/vaguiti/MAQUINAS_ELECTRICAS/WebMaq/Portada.html

FABRI, José Augusto. **Conjuntos Fuzzy e Lógica Fuzzy**. Universidade Federal de São Carlos, 2001. Acessado em: 17/03/2004. Disponível em: <http://users.femanet.com.br/~fabri/fuzzy.htm>

FALCAO, Djalma M. **Técnicas Inteligentes Aplicadas a Sistemas de Potência - Conjuntos, Lógica e Sistemas Fuzzy**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

FALQUETO, Jovelino. **IAS – Inteligência Artificial Simbólica**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Out. 2003. Acessado em 03/04/2004
Disponível em:
http://www.inf.ufsc.br/~falqueto/aGraduacao/INE5633Sist_Intel/IASimbolica/IAS_Resumo.doc

FALQUETO, Jovelino. **IAE – Inteligência Artificial Evolucionária**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Dez. 2004. Acessado em 03/12/2004 Disponível em:
http://www.inf.ufsc.br/~falqueto/aGraduacao/INE5633Sist_Intel/IAEvolucionaria/Texto_IAE.pdf

FANTINEL, Adriana T. **Sistema Inteligente para o Diagnostico de Transformadores**. Monografia – Centro de Ensino Superior de Foz do Iguaçu, 2004.

FERNANDES, Anita Maria da Rocha. **Inteligência Artificial – Noções Gerais**. Florianópolis: Visual Books, 2003.

FERNANDEZ, Jose Barros et al. **Correlação Entre o Grau de Polimerização do Papel e o Teor de 2-Furfuraldeído Dissolvido no Óleo Isolante de Transformadores**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Nova Iguaçu : 1998.

FREITAS, Jefferson Colares de. **SED – Protótipo de um Ambiente para Construção de Sistemas Especialistas Difusos**. Monografia – Universidade Luterana do Brasil. Gravataí, 2003. Acessado em: 03/04/2004. Disponível em: http://www.ulbra.tche.br/~roland/tcc-gr/monografias/2003-2-tc2-Jefferson_Colares_de_Freitas.pdf

GALLANT, S. **Connectionist Expert Systems**. Communications of the ACM 34, 1991. Vol. 9, pp. 28-38,

GAO, Ning et al. **New Approach on Comprehensive Diagnosis of Insulation Faults in Power Transformer**. Helsinki University of Technology. Helsinki(Finland), 2002.

GRECO, Carlos Eduardo; ABREU, Marco Antonio Gracindo. **Simbolismo X Conexionismo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003. Acessado em: 03/04/2004. Disponível em: www.marcoabreu.eti.br/download/simbolismoconexionismo.pdf

HALL, Lawrence O. **Chaining in Fuzzy Rule-Based Systems**. University of South Florida. Tampa(USA).

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Massachussets: th MIT Press, 1975.

INSFRAN, Alfredo H. F.; SILVA, Alexandre Pinto Alves da; TORRES, Germano Lambert. **Fault Diagnosis using Fuzzy Sets**. In: IV ISAP, 1999, Rio de Janeiro. Fourth International Conference on Intelligent System Application to Power Systems. Brasil, 1999.

ITAIPU. **Tecnologia dos Equipamentos Elétricos**. Itaipu Binacional. Cap. VI, pp. 88–115. Foz do Iguaçu, 2003.

ITAIPU. **Plano Estratégico 2005-2009**. Itaipu Binacional. pp. 3. Foz do Iguaçu, 20/08/2004.

ITAIPU. **Itaipu Binacional**. Foz do Iguaçu. Acessado em 01/05/2005.
Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br>.

KAUFMANN, A. **Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets**. Academic Press, 1975

LEVINE, Robert I.; DRANG, Diane E.; EDELSON, Barry. **Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas – Aplicações e Exemplos Práticos**. McGraw Hill, 1998. Acessado em 20/09/2003 Disponível em:
[www.dct.ufms.br/~mzanusso/Sistemas Especialistas Orientados por Objetos.htm](http://www.dct.ufms.br/~mzanusso/Sistemas_Especialistas_Orientados_por_Objeto.htm)

LIAO, Ruijin et al. **Blackboard Expert System of Multi-Expert Cooperating Diagnosis for Transformers Insulation**. The Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology – Chongqing University. Chongqing(China).

LIEBOWITZ, Jay. **Introduction to Expert Systems**. Santa Cruz, California: Mitchell Publishing Inc., 1988

LINARES, Kathya Silva Collazos. **Sistema Especialistas Nebuloso para Diagnóstico Médico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Fev. 1997. Acessado em: 03/04/2004. Disponível em:
<http://www.inf.ufsc.br/~barreto/teses/dmkathya.pdf>

MAIZUN, Binti Ahmad et al. **Dissolved Gas Analysis Using Expert System**. University Technology MARA. Malaysia(USA).

MATTOS, Nádía de Pádua. **Sistema de Apoio a Decisão para Planejamento em Saúde**. Dissertação (mestrado) – Universidade Católica do Paraná.

Curitiba, 2003. Acessado em: 03/04/2004 Disponível em:

http://www.ppgia.pucpr.br/ensino/defesas/Nadia_Mattos_2002.PDF

MCCULLOCH, W. PITTS, W. **A logical Calculus of Ideas Imminent in Nervous Activity**. Colorado Springs: The Dentan Printing Co, 1943.

MEDEIROS. Maysa Regina. **Uma Metodologia de Desenvolvimento de Programas em Inteligência Artificial – MEDSIA**. Dissertação (Mestrado)

Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Mar. 2004.

MILASCH, Milan. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante**.

São Paulo: Edgar Blücher, 1984.

MINSKY, M. L.; Papert, S.A. **Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry**. Massachussets: The MIT Press, 1969, 3^o ed.

MINSKY, M. L.; PAPERT, S. A. **Perceptrons - An Introduction to Computational Geometry**. Massachussets: The MIT Press, 1969.

NAGANIME, Renato Kazuki. **Lógica Difusa para Controle não Convencional de uma Viga Inteligente**. Dissertação(mestrado) – Universidade de São Paulo.

São Carlos, 2001. Acessado em: 04/09/2003. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-17102001-151634/publico/dissertation.pdf>

NEWELL, A.; SHAW, J. C. **Computers and Thought**, chapter Empirical exploration with the logic theory machine: a case study in heuristics. New York: McGraw-Hill, 1963.

NEWEL, A. SIMON, H. A. **Human problem solving**. NJ: Prentice Hall, 1972.

NBR7274. **Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Dez 1981.

NICOLETTI, Maria do Carmo et al. **Elementos da Teoria dos Conjuntos Aproximados.** Relatório Técnico – Universidade Federal de São Carlos, 1997.

OSTELLINO, Renato. Jose Luiz Elisei. **Sistema Especialista em Orçamento para uma Empresa de Fundição de Aço.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2003. Acessado em: 31/08/2004 Disponível em:
<http://polo03.feg.unesp.br/ceie/CEIE0305.htm>

PASOTO, Daniela et al. **Uso de Sistema Especialista para Decisão do Perfil de um Investidor.** Monografia – Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2003. Acessado em: 10/09/2004. Disponível em:
<http://meusite.mackenzie.com.br/rogerio/tqi/2003Jess.pdf>

PAWLAK, Zdzislaw. **Rough Sets, Theoretical Aspects of Reasoning about Data.** Institute of Computer Science, Warsaw University of Technology Library of Congress Catalog-in-Publication Data. ISBN 0-7923-1472-7. Kluwer Academic Publisher: Netherlands, 1991.

PAWLAK, Zdzislaw. **Rough Sets, Rough Relations and Rough Functions.** Fundamenta Informaticae, vol. 27, pg. 103-108. Computer Science Bibliography Universitat Trier, August 1996.

PEDRYCZ, Witold & Fernando Gomide. **An Introduction to Fuzzy Sets – Analysis and Design.** Massachusetts: The MIT Press, 1998.

PEROTO, Filipo Studzinski. **Modelagem do Conhecimento, Sistema Especialista e o Projeto Seamed.** Dissertação (mestrado) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas e Instituto de Informática – Universidade Federal

do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Acessado em 20/09/2003 Disponível em: www.sdbc.org.br/reic/edicoes/2001e1/cientificos

PIMPA, Chakkrit. et al. **Voltage Control in Power System Using Expert System Based on SCADA System**. IEEE, 2002. pp. 1282-1286,.

RAMOS, Ronaldo Fernandes. **Sistemas Especialistas – Uma Abordagem em Objetos com Prototipagem de um Seleccionador de Processo de Soldagem**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Fev. 2004. Acessado em: 03/04/2004 Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta/ramos/indice/index.htm>

RENAUX, Douglas P. B. et al. **Gestão do Conhecimento de um Laboratório de Pesquisa: uma Abordagem Prática**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2001. Acessado em: 06/11/2004. Disponível em: http://www.lit.cpdtt.cefetpr.br/P_D/biblio/ISKDM_2001.pdf

RICH, Elaine. **Inteligência Artificial**. São Paulo: Makron Books, 1998

ROLIM, Jacqueline Gisèle ; ZÜRN, Hans Helmut ; ZIRBES, Roberto . **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Avaliação do Estado do Isolamento de Transformadores a Partir do Fator de Dissipação**. In: XVII CBA - Congresso Brasileiro de Automática, p. 1-6: Gramado, 2004.

SANTOS, Germano Jose Carvalho. **Lógica Fuzzy**. Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, 2003.

SCM47. **Recomendação para Utilização da Análise Cromatográfica em Óleo Mineral Isolante na Recepção e na Manutenção de Equipamentos**. Grupo coordenador para operação interligada – GCOI.

SHANNON, C. E. et al. **Automata Studies**. Princeton University Press, New Jersey, 1956.

SIMÕES, Marcelo Godoy. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999.

SUÑÉ, Jaime. **Manutenção Preditiva Inteligente de Transformadores via Análise Cromatográfica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2001.

SZCZEPANIAK, P.S. **Soft-Computing Methods for Diagnosis and Design of Electrical Devices**. Lodz(Poland): Institute of Computer Science – Technical University of Lodz, 1999.

TANSCHUIT, Ricardo. **Controle de Processo por Lógica Nebulosa**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Ago. 1978..

TANSCHUIT, Ricardo. **Lógica Fuzzy, Raciocínio Aproximado e Mecanismos de Inferência**. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2001.

TANSCHUIT, Ricardo. **Sistemas Fuzzy**. Universidade Pontifícia Católica. Rio de Janeiro, 2004. Acessado em: 10/09/2004. Disponível em: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/download/ICA-Sistemas%20Fuzzy%20-%20slides.pdf>

TATAI, Victor Kazuo. **Técnicas de Sistemas Inteligentes Aplicadas ao Desenvolvimento de Jogos de Computador**. Tese(doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2003.

THÉ, Maria Alice Lagos. **Raciocínio Baseado em Casos – Uma Abordagem Fuzzy para Diagnóstico Nutricional**. Tese(doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. Acessado em: 04/09/2003. Disponível em: <http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/2064.pdf>

VIERA, Angel Freddy Godoy. **ARANDÚ: um sistema especialista difuso para o diagnóstico de hepatopatias crônicas**. Dissertação(Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Fev. 1996.

XFUZZY, **Fuzzy Logic Design Tool**. Instituto de Microeletrônica de Sevilha. Sevilha (Espanha), 2004. Acessado em: 09/10/2004. Disponível em: www.icmse.cnm.es/Xfuzzy

WATERMAN, Donald Arthur. **A Guide to Expert Systems**. USA: Addison Wesley Publishing Company,1985.

WANG, Zhebyuan. **Neural Net and Expert System Diagnose Transformer Faults**. IEEE Computer Applications in Power, 2000, pp. 50-56.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets – Information and Control. Jan. 1965. Vol. 8, pp. 338-353.

ZADEH, L. A. **Out line of a new approach to the analysis of complex systems and decision process**, IEEE Trans. Syst. Man, Cybern., vol. SMC -3, no. 1, pp. 28 – 44, 1973.

ZÁILIS, K. **Evaluation of Partial Discharge Measurement by Expert Systems**. Czech Technical University in Prague (Czech Republic).

ZIMMERMANN, Hans-Jürgen. **Fuzzy set Theory and its Applications**. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1996, 3^o ed.

Anexo A – Classe XDGAModel.java

```

/*considerando a seguinte sequencia no vetor
 * state[0] = CH4
 * state[1] = H2
 * state[2] = CO
 * state[3] = C2H6
 * state[4] = C2H4
 * state[5] = C2H2
 * state[6] = TCH4_H2          R1
 * state[7] = TC2H6_CH4       R2
 * state[8] = TC2H4_C2H6      R3
 * state[9] = TC2H2_C2H4      R4
 */

package simula;
import xfuzzy.PlantModel;

public class XDGAModel implements PlantModel {
    private double state[];

    static int CH4          = 0;
    static int H2           = 1;
    static int CO           = 2;
    static int C2H6         = 3;
    static int C2H4         = 4;
    static int C2H2         = 5;
    static int R1           = 6;
    static int R2           = 7;
    static int R3           = 8;
    static int R4           = 9;
    static int VC2H6        = 10;
    static int VCH4         = 11;

    public XDGAModel() {
        state = new double[12];
    }

    public void init() {
        /* Percentual dos Gases */
        state[CH4] = 2.55;
        state[H2] = 63.06;
        state[CO] = 31.85;
        state[C2H6] = 0.64;
        state[C2H4] = 1.91;
        state[C2H2] = 0;
        /* Resultado das Relacoes */
        state[R1] = 0.7;
        state[R2] = 2;
        state[R3] = 0.7;
        state[R4] = 0.7;
        /* Valor dos Gases */
        state[VC2H6] = 15;
        state[VCH4] = 5;
    }
}

```

```
}  
  
public void init(double val[]) {  
    state = val;  
}  
  
public double[] state() {  
    return state;  
}  
  
/* este método é chamado n vezes, de acordo com o número  
 * de iterações definidas na configuração de simulação  
 * da ferramenta Xfuzzy  
*/  
public double[] compute(double val[]) {  
    /* Apresentar o resultado na saída padrão */  
    System.out.println("Diagnostico :" + val[0]);  
    return state;  
}  
}
```

Anexo B – Projeto Classes

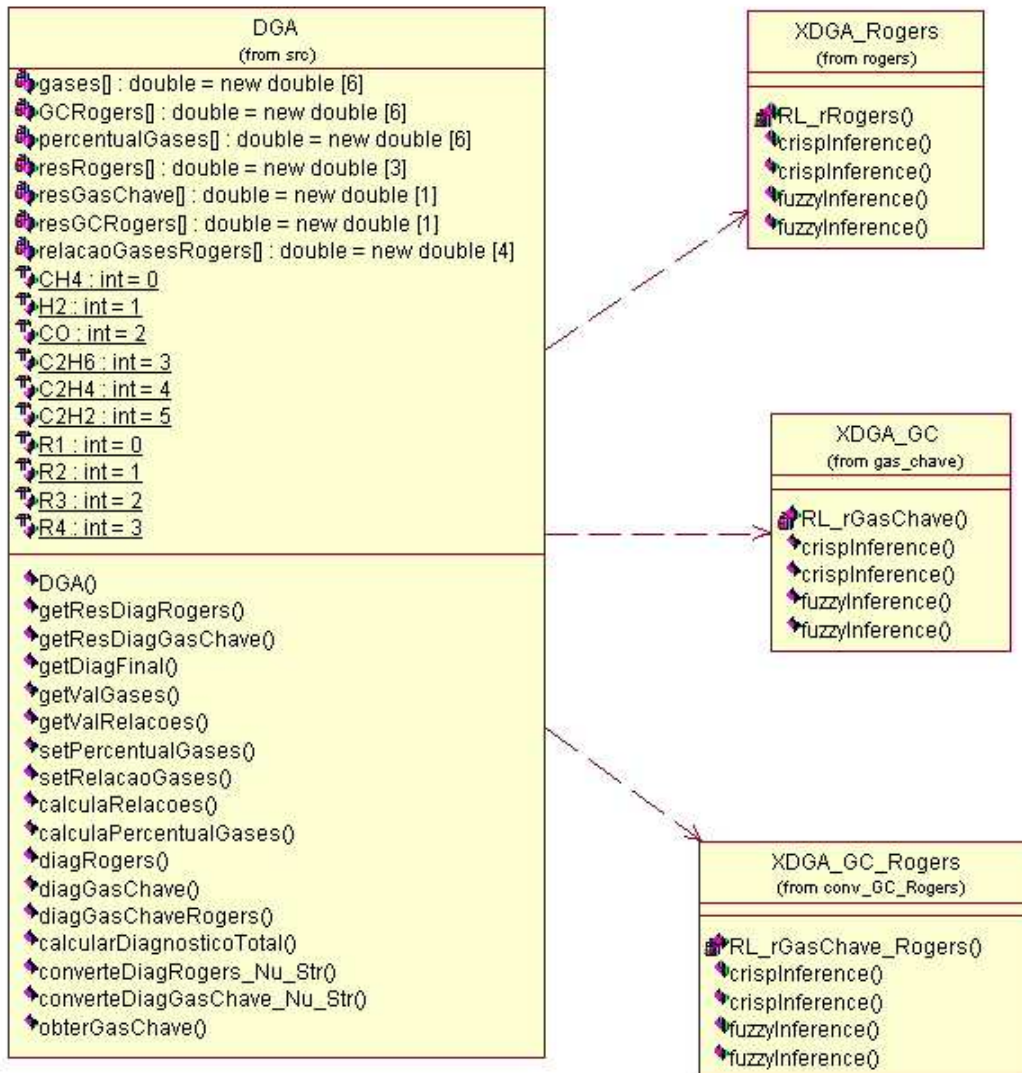


Figura 51. Projeto de classes

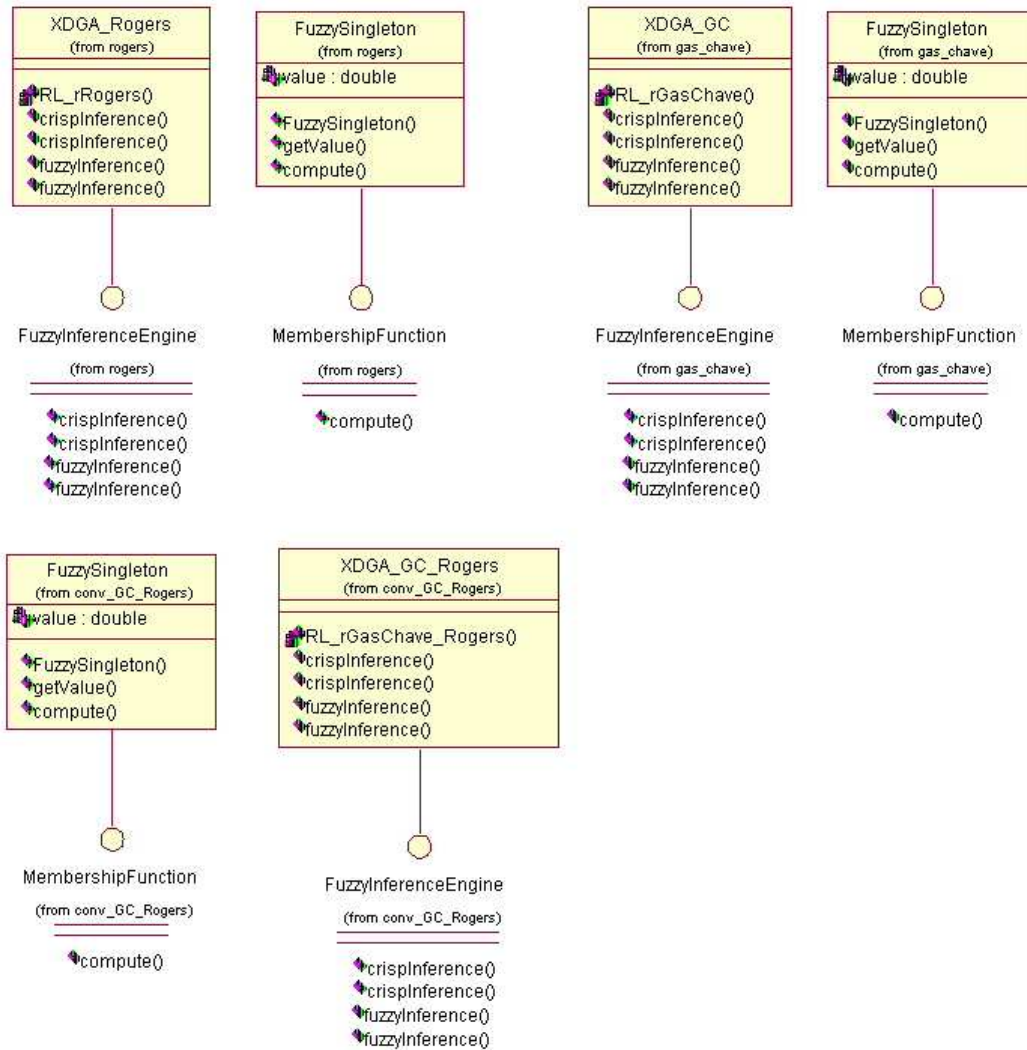


Figura 52. Classes geradas pelo Xfuzzy

Anexo C – Código XFL Módulo Rogers

```

operatorset opRogers {
  and   xfl.prod();
  or    xfl.max();
  defuz xfl.FuzzyMean();
}

type TCH4_H2 [0.0,5.0;256] {
  cinco xfl.rectangle(0.0,0.09);
  zero  xfl.rectangle(0.1,0.99);
  um    xfl.rectangle(1.0,2.99);
  dois  xfl.rectangle(3.0,5.0);
}

type TC2H6_CH4 [0.0,5.0;2] {
  zero  xfl.rectangle(0.0,0.99);
  um    xfl.rectangle(1.0,5.0);
}

type TC2H4_C2H6 [0.0,5.0;256] {
  zero  xfl.rectangle(0.0,0.99);
  um    xfl.rectangle(1.0,2.99);
  dois  xfl.rectangle(3.0,5.0);
}

type TC2H2_C2H4 [0.0,5.0;2] {
  zero  xfl.rectangle(0.0,0.09);
  um    xfl.rectangle(0.1,2.99);
  dois  xfl.rectangle(3.0,5.0);
}

type TDiagRogers [0.0,13.0;256] {
  Deterioracao_Normal           xfl.singleton(1.0);
  Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia xfl.singleton(2.0);
  Sem_Diagnostico               xfl.singleton(3.0);
  Sobreaquecimento_Condutor_Isolado xfl.singleton(4.0);
  Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao xfl.singleton(5.0);
  Descargas_Alta_Energia        xfl.singleton(6.0);
  Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C xfl.singleton(7.0);
  Falha_Termica_Media_100_200_C   xfl.singleton(8.0);
  Falha_Termica_Baixa_150C        xfl.singleton(9.0);
  Falha_Termica_Alta_150_300C     xfl.singleton(10.0);
  Descargas_Parciais_Baixa_Energia xfl.singleton(11.0);
  Descargas_Parciais_Alta_Energia  xfl.singleton(12.0);
}

rulebase rRogers (TCH4_H2 R1, TC2H6_CH4 R2, TC2H4_C2H6 R3, TC2H2_C2H4 R4 : TDiagRogers
Diag1, TDiagRogers Diag2, TDiagRogers Diag3) using opRogers
{
  if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 = Deterioracao_Normal;
  if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 =
  Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia;
  if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 = Sem_Diagnostico;
  if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 =
  Sobreaquecimento_Condutor_Isolado;
}

```

```

if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 =
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 =
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 = Descargas_Alta_Energia, Diag2
= Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == zero & R2 == zero & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Sobreaquecimento_Condutor_Isolado;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == zero & R2 == um & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 = Falha_Termica_Baixa_150C;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Baixa_150C;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 = Falha_Termica_Baixa_150C;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 = Falha_Termica_Alta_150_300C;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Alta_150_300C,
Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 = Falha_Termica_Alta_150_300C,
Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == um & R2 == zero & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Falha_Termica_Alta_150_300C;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Falha_Termica_Alta_150_300C, Diag3 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Falha_Termica_Alta_150_300C, Diag3 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag3 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == um & R2 == um & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag3 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 = Falha_Termica_Alta_150_300C;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;

```



```

if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == dois & R2 == zero & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 = Falha_Termica_Media_100_200_C,
Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag3 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == dois & R2 == um & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C, Diag3 =
Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 =
Descargas_Parciais_Baixa_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 =
Descargas_Parciais_Alta_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 = Sem_Diagnostico;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 =
Descargas_Parciais_Baixa_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 = Descargas_Parciais_Alta_Energia,
Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 =
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Descargas_Parciais_Baixa_Energia, Diag2 = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 =
Descargas_Parciais_Alta_Energia, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == zero & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == zero & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Parciais_Baixa_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == zero & R4 == um) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Parciais_Alta_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == zero & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == um & R4 == zero) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Parciais_Baixa_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == um & R4 == um) -> Diag1 = Descargas_Parciais_Alta_Energia,
Diag2 = Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag3 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;

```

```

if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == um & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == dois & R4 == zero) -> Diag1 =
Descargas_Parciais_Baixa_Energia, Diag2 = Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag3 =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == dois & R4 == um) -> Diag1 = Descargas_Parciais_Alta_Energia,
Diag2 = Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag3 = Descargas_Alta_Energia;
if(R1 == cinco & R2 == um & R3 == dois & R4 == dois) -> Diag1 =
Falha_Termica_Media_100_200_C, Diag2 = Descargas_Alta_Energia;
}

system (TCH4_H2 R1, TC2H6_CH4 R2, TC2H4_C2H6 R3, TC2H2_C2H4 R4 : TDiagRogers Diag1,
TDiagRogers Diag2, TDiagRogers Diag3) {
  rRogers(R1, R2, R3, R4 : Diag1, Diag2, Diag3);
}

```

Anexo D – Código XFL Módulo Gás-Chave

```
operatorset opGasChave {
  or xfl.sum();
  moreorless xfl.not();
  defuz xfl.MaxLabel();
}
```

```
type TCH4 [-1.0,30.0;256] {
  D2 xfl.triangle(7.8,13.0,18.2);
  D4 xfl.triangle(0.72,1.2,1.68);
  D1 xfl.triangle(3.0,5.0,7.0);
  D3 xfl.triangle(9.6,16.0,22.4);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.71);
  SD2 xfl.rectangle(1.69,2.99);
  SD3 xfl.rectangle(7.1,7.79);
  SD4 xfl.rectangle(22.5,30.0);
}
```

```
type TH2 [-1.0,100.0;256] {
  D1 xfl.triangle(36.0,60.0,84.0);
  D2 xfl.triangle(51.6,86.0,120.4);
  D3 xfl.triangle(1.2,2.0,2.8);
  D4 xfl.triangle(4.03,6.7,9.38);
  D5 xfl.triangle(59.94,99.9,139.86);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,1.19);
  SD2 xfl.rectangle(2.9,4.02);
  SD3 xfl.rectangle(9.39,35.9);
  SD4 xfl.singleton(-1.0);
}
```

```
type TCO [-1.0,100.0;500] {
  D4 xfl.triangle(55.2,92.0,128.0);
  D2 xfl.triangle(0.12,0.2,0.28);
  D1 xfl.singleton(-1.0);
  D3 xfl.singleton(-1.0);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.11);
  SD2 xfl.rectangle(0.29,55.19);
  SD3 xfl.singleton(-1.0);
  SD4 xfl.singleton(-1.0);
}
```

```
type TC2H6 [-1.0,30.0;256] {
  D1 xfl.triangle(0.96,1.6,2.24);
  D2 xfl.triangle(0.3,0.5,0.7);
  D3 xfl.triangle(10.2,17.0,23.8);
  D4 xfl.singleton(-1.0);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.29);
  SD2 xfl.rectangle(0.71,0.95);
  SD3 xfl.rectangle(2.25,10.1);
  SD4 xfl.rectangle(23.9,30.0);
}
```

```

type TC2H4 [-1.0,90.0;256] {
  D1 xfl.triangle(1.98,3.5,4.62);
  D2 xfl.triangle(0.12,0.2,0.28);
  D3 xfl.triangle(37.8,63.0,88.2);
  D4 xfl.singleton(-1.0);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.11);
  SD2 xfl.rectangle(0.29,1.97);
  SD3 xfl.rectangle(4.63,37.79);
  SD4 xfl.rectangle(88.21,90.0);
}

type TC2H2 [-1.0,50.0;256] {
  D1 xfl.triangle(18.0,30.0,42.0);
  D2 xfl.triangle(0.06,0.1,0.14);
  D3 xfl.triangle(1.2,2.0,2.8);
  D4 xfl.singleton(-1.0);
  D5 xfl.singleton(-1.0);
  SD1 xfl.rectangle(-1.0,0.05);
  SD2 xfl.rectangle(0.15,1.19);
  SD3 xfl.rectangle(2.81,17.99);
  SD4 xfl.rectangle(42.1,50.0);
}

type TDiagGC [0.0,6.0;2] {
  Arco_Oleo xfl.singleton(1.0);
  Descargas_Parciais xfl.singleton(2.0);
  Oleo_Superaquecido xfl.singleton(3.0);
  Celulose_Superaquecida xfl.singleton(4.0);
  Eletrolise xfl.singleton(5.0);
  Sem_Diagnostico_GC xfl.singleton(0.0);
}

rulebase rGasChave (TCH4 CH4, TH2 H2, TCO CO, TC2H6 C2H6, TC2H4 C2H4, TC2H2 C2H2 :
TDiagGC DiagGasChave) using opGasChave {
  if(CH4 == D1 | H2 == D1 | CO == D1 | C2H6 == D1 | C2H4 == D1 | C2H2 == D1) ->
    DiagGasChave = Arco_Oleo;
  if(CH4 == D2 | H2 == D2 | CO == D2 | C2H6 == D2 | C2H4 == D2 | C2H2 == D2) ->
    DiagGasChave = Descargas_Parciais;
  if(CH4 == D3 | H2 == D3 | CO == D3 | C2H6 == D3 | C2H4 == D3 | C2H2 == D3) ->
    DiagGasChave = Oleo_Superaquecido;
  if(CH4 == D4 | H2 == D4 | CO == D4 | C2H6 == D4 | C2H4 == D4 | C2H2 == D4) ->
    DiagGasChave = Celulose_Superaquecida;
  if(CH4 == D5 | H2 == D5 | CO == D5 | C2H6 == D5 | C2H4 == D5 | C2H2 == D5) ->
    DiagGasChave = Eletrolise;
  if((CH4 == SD1 | CH4 == SD2 | CH4 == SD3 | CH4 == SD4) & (H2 == SD1 | H2 == SD2 | H2 == SD3
| H2 == SD4) & (CO == SD1 | CO == SD2 | CO == SD3 | CO == SD4) & (C2H6 == SD1 | C2H6 ==
SD2 | C2H6 == SD3 | C2H6 == SD4) & (C2H4 == SD1 | C2H4 == SD2 | C2H4 == SD3 | C2H4 ==
SD4) & (C2H2 == SD1 | C2H2 == SD2 | C2H2 == SD3 | C2H2 == SD4)) ->
    DiagGasChave = Sem_Diagnostico_GC;
}

system (TCH4 CH4, TH2 H2, TCO CO, TC2H2 C2H6, TC2H4 C2H4, TC2H2 C2H2 : TDiagGC
DiagGC) {
  rGasChave(CH4, H2, CO, C2H6, C2H4, C2H2 : DiagGC);
}

```

Anexo E – Código XFL Módulo Gás-Chave Rogers

```

operatorset opGC_Rogers {
  or    xfl.max();
  defuz xfl.MaxLabel();
}

type TDiagRogers [0.0,13.0;256] {
  Deterioracao_Normal          xfl.singleton(1.0);
  Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia xfl.singleton(2.0);
  Sem_Diagnostico              xfl.singleton(3.0);
  Sobreaquecimento_Condutor_Isolado xfl.singleton(4.0);
  Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao xfl.singleton(5.0);
  Descargas_Alta_Energia       xfl.singleton(6.0);
  Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C xfl.singleton(7.0);
  Falha_Termica_Media_100_200_C   xfl.singleton(8.0);
  Falha_Termica_Baixa_150C        xfl.singleton(9.0);
  Falha_Termica_Alta_150_300C     xfl.singleton(10.0);
  Descargas_Parciais_Baixa_Energia xfl.singleton(11.0);
  Descargas_Parciais_Alta_Energia  xfl.singleton(12.0);
}

type TDiagGC [0.0,6.0;2] {
  Arco_Oleo          xfl.singleton(1.0);
  Descargas_Parciais xfl.singleton(2.0);
  Oleo_Superaquecido xfl.singleton(3.0);
  Celulose_Superaquecida xfl.singleton(4.0);
  Eletrolise         xfl.singleton(5.0);
}

type TValGas [0.0,100.0;256] {
  Total xfl.sigma(0.0,100.0);
}

rulebase rGasChave_Rogers (TValGas C2H6, TValGas CH4, TDiagGC DiagGC, TDiagRogers DiagR1,
TDiagRogers DiagR2, TDiagRogers DiagR3 : TDiagRogers DiagFinal) using opGC_Rogers
{
  if(DiagR1 == Descargas_Alta_Energia & DiagR2 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C &
(DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) ->
DiagFinal = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
  if(DiagR1 == Descargas_Alta_Energia & DiagR2 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C &
(DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;
  if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal =
Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia;
  if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Arco_Sem_Potencia & (DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC ==
Eletrolise)) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
  if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Sobreaquecimento_Condutor_Isolado
& DiagGC == Celulose_Superaquecida) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
}

```

```

if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Sobreaquecimento_Condutor_Isolado
& (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Sobreaquecimento_Condutor_Isolado;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Descargas_Alta_Energia & (DiagGC
== Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal =
Descargas_Alta_Energia;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Descargas_Alta_Energia & (DiagGC
== Arco_Oleo | DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC ==
Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal = Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Alta_150_300C & DiagR2 ==
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC ==
Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal = Falha_Termica_Alta_150_300C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR2 == Descargas_Alta_Energia &
(DiagGC == Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida)) -> DiagFinal =
Descargas_Alta_Energia;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR2 == Descargas_Alta_Energia &
(DiagGC == Arco_Oleo | DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
DiagR3 != Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC == Arco_Oleo) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Alta_150_300C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
DiagR3 != Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & (DiagGC == Oleo_Superaquecido |
DiagGC == Celulose_Superaquecida | DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC == Eletrolise)) ->
DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 != Descargas_Alta_Energia & DiagGC ==
Arco_Oleo) -> DiagFinal = Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 != Descargas_Alta_Energia & (DiagGC ==
Oleo_Superaquecido | DiagGC == Celulose_Superaquecida | DiagGC == Descargas_Parciais | DiagGC
== Eletrolise)) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC == Arco_Oleo) -> DiagFinal =
Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC != Arco_Oleo & C2H6 ==
Total & CH4 <= Total) -> DiagFinal = Falha_Termica_Alta_150_300C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 == Falha_Termica_Alta_150_300C &
DiagR3 == Descargas_Baixa_Energia_Potencial_Flutuacao & DiagGC != Arco_Oleo & CH4 == Total
& C2H6 <= Total) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 == Descargas_Alta_Energia & DiagGC ==
Arco_Oleo) -> DiagFinal = Descargas_Alta_Energia;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 == Descargas_Alta_Energia & DiagGC !=
Arco_Oleo & C2H6 == Total & CH4 <= Total) -> DiagFinal =
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C;
if(DiagR1 == Falha_Termica_Media_100_200_C & DiagR2 ==
Falha_Termica_Muito_Alta_300_700C & DiagR3 == Descargas_Alta_Energia & DiagGC !=
Arco_Oleo & CH4 == Total & C2H6 <= Total) -> DiagFinal = Falha_Termica_Media_100_200_C;

```

```
if(DiagR1 == Descargas_Parciais_Baixa_Energia | DiagR1 == Descargas_Parciais_Alta_Energia |  
DiagR2 == Descargas_Parciais_Baixa_Energia | DiagR2 == Descargas_Parciais_Alta_Energia) ->  
DiagFinal = Sem_Diagnostico;  
}  
  
system (TValGas C2H6, TValGas CH4, TDiagGC DiagGC, TDiagRogers DiagR1, TDiagRogers  
DiagR2, TDiagRogers DiagR3 : TDiagRogers DiagnosticoFinal) {  
  rGasChave_Rogers(C2H6, CH4, DiagGC, DiagR1, DiagR2, DiagR3 : DiagnosticoFinal);  
}
```

Anexo F – Gráficos Gás-Chave

Figura 53. Arco no óleo

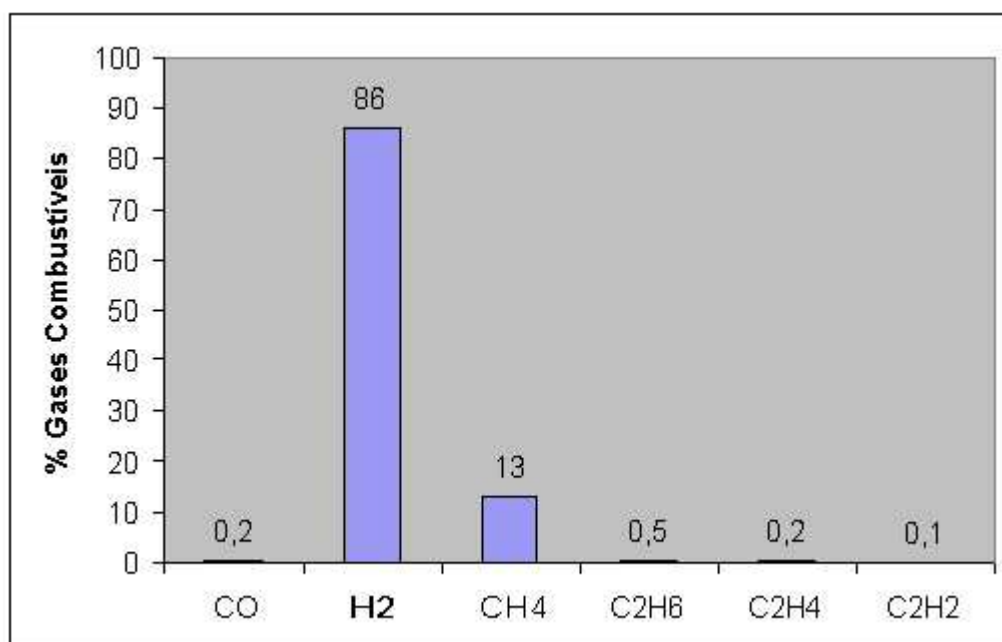
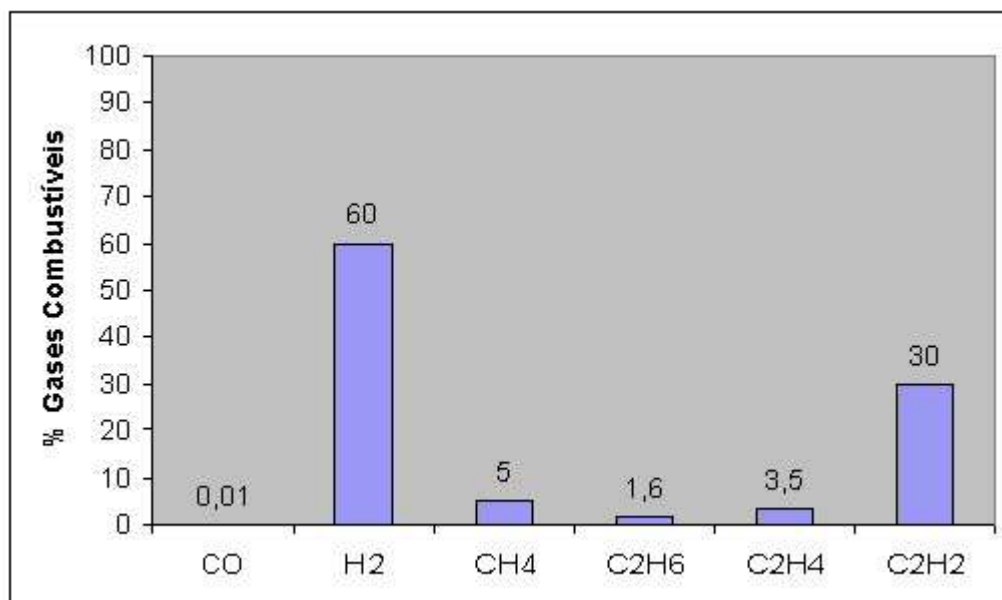


Figura 54. Descargas parciais

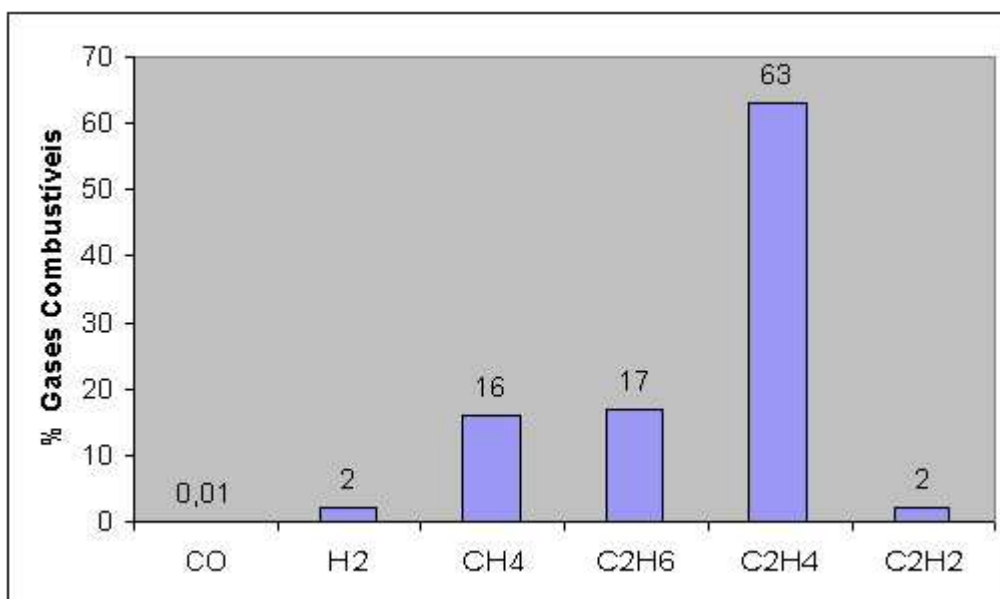


Figura 55. Óleo superaquecido

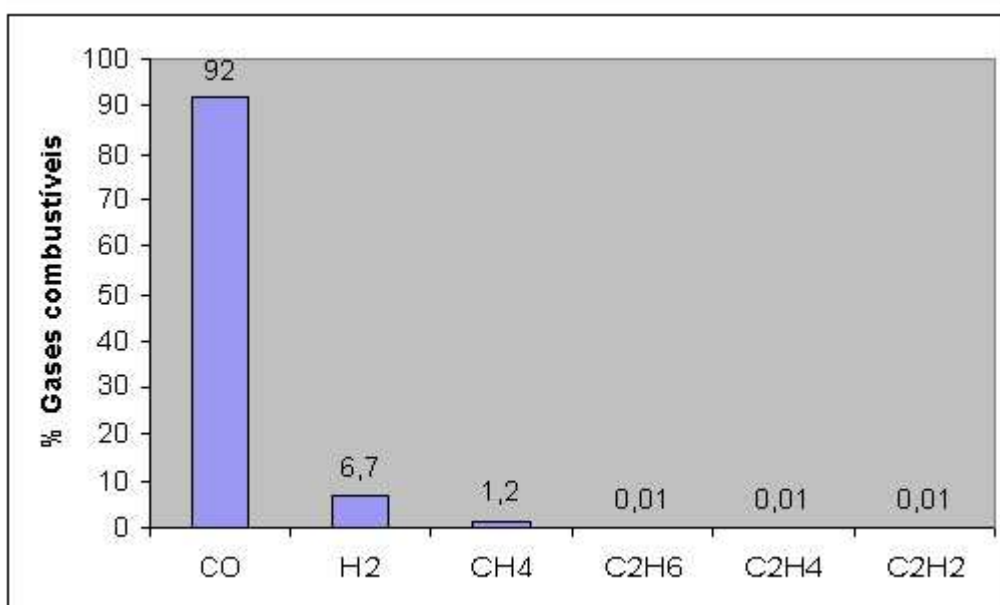


Figura 56. Celulose superaquecida

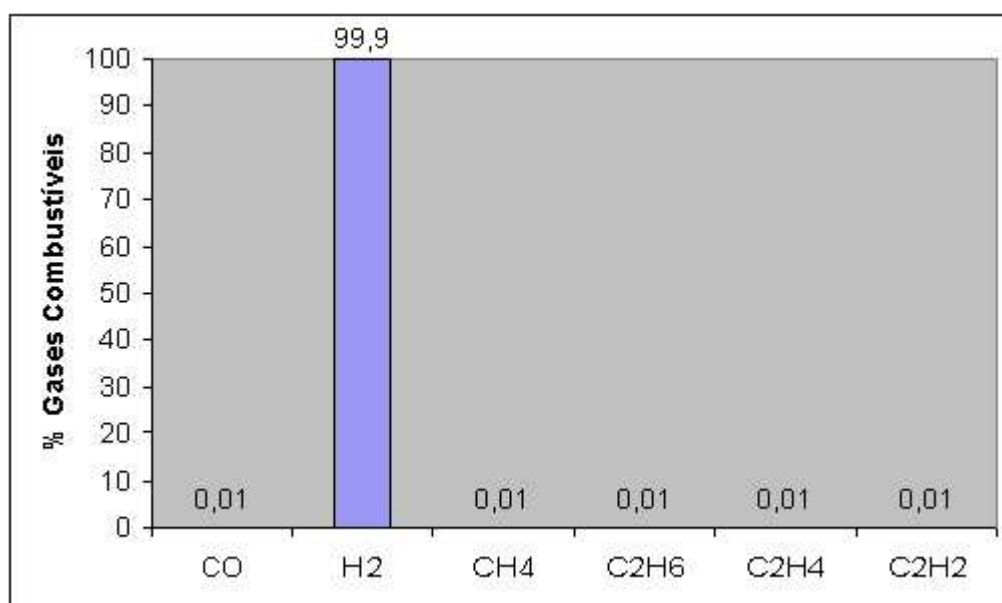


Figura 57. Eletrólise

Anexo G – Interface da Aplicação

Sistema Fuzzy Especialista para Diagnóstico de Transformado...

Valor dos Gases

CH4	55	C2H6	110
H2	35	C2H4	140
CO	65	C2H2	95

Relação dos Gases

CH4/H2	1.57
C2H6/CH4	2.0
C2H4/C2H6	1.27
C2H2/C2H4	0.68

Percentual dos Gases

CH4	11.0	H2	7.0	CO	13.0	C2H6	22.0	C2H4	28.0	C2H2	19.0
-----	------	----	-----	----	------	------	------	------	------	------	------

Diagnósticos

Rogers 1	Falha Termica Media (100-200C)
Rogers 2	Falha Termica Alta (150-300C)
Rogers 3	Descargas Baixa Energia Potencial Flutuacao
Gás Chave	Celulose Superaquecida
Final	Falha Termica Alta (150-300C)

Calcular **Limpar** **Sair**

Figura 58. Tela principal da aplicação