

EDUARDO VELÁZQUEZ CASTILLO

**APLICAÇÃO DE ONTOLOGIA E SISTEMA
ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS
EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**Florianópolis
2003**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DE ONTOLOGIA E SISTEMA
ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS
EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Eduardo Velázquez Castillo

Florianópolis, novembro de 2003.

APLICAÇÃO DE ONTOLOGIA E SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Eduardo Velázquez Castillo

“Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.”

Prof. Guilherme Bittencourt, Dr. Rer. Nat.
Orientador

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Ph.D
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Ricardo J. Rabelo, Dr.
Co-Orientador - Presidente de mesa

Prof. Mauro Roisenberg, Dr.

Profa. Jacqueline Gisele Rolim, Dra.

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.

"Todos os impérios do futuro serão impérios do conhecimento,
e somente terão êxito os povos que entendam como gerar
conhecimentos e como protegê-los."

Albert Einstein

Ao grande amor da minha vida e
aos frutos deste: Alejandro e Lara.

Agradecimentos

Ao Professor Guilherme Bittencourt, pela extrema confiança e orientação para a realização deste trabalho.

Ao Professor Ricardo J. Rabelo, pela grande ajuda como Co-Orientador nesta tarefa.

À Itaipu Binacional que por meio de seu corpo funcional permitiu-me a realização deste trabalho.

Ao Eng. Erwin Bachmann Beck, pelo incansável apoio e a excelência na viabilização das gestões perante a Itaipu Binacional.

Ao Eng. Ricardo César Pamplona, pelo constante estímulo e incentivo, pelo seu afã de viabilizar a “inovação tecnológica” na Itaipu Binacional e a evolução técnica e científica dos funcionários.

Ao Eng. Juan Jiménez Mendoza, que desde sua posição gerencial imediata permitiu-me conciliar o grande volume de tarefas nas minhas atividades funcionais com a realização deste trabalho.

Ao amigo Roberval Antônio de Oliveira, pelo grande auxílio técnico e a sempre paciente ajuda para expressar as minhas idéias em termos informáticos.

Ao colega Clóvis de Almeida Junior, pela amizade e a valiosa ajuda no momento mais difícil desta tarefa.

A todos os amigos da Itaipu Binacional e especialmente aos da ENEE.DT e da ENCA.DT, que colaboraram e apoiaram a realização deste trabalho.

Aos amigos Luís Alberto Pradenas, Hirberto Bischoff, Jaime Suñé, João Carlos Sihvenger e a todos os que aportaram com seus conhecimentos e experiência para este trabalho.

Aos amigos Idigar Dias de Souza Junior da Itaipu Binacional e Flávio Pereira da Unioeste-Foz, pela valiosa ajuda na cansativa tarefa de corrigir o meu “portu-ñol” neste trabalho.

Aos meus pais pelo constante e peculiar incentivo espiritual para a realização profissional dos seus filhos.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

APLICAÇÃO DE ONTOLOGIA E SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Eduardo Velázquez Castillo

Novembro/2003

Orientador: Guilherme Bittencourt, Dr. Rer. Nat.

Área de Concentração: Automação e Sistemas

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Sistema Especialista, Base de Conhecimento, Transformador de Potência, Ontologia.

Número de Páginas: 128

Neste trabalho foi desenvolvido o protótipo de um Sistema Especialista (SE) que tem como objetivo principal auxiliar os especialistas em transformadores de potência, de uma forma ágil e confiável, na emissão de diagnósticos de falhas incipientes (defeitos) nos transformadores principais dos geradores da Usina Hidrelétrica da Itaipu Binacional. Este protótipo foi desenvolvido utilizando o arcabouço Jess, e a base de conhecimento sobre transformadores de potência foi classificada e modelada na forma de ontologia utilizando o Protégé-2000. Nesta proposta, a integração do Jess e o Protégé possibilitou a transferência dos dados obtidos nos ensaios de cromatografia de gases dissolvidos no óleo mineral isolante e outras informações armazenadas na base de conhecimento, utilizadas pelo SE para a geração dos diagnósticos correspondentes. Os testes realizados com os protótipos demonstraram a eficiência da metodologia, validando a proposta.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

APPLICATION OF ONTOLOGY AND EXPERT SYSTEM FOR DIAGNOSIS OF FAULTS IN POWER TRANSFORMERS

Eduardo Velázquez Castillo

November/2003

Advisor: Guilherme Bittencourt, Dr. Rer. Nat.

Area of Concentration: Automation and System

Keywords: Artificial Intelligence, Expert System, Knowledge Base, Power Transformer, Ontology.

Number of Pages: 128

This work developed the prototype of an Expert System (ES) with the principal objective of assisting the power transformer specialists, in an agile and reliable manner, to diagnose incipient faults in the main transformers of the generators at the Itaipu Binacional Hydroelectric Power Plant. The prototype was developed utilizing the Jess Shell, and the power transformer knowledge base was classified and modelled in the form of an ontology utilizing the Protégé-2000. In this proposal the integration of Jess and Protégé, possibilitated the transfer of the data obtained from the chromatography tests of gases dissolved in the insulating mineral oil and of other information stored in the knowledge base, employed by the ES to generate the corresponding diagnoses. The tests performed with the prototypes demonstrated the efficiency of the methodology, validating the proposal.

Sumário

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Contribuições Esperadas	4
1.3 Estrutura do Trabalho.....	5
2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3 - TRANSFORMADORES.....	24
3.1 Definição	24
3.2 Aplicações	24
3.3 Classificação	25
3.4 Isolante Sólido - Papel	26
3.4.1 Degradação do Papel.....	26
3.5 Isolante Líquido - Óleo Mineral	27
3.5.1 Generalidades	27
3.5.2 Natureza e Principais Componentes	27
3.5.3 Características.....	28
3.6 Indicadores de Desempenho.....	29
3.6.1 Ensaio Físico-químico.....	29
3.6.2 Análise de Gases Dissolvidos	35
3.7 Transformadores Principais da Itaipu.....	38
3.7.1 Generalidades	38
3.7.2 Características Básicas	39
3.7.3 Projeto e Fabricação dos Componentes.....	40
3.7.4 Desempenho de Operação e Manutenção	42
3.7.5 Sistema de Operação e Manutenção da Itaipu	45
3.7.6 Monitoramento de Transformadores.....	46
4 - CRITÉRIOS DE DIAGNÓSTICO DE DGA	51
4.1 Critério de Dörnemburg	51

4.2	Critério de Rogers	52
4.3	Critério de Duval.....	54
4.4	Critério IEC-60599/NBR 7274	55
4.5	Critério de LABORELEC	57
4.6	Critério de Pugh	59
5	- INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	61
5.1	Uma Visão Histórica	61
5.2	Definição	63
5.3	Linhas de Pesquisa	63
5.4	Sistemas Especialistas.....	64
5.4.1	Algumas Definições.....	64
5.4.2	Principais Formas de Representação do Conhecimento	64
5.4.3	Sistemas de Produção.....	70
5.4.4	Categorias de Aplicação.....	70
5.4.5	Estrutura de um Sistema Especialista	71
5.4.6	Tipos de Ferramenta para Construção de um SE	72
5.4.7	Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais.....	73
5.4.8	Limitações de um Sistema Especialista.....	73
6	- IMPLEMENTAÇÃO	74
6.1	Descrição da Proposta	74
6.2	Escolha das Ferramentas.....	77
6.2.1	Protégé 2000	78
6.2.2	Jess - "Java Expert System Shell"	79
6.3	Desenvolvimento do Protótipo.....	81
6.3.1	Regras de Produção em Jess.....	83
6.3.2	Entradas, Execução e Saída do Sistema	85
6.3.3	Discussão e Apresentação dos Resultados	86
7	- CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	96

ANEXOS	99
ANEXO 1: TRECHOS DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO EM JESS.....	99
ANEXO 2: TELAS DE SAÍDA DO SISTEMA.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Inferência de cromatografia (YAN et al., 1991)	12
Figura 2.2 Base de Conhecimento (LIAO et al., 2001).....	20
Figura 3.1 Taxa de Falha dos Transformadores da Itaipu, (PISA, 2003).....	43
Figura 3.2 Taxa de Falha em Transformadores do Brasil, 92-98 (PISA, 2003) .	44
Figura 3.3 Posicionamento ilustrativo dos sensores (SIEMENS, 1992)	48
Figura 3.4 Representação da interligação entre os painéis, (SIEMENS, 1992)..	48
Figura 5.1 Atividades da IA (Bittencourt,1998).....	62
Figura 5.2 Uma Rede Semântica (RICH, 1983).....	66
Figura 5.3 Definição das classes (PROTÉGÉ, 2000)	69
Figura 5.4 Definição das instâncias dos objetos (PROTÉGÉ, 2000).....	69
Figura 6.1 Esquema do sistema proposto	75
Figura 6.2 Exemplo de regra no Jess, para o critério IEC.....	84
Figura 6.3 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "transformador"	87
Figura 6.4 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "cromatografico"	88
Figura 6.5 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	89
Figura 6.6 Saída do Sistema Especialista: Tela inicial de execução	90
Figura 6.7 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos.....	91
Figura 6.8 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos.....	92
Figura 6.9 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos.....	93
Figura 6.10 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos	94
Figura 6.11 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos	95
Figura 8.1 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	105
Figura 8.2 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	105
Figura 8.3 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	106
Figura 8.4 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	106
Figura 8.5 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	107
Figura 8.6 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Trabalhos utilizando DGA com técnicas de IA.....	22
Tabela 3.1 Concentração de solubilização de gases (MILASCH, 1984)	36
Tabela 3.2 Entrada em operação dos geradores da IB (SOM, 1995).....	42
Tabela 3.3 Falhas ocorridas nos Transformadores da Itaipu (SOM, 1995)	43
Tabela 4.1 Tipos de falhas - Dörnemburg (GCOI, 1986)	52
Tabela 4.2 Relações propostas pelo critério de ROGERS (GCOI, 1986).....	53
Tabela 4.3 Diagnóstico de falhas - ROGERS (GCOI, 1986).....	53
Tabela 4.4 Tipos de falhas - Duval (GCOI, 1986).....	54
Tabela 4.5 Relações características entre gases NBR, (NBR-7274, 1982).....	55
Tabela 4.6 Diagnóstico de falhas - NBR (NBR-7274, 1982)	57
Tabela 4.7 Recomendações segundo critério Laborelec (GCOI, 1986)	57
Tabela 4.8 Tipos de falhas - Laborelec (GCOI, 1986)	58
Tabela 6.1 Análise cromatográfica, exemplo de dados (SOM, 1995)	76

LISTA DE ABREVIATURAS

IB	Itaipu Binacional.
UHI	Usina Hidrelétrica de Itaipu.
IA	Inteligência Artificial.
SE	Sistema Especialista.
RNA	Redes Neurais Artificiais.
DGA	Do inglês <i>Dissolved Gas-in-oil Analysis</i> . Análise de Gases Dissolvidos no Óleo.
GIS	Do inglês <i>Gas Isolation Station</i> . Subestação Isolada a Gás (SF ₆).
TCA	Teoria de Conjuntos Aproximados.
JAVA	Linguagem de programação orientada a objeto.
Jess	Do inglês <i>Java Expert System Shell</i> . Arcabouço de Linguagem de Engenharia de Conhecimento.
CLIPS	Ferramenta de desenvolvimento de sistemas especialistas baseado em regras, escrita em linguagem "C", desenvolvida pela NASA.
API	Do inglês <i>Application Program Interface</i> , interfaces de programação de aplicações.
GUI	Do inglês <i>Graphical User Interface</i> . Interface Gráfica de Usuários,.
SERVLET	Módulos que estendem servidores orientados a requisições/respostas, como servidores WEB.
APPLET	Pequenos programas a ser executados desde outras aplicações.
Shell	Arcabouço de Linguagem de Engenharia de Conhecimento.

PRINCIPAIS DEFINIÇÕES ADOTADAS (SOM, 1995)

SISTEMA: É um grupo de equipamentos que desempenham uma função requerida.

FUNÇÃO REQUERIDA: É o conjunto de condições de funcionamento para o qual o equipamento foi projetado, fabricado ou instalado.

FALHA: É toda alteração física ou química no estado do equipamento que o impede de desempenhar a sua função requerida e o leva invariavelmente à indisponibilidade.

DEFEITO: É toda alteração física ou química no estado do equipamento que não impede de desempenhar a sua função requerida, podendo operar com restrições. Este conceito é utilizado como sendo Falha Incipiente, isto é, o início da falha.

CONFIABILIDADE: É a probabilidade de um equipamento ser capaz de desempenhar a sua função requerida de forma satisfatória, por um período de tempo determinado.

DISPONIBILIDADE: É a percentagem de tempo que um equipamento ou sistema está apto a desempenhar a sua função requerida, ou então, é a probabilidade de, em um dado momento, o equipamento ou sistema estar no estado disponível.

1 - INTRODUÇÃO

Os transformadores são um dos principais componentes num sistema de potência e desempenham um papel fundamental nas etapas que antecedem à entrega de energia elétrica aos consumidores finais. Em se tratando de centrais hidrelétricas, uma falha nesses transformadores, além de ocasionar a perda de uma grande capacidade de transformação de energia, poderá acarretar graves conseqüências. No caso da Itaipu Binacional devido a sua importância energética/operacional, a perda de um dos transformadores principais dos geradores poderá inclusive ocasionar problemas de estabilidade do sistema interligado nacional do setor elétrico brasileiro e paraguaio (VELÁZQUEZ, 2002). Além dos prejuízos na qualidade de energia, estão envolvidos elevados custos na recuperação, reparo em fábrica ou compra de novos equipamentos e perdas devido ao lucro cessante, até a retomada da condição operativa normal (KIRTLEY et al. 1996). Isso tudo, no momento em que um maior controle tem sido cobrado por parte do agente nacional, exigindo cada vez mais manter ou melhorar a qualidade da energia elétrica fornecida, estabelecendo pesadas multas às concessionárias que não cumprirem suas metas (WESLEY, 2003).

Por outro lado, devido à localização dos transformadores principais da Usina Hidrelétrica de Itaipu ser subterrânea e a parte ativa dos mesmos estar imersa em grandes volumes de óleo isolante (de 30.000 a 42.000 litros), falhas incipientes (defeitos) que não forem detectadas em tempo hábil podem resultar em explosões freqüentemente acompanhadas de incêndios e vazamento de óleo, arriscando a integridade das pessoas e o meio ambiente, além de provocar severas e incalculáveis conseqüências aos demais equipamentos e sistemas instalados na Casa de Força.

O aumento da confiabilidade dos sistemas de potência ou dos equipamentos elétricos não é proporcional ao crescimento anual da geração de energia. A previsão de crescimento total de consumo de energia elétrica no Brasil

para o período entre 2000 e 2009, por exemplo, é da ordem de 4.7% ao ano. Ou seja, crescimento dos atuais 64.300 MW para 109.400 MW, incluindo-se as parcelas de energia importadas por meio das interligações com países vizinhos, como apontado por NUNES (2001). Com o intuito de aumentar a confiabilidade dos sistemas de potência e equipamentos associados em geral, vêm sendo implementadas melhores metodologias de manutenção e diagnóstico de falhas incipientes (YAN et al. 2000) dentre outras, das seguintes maneiras:

- Introduzindo a Manutenção Baseada na Confiabilidade ao invés de Manutenção Baseada no Tempo. Esta abordagem pode ser melhor conhecida em VELÁZQUEZ (1996) e NUNES (2001).
- Melhorando os métodos de monitoramento *on-line* em combinação com as vantagens dos métodos elétricos, acústicos, mecânicos e químicos, com a finalidade de detectar defeitos e deterioração incipiente do isolamento, a exemplo das propostas desenvolvidas por ISLAM e LEDWICH (1996), BO, AGGARWAL et al. (1996), BIRLASEKARAN, XINDZHOU et al. (2000).
- Desenvolvendo sistemas de diagnóstico baseados na experiência, na estatística, na ciência da computação e especialmente nas técnicas de Inteligência Artificial, que ajudem aos especialistas na tomada de decisão em relação ao estado operativo dos equipamentos.

Devido à importância estratégica dos transformadores de potência, faz-se necessária uma rigorosa vigilância do estado operacional destes equipamentos. Nesse sentido, o óleo mineral isolante constitui-se no principal indicador da "saúde" dos transformadores e a análise dos gases dissolvidos no óleo isolante (DGA) torna-se uma aliada de peso e um recurso de grande valor para os especialistas na emissão de diagnósticos sobre falhas incipientes (defeitos) em transformadores de potência. Entretanto o DGA, embora seja o método mais utilizado no monitoramento das condições de operação dos transformadores, não

fornece uma conclusão final do tipo ou localização da falha (YANG et al., 1998 e WANG et al., 2000), e portanto os resultados dos ensaios elétricos e outras variáveis adquiridas pelo sistema de monitoramento *on-line*, bem como medidas para a localização das descargas parciais, também devem ser integradas para a emissão do diagnóstico (WANG et al., 2000).

Atualmente, além das ferramentas estatísticas e computacionais tradicionais, com o desenvolvimento das ciências da computação na área da IA, a aplicação de Sistemas Especialistas, Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais parece ser uma via com alto potencial para aumentar a confiabilidade e a qualidade dos diagnósticos de falhas incipientes em transformadores de potência (GAO e YAN, 2002).

No momento da tomada de decisão sobre o estado operativo dos transformadores, os engenheiros da manutenção deparam com duas grandes limitações quando esta deve ser realizada de uma forma imediata e precisa: não contar com todas as informações necessárias com a devida certeza e rapidez, e sentirem-se induzidos a análises simplistas para a emissão de diagnósticos pela maioria dos critérios disponíveis, já que os mesmos, como citado por PRADENAS (1996), são apenas de orientação e não totalmente conclusivos. Portanto estas análises sempre devem ser correlacionadas e comparadas com outras informações, visto que muitas vezes falham na emissão dos diagnósticos.

Pelo exposto, justificam-se os elevados investimentos das empresas do setor elétrico no sentido de fazer uso de toda a tecnologia disponível para adquirir a maior quantidade possível de variáveis ou parâmetros de desempenho por meio dos sistemas de monitoramento *off-line* ou *on-line*, que ajudem na emissão de diagnóstico de falhas incipientes (defeitos) dos transformadores de potência. Atualmente existem muitas ferramentas e técnicas de Inteligência Artificial disponíveis ou em processo de desenvolvimento que podem ser utilizadas para esse fim bem como para o "resgate da memória técnica" dos

especialistas nas diversas áreas de atuação (VELÁZQUEZ, 2003). Neste trabalho foi realizada uma aplicação de ontologia e sistema especialista para o diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência, usando como caso teste dados reais de ensaios efetuados em transformadores de potência da Usina Hidrelétrica da Itaipu Binacional, que acusaram falhas, e foram retirados de operação e reparados em fábrica.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar os domínios das técnicas de Inteligência Artificial de uma forma genérica e de Ontologias e Sistemas Especialistas em particular, avaliando a aplicabilidade das mesmas na emissão de diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência.

Como objetivos específicos deste trabalho, pretende-se:

- Representar e modelar o conhecimento relativo aos transformadores de potência da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional na forma de ontologia.
- Adotar um arcabouço para Sistemas Especialistas adequado em termos de portabilidade, disponibilidade e eficiência, que interaja com a base de conhecimento modelada na forma de ontologia.
- Desenvolver o protótipo de implementação de um Sistema Especialista para emissão de diagnóstico de falhas incipientes, as possíveis causas e as providências a serem tomadas com relação ao estado operacional dos transformadores de potência da Usina Hidrelétrica da Itaipu Binacional.

1.2 Contribuições Esperadas

Com a concretização destes objetivos, espera-se contribuir com as empresas do setor elétrico nas quais, a exemplo da Itaipu Binacional, os transformadores de potência exigem elevada disponibilidade operacional e

confiabilidade, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em relação ao estado operativo dos mesmos.

Além disso, espera-se:

- Dispor de um modelo de representação do conhecimento de transformadores de potência na forma de ontologia, visando a reutilização futura em outras aplicações de interesse da empresa.
- Contribuir com o esforço que vem sendo realizado pela Itaipu Binacional, com a proposta de um SE que favoreça, na medida do possível, a preservação do conhecimento dos especialistas em transformadores de potência.
- Contar com um sistema para a emissão de diagnóstico de falhas incipientes (defeitos) em transformadores de potência de custo relativamente baixo e facilidade de manutenção/atualização, devido às características inerentes dos Sistemas Especialistas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos; assim no Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura, onde são resumidos os trabalhos selecionados com aplicações de Inteligência Artificial no setor elétrico em geral e de uma forma específica na área de transformadores de potência.

O Capítulo 3 apresenta de uma forma geral as bases teóricas sobre transformadores, destacando de uma forma qualitativa as informações mais importantes sobre os transformadores principais das unidades geradoras da Usina Hidroelétrica de Itaipu, os quais foram utilizados como caso teste neste trabalho.

O Capítulo 4 trata dos principais critérios consolidados de diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência, por meio da análise de gases

dissolvidos no óleo (DGA).

No Capítulo 5 é enfocada a teoria sobre Inteligência Artificial, dando-se ênfase aos Sistemas Especialistas e Ontologia, utilizados neste trabalho.

O Capítulo 6 aborda a metodologia de Implementação adotada para o desenvolvimento da proposta, apresentando também os Resultados e Discussões.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as Conclusões e as propostas de trabalhos futuros. Na seção ANEXOS são mostrados alguns dos trechos mais importantes do programa utilizado na implementação do protótipo desenvolvido em Jess. Nessa seção também são mostradas algumas telas da base de conhecimento desenvolvida em Protégé 2000.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são analisados e resumidos vários trabalhos sobre tratamento de alguns tipos de problemas em Sistemas de Potência, nos quais foram aplicadas diferentes técnicas de inteligência artificial. Também são analisados artigos referentes à aplicação de IA, especificamente no diagnóstico de falhas em transformadores, tentando destacar em ambos os casos, dentre outros, os seguintes aspectos: tipos de dados analisados, as técnicas ou ferramentas utilizadas e quais problemas específicos propõe-se solucionar.

Da revisão de oitenta referências sobre pesquisas, desenvolvimento e aplicações de SE em sistemas elétricos de potência, Zhang et al. (1989) destacaram que a crescente tendência da aplicação dos SEs no setor elétrico é devido as vantagens destes para assistir as atividades dos especialistas humanos quanto à flexibilidade, entendimento, universalidade e a rapidez com que os SEs podem responder a uma situação de emergência. Para o estabelecimento de SE, muitas ferramentas têm sido desenvolvidas, por exemplo:

- Linguagens de programação como Prolog (baseada em lógica) e LISP (baseado no paradigma de programação funcional).
- Arcabouços, que fornecem esqueletos de sistemas especialistas com propósitos gerais.
- Assistentes na construção de sistemas e outros meios de suporte, tais como apoio à depuração de programas, meios de entrada e saída, editores de base de conhecimento, e outros.

Perto de 30% dos trabalhos analisados (Zhang et al. 1989) estão orientados a estudos sobre equipamentos, peças ou unidades integradas. O objetivo comum no gerenciamento de sistemas de potência é fornecer segurança, baixo custo e confiabilidade ao sistema. Portanto, a tendência para os avanços

em controle e gerenciamento tecnológico de sistemas totalmente integrados e automatizados atinge níveis cada vez mais altos. No entanto, os problemas mais evidentes são:

- Rápido incremento do número de mensagem em tempo real, superando a rapidez do operador. Esta dificuldade é chamada de barreira cognitiva e deve ser superada.

- *Software* de processamento numérico não encontra os requerimentos operacionais na mesma situação dos sistemas de potência. Exemplos são condições de emergência usando *softwares* limitados.

- A maioria dos problemas de projeto, planejamento e controle são complexos e consomem tempo devido as múltiplas funções, múltiplas restrições, interações de sistemas complexos, a necessidade de concessão, e assim por diante.

Vários problemas de sistemas de potência são discutidos baseando-se na classificação das situações nas quais pode aplicar-se SE ou não, por exemplo:

- As variações de estado dinâmico contêm um grande número de fatores complexos. Portanto, problemas de diagnóstico durante a operação do sistema são difíceis de ser processado numericamente.

- Muitos problemas importantes não podem ser expressos em forma de equações devido a falta de teoria estabelecida.

- Os operadores requerem prolongada prática operacional para estar totalmente qualificados devido à complexidade e severidade dos sistemas de potência. Eles necessitam treinamento periódico de atualização. Isso significa que especialistas humanos qualificados são valiosos e escassos.

- Um sistema de potência consiste de muitos subsistemas, sendo utilizados vários aparelhos de comunicação entre eles. Os dados e mensagens não são claros devido às amplas áreas, longas distâncias, interferência e variação no tipo de dados.

Da discussão acima pode-se concluir que os sistemas de potência são candidatos óbvios para a aplicação de SE.

Traçando um panorama das aplicações, a maioria dos SEs em engenharia de potência são protótipos para demonstração, pesquisa ou campo de testes. Entretanto, alguns sistemas especialistas tem sido utilizados na prática desde 1980 nos Estados Unidos e Japão (Zhang et al., 1989). Embora alguns planos progressivos para demonstração tenham sido registrados, não está clara a demarcação entre o estágio de uso parcial e o estágio de desenvolvimento dos SE em sistemas de potência devido as seguintes condições:

- O processo de construção de um SE é um ciclo iterativo de desenvolvimento, melhoramento e expansão.
- Os SEs propostos para a operação de sistemas de potência são usados somente para ajuda ou consulta pelos despachantes.
- Um protótipo de SE para produção é diferente de um protótipo de comercialização para sistemas de potência.

Da observação foi constatado que o papel predominante do SE em sistemas de potência é para diagnóstico, constituindo-se em 40% das aplicações.

No desenvolvimento de SEs usados em sistemas de potência, existem os seguintes problemas predominantes:

- **INTERFACE ENTRE O SE E A PROGRAMAÇÃO NUMÉRICA**

A iteração num SE entre a computação simbólica e a computação numérica de um programa algorítmico é de particular importância para operação de sistemas de potência. Eles podem ser vinculados pelo estabelecimento de algumas regras, utilização de uma memória de dados comum para o intercâmbio de mensagens, ou ser rodado em paralelo em uma rede de computadores.

- **AUMENTO DA RAPIDEZ DA COMPUTAÇÃO SIMBÓLICA**

A computação simbólica em SE é lenta em geral. A redução do tempo de acesso aos dados é crítico na implementação do SE.

- **AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO**

A aquisição do conhecimento tem sido o principal gargalo no desenvolvimento de SE. Este assunto é de particular importância em razão da utilidade do SE depender fortemente da qualidade do conhecimento introduzido ao sistema.

- **CONSISTÊNCIA DA BASE DE CONHECIMENTO**

Uma técnica de redução do conflito é necessária para manter consistente a base de conhecimento quando surgem conflitos entre as regras de uma base de conhecimento ou superposição de conhecimentos. Este é um problema aberto no enfoque de sistemas baseados em conhecimento.

- **MANUTENÇÃO DE SE**

Facilidade de manutenção de *software* de SE é um requerimento comum dos especialistas de sistemas de potência.

Da análise dos artigos, Zhang et al. (1989) tiraram as seguintes lições obtidas das aplicações de SE existentes:

- Ter uma atitude moderada com relação a SE. O SE é uma ferramenta útil e intelectual, mas não substitui totalmente o especialista humano.
- Definir claramente, formular e descrever o assunto e os aspectos técnicos com relação à aplicação do problema.
- Começar com um pequeno protótipo, mas pensar e planejar para outro maior. Um desenvolvimento evolutivo é a forma mais efetiva de proceder.
- Tomar cuidado na escolha da linguagem de programação de IA para ajustar às características, com a solução e as peculiaridades do sistema, sugeridas pelo domínio do problema.
- Usar um arcabouço de SE disponível de algum tipo, evitando usar novos arcabouços que ainda estão sendo desenvolvidos.
- Conseguir a aceitação dos usuários através das fases de aplicação desenvolvidas, ajustando a aplicação às funções de trabalho dos usuários.
- Considerar todo o ciclo de vida do SE, prevendo a manutenção, atualização e suporte da aplicação desde o início do desenvolvimento.

YAN et al. (1991) aplicaram sistemas especialistas (SE) para obter um diagnóstico rápido e seguro do estado do isolamento de equipamentos de potência (transformadores e buchas de alta tensão) através de resultados de análise cromatográfica realizada nos mesmos no campo. Os autores desenvolveram um sistema especialista utilizando as linguagens de IA, LISP e TURBO-PROLOG.

A base de conhecimentos para o sistema proposto foi extraída do

conhecimento dos especialistas, já que segundo os autores quanto mais se utiliza esse conhecimento, mais confiável será o diagnóstico devido à complexidade do processo de envelhecimento dos sistemas de isolamento e a imperfeição dos métodos de diagnósticos usuais.

Num dos exemplos apresentados, os autores analisaram os dados cromatográficos do óleo isolante de transformadores. Os autores utilizaram estes dados, devido a cromatografia ser muito usada como método de diagnóstico para detectar defeitos tais como sobreaquecimento, descarga de arco e outros.

O SE desenvolvido constitui-se de 3 partes principais: base de conhecimento, máquina de inferência e interface de explicação. O diagrama em blocos do motor de inferência desenvolvido é mostrado na figura 2.1

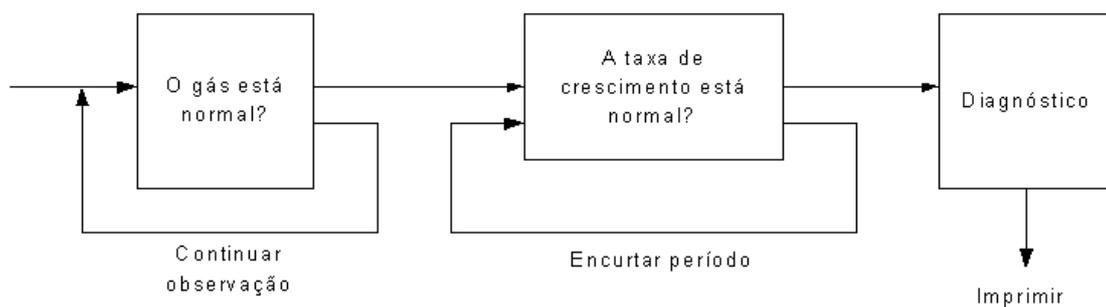


Figura 2.1 Inferência de cromatografia (YAN et al., 1991)

Neste caso a linguagem de programação inteligente utilizada foi o LISP. Dentro da base de conhecimento, além das regras da IEC, algumas experiências foram introduzidas. Os autores levaram em consideração também muitos parâmetros tais como as características do gás, a taxa e razão de incremento de diferentes conteúdos, e outros. Assim, nesse sistema há uma grande quantidade de regras de inferência na base de conhecimento. O tipo de regras é definido como segue: Se P1 e P2 e Pg..., então C1 e C2 e Cg...

Por exemplo, alguma das regras para diagnóstico de defeitos foram:

Se $C_2H_2/C_2H_4 < 0,1$ e $CH_4/H_2 < 1$ e $C_2H_2/C_2H_6 < 1$, então a natureza do defeito será sobreaquecimento.

Se $C_2H_2/C_2H < 0,1$ e $CH_4/H_2 > 1$ e $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 3$, então a natureza do defeito será sobreaquecimento (temperatura média).

Dessa forma, segundo os autores o SE foi usado com sucesso para diagnosticar as condições de isolamento nos transformadores de potência.

KUMBAHAT et al. (1992) apresentaram um novo algoritmo para monitoramento *on-line* de transformadores de potência, baseado na lógica. Os diferentes valores dos parâmetros a ser monitorados (temperatura máxima do óleo, temperatura dos pontos quentes, concentração de H_2 no óleo, e outros), foram divididos em níveis lingüísticos com uma dependência funcional associada a cada nível. Os autores escreveram as regras baseando-se no conhecimento e perícia dos especialistas.

As regras foram escritas usando variáveis lingüísticas como representação de conhecimento, visto que a maioria do conhecimento adquirido dos peritos pode ser expressa em termos de níveis lingüísticos. A essas regras foi associado um peso que proporciona uma precedência de uma regra sobre outra. Esse sistema fornece uma indicação imediata da gravidade da falha. O sistema de monitoramento de transformadores baseado na lógica Fuzzy, segundo os autores é mais apropriado para as situações nas quais o valor individual de cada parâmetro poderia encontrar-se na zona segura, mas o efeito combinado de alguns valores é perigoso para a segurança do sistema.

Para construir o sistema Fuzzy, KUMBAHAT et al. (1992) utilizaram uma ferramenta de *software* denominada CUBICALC desenvolvida pela Hyperlogic Corporation. Segundo os autores, a efetividade do sistema proposto para o

monitoramento de transformadores ficou demonstrada na prática, o índice de severidade obtido foi indicativo de gravidade das falhas, permitindo também orientar as ações a serem tomadas.

LIN et al. (1993) desenvolveram um protótipo de Sistema Especialista baseado na técnica de Análise de Gases Dissolvidos (DGA) para diagnóstico de falha de transformadores, implementa critérios da razão de gases propostos por Dornenburg, IEC e Rogers. As incertezas decorrentes do critério foram tratadas com lógica Fuzzy. Para representar a base de conhecimento foi utilizada a ferramenta KES pelo fato de apresentar efetiva interface com linguagens de programação inteligente tais como Prolog e LISP. Segundo os autores o sistema especialista proposto, quando testado, demonstrou ser efetivo para o diagnóstico de transformadores.

PING e SHIRENG (1993) desenvolveram um sistema especialista para o diagnóstico de falhas para determinar o nível de segurança operacional dos transformadores de potência, com dados obtidos nos ensaios elétricos aplicados nos mesmos .

Os autores desenvolveram o protótipo do sistema especialista na linguagem Prolog, com dados obtidos nos ensaios elétricos realizados nos transformadores no campo. Segundo eles, as principais dificuldades para construir um sistema inteligente sofisticado surgem da imprecisão das informações sobre falhas, a inexatidão das regras de inferência, a complexidade para representar o conhecimento dos especialistas e o processo de inferência. Neste trabalho, as informações dos ensaios foram representadas por conjuntos difusos obtidos da operação das regras. Para representar o conhecimento dos especialistas foram adotadas regras de produção com um certo fator de confiança e dentro do raciocínio inexato do SE foi introduzida uma abordagem de inferência difusa baseada na teoria sintética de julgamento. Um mecanismo de inferência complexo usando estratégia de procura em profundidade foi utilizado

com sucesso neste sistema.

PURKAIT et al. (2000) propuseram um sistema especialista chamado TIFDES para assistir os especialistas na emissão de diagnósticos de falhas durante ensaios de impulso aplicados a transformadores de potência. Para esse fim compilaram um jogo de regras heurísticas de diagnósticos de falhas por meio de consultas efetuadas às normas, à literatura e aos especialistas. Segundo os autores, isto garante que o sistema detecte uma falha com alto grau de confiança.

As regras foram codificadas em algoritmos para computadores e armazenados na base de conhecimento do sistema inteligente. O motor de inferência combina as regras heurísticas da base de regras junto com os métodos matemáticos e estatísticos do sistema inteligente para atuar sobre os dados adquiridos e armazenados na base de dados. Então, o motor de inferência simula o comportamento do especialista nesses ensaios.

DENGHUA (2000) destaca que embora existam diferentes métodos para identificar as condições de falhas de transformadores, tais como a análise de gases dissolvidos (DGA), a análise acústica para descargas parciais, a cromatografia líquida e a técnica de função de transferência, a maioria dos pesquisadores aplica apenas um único método no monitoramento de transformadores e eles falham ao combinar todas as informações dos diferentes métodos. Desta forma, DENGHUA (2000) estabeleceu um protótipo no qual integrou diferentes métodos de diagnóstico para a análise de gases dissolvidos e informações vindas do sistema de monitoramento (temperatura dos enrolamentos, corrente, descargas parciais, e outros), utilizando lógica Fuzzy e SE. O sistema utiliza lógica Fuzzy para estabelecer a função de relação entre diferentes informações (dados) provenientes dos transformadores que estão sendo monitorados. Outros valores são obtidos diretamente a partir da experiência dos especialistas, que posteriormente são integrados utilizando a teoria de matriz difusa. O autor afirma que um protótipo assim desenvolvido

otimiza as técnicas de processamento.

WANG et al. (2000) desenvolveram um sistema combinado de Rede Neural Artificial (RNA) e sistemas especialistas (SE), designado como ANNEPS, para o diagnóstico de falhas de transformadores usando a análise de gás dissolvido no óleo (DGA). Esse sistema aproveita as características positivas de cada método e oferece um refinamento adicional das técnicas atuais. As técnicas incluem o método convencional do gás chave e do coeficiente.

A base de conhecimento do sistema especialista é derivada dos critérios de diagnósticos para análise de gases dissolvidos das normas IEEE e IEC, assim como da experiência dos especialistas para incluir a maior quantidade de regras de diagnóstico conhecidas possíveis.

No trabalho de WANG et al. (2000) a combinação das saídas da RNA e do SE possui um mecanismo de otimização para garantir alta precisão no diagnóstico. Os autores introduziram um novo avanço na identificação da localização de falhas através do uso da análise de regressão logística e a rede neural. Eles comprovaram que é possível não apenas diagnosticar os tipos de falhas, mas também prognosticar a localização da falha. O diagnóstico final de saída também fornece ações e recomendações para a manutenção.

JUNQUEIRA et al. (2001) desenvolveram um sistema especialista que recebe as informações de um sistema de monitoramento de disjuntores e transformadores. O sistema de monitoramento auxilia o sistema especialista nas avaliações preditivas, favorecendo o gerenciamento coordenado e planejado da manutenção e da operação.

Os autores propuseram uma estrutura separada em dois módulos: Módulo 1, para as grandezas *on-line* e Módulo 2, para as grandezas *off-line* que são incorporados ao módulo de aquisição de conhecimentos do sistema especialista em forma de "fatos" (informações estáticas ou dinâmicas incondicionais sobre o

processo). O sistema especialista que incorpora os módulos 1 e 2 é acionado de três maneiras: pelo especialista humano, pelo sistema *on-line* e pelo sistema *off-line*.

No módulo interface homem-máquina, o relatório com diagnóstico preliminar é analisado pelo especialista que faz inferências no banco corporativo. Nesta parte são consultados: ensaios elétricos, históricos de deslocamentos, datas de energização e desligamento, carregamentos, ocorrências com o transformador ou com a subestação, alimentadores, manutenções preventivas ou corretivas efetuadas, cromatografia líquida, eventuais problemas com equipamentos similares, reparos em fábrica, ensaios físico-químicos do óleo isolante, particularidades do local de instalação do transformador e quaisquer outras informações que o especialista julgar necessárias.

A proposta consta de dois programas: GASCRO, que opera usando os dados de análise cromatográfica do óleo mineral isolante para o diagnóstico do transformador, com relação ao incremento dos gases chaves por meio de um Sistema Especialista elaborado usando *Visual Basic Scripting Language*, que trata os dados baseado não unicamente na comparação das variáveis, mas também associadas a uma distribuição de pertinência por lógica Fuzzy. Segundo os autores, este *software* tem a habilidade de detectar pequenas mudanças no processo normal de degradação na unidade no estágio inicial antes que as falhas aconteçam. O *software* possui implementados os seguintes critérios: IEC/IEEE, PUGH, ROGERS e LABORELEC. Escolhidos os critérios, o usuário pode "disparar" as rotinas de processamento do sistema especialista. No diagnóstico do equipamento, o *software* analisa os níveis dos gases dissolvidos no óleo isolante, suas taxas de crescimento em relação a amostra passada, as porcentagens relativas dos gases mais relevantes, total de gases combustíveis, e outros. Os dados resultantes são submetidos aos algoritmos que realizam efetivamente os diagnósticos.

O segundo programa, SAGTR, consiste num SE que opera com dados oriundos do sistema de monitoramento *on-line* diretamente dos transformadores, calculando medidas virtuais, previsões e tendências. Esses dados calculados são usados em um conjunto de regras que podem indicar o estado do processo de envelhecimento de algumas partes do transformador (comutador de derivações, enrolamentos, isolamentos dos envolventes, óleo isolante, e outros) e adverte sobre possíveis situações de emergência no futuro que demandarão intervenção do usuário para uma manutenção preventiva.

Os procedimentos de análises avaliam o envelhecimento da unidade, prognosticando situações de defeitos e falhas incipientes. Segundo os autores, este Sistema de Monitoramento proverá melhor coordenação da manutenção, gestão vitalícia e planejamento da manutenção, reduzindo o número de interrupções não programadas e proporcionando intervenções menos onerosas para a recuperação do equipamento.

DA SILVA et al. (2001) desenvolveram metodologias alternativas para estimar o grau de envelhecimento relativo de transformadores, tendo como base os resultados provenientes de análises físico-químicas efetuadas no óleo mineral isolante do equipamento. A partir dessas análises estima-se o grau de envelhecimento dos transformadores através de abordagens que combinam Redes Neurais Artificiais e sistemas de inferência nebulosa. Uma análise dos resultados obtidos pelas abordagens propostas é executada para conferir a validade da metodologia utilizada. Nesse trabalho, as variáveis de cada vetor de entrada do sistema de inferência nebulosa e das Redes Neurais Artificiais foram definidas pelas grandezas que indicam os teores e índices dos produtos que influenciam diretamente no envelhecimento do transformador, ou seja, aqueles que causam a degradação do papel e do óleo isolante: teor de 2-Furfuraldeído presentes no óleo (ppm), tensão Interfacial (TI) das moléculas do óleo (dyn/cm) e Índice de acidez (IA) do óleo (mgKOH/g).

A variável de saída dos sistemas neural e nebuloso sempre é o Grau de Envelhecimento Relativo (GER), que devido a um processo de normalização fica dentro do domínio $[0,1]$, sendo que quanto maior o GER maior será o envelhecimento relativo de cada transformador.

A abordagem nebulosa desenvolvida se justifica segundo autores, pela maior eficiência computacional, representação do conhecimento mais compacta e a garantia de continuidade de saída do sistema. Para ajustar o sistema nebuloso de maneira a relacionar adequadamente as variáveis de entrada com as saídas foi utilizado o método ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*).

Analisando as respostas obtidas, os autores comprovaram que o teor de 2-furfuraldeído exerce influência significativa no envelhecimento dos transformadores quando comparada Figura com a influência dos demais parâmetros.

FARROKHI e RAFIEE (2001) desenvolveram um método baseado em Redes Neurais Artificial para avaliar e verificar transformadores de potência a partir dos dados obtidos de ensaios práticos. Os autores demonstraram que as redes neurais são capazes de avaliar o desempenho de transformadores de potência. Embora a simulação tenha sido realizada em transformadores de distribuição de 100 kVA, 20 kV/400V, a RNA pode ser aplicada para qualquer transformador de potência. Já que vários transformadores de potência têm diferentes faixas de valores para a quantificação usada para a avaliação, foi necessário o treinamento apropriado da rede neural para cada família de transformadores de potência.

Os autores sugeriram a utilização de uma rede neural hierárquica que consiste em várias sub-redes, cada uma para uma categoria de transformador de potência.

SUÑÉ (2001) apontou que na interpretação dos valores obtidos nos

ensaios cromatográficos de gases dissolvidos em óleo isolante, alguns dos critérios utilizados não emitem diagnóstico para determinada combinação de valores de entrada. Então o autor propôs, utilizando a Teoria de Conjuntos Aproximados, expandir a tabela de diagnósticos dos métodos Rogers e NBR, eliminando as "falhas" que segundo ele existe nesses métodos. Nessa tabela expandida, os casos de diagnósticos múltiplos foram eliminados com a utilização do critério de gas-chave, tratado com técnicas de conjuntos difusos.

LIAO et al. (2001) desenvolveram um Sistema Especialista baseando-se numa nova base de conhecimento para projetar um protótipo de quadro negro para os diagnósticos de falhas em transformadores. A base de conhecimento deste sistema especialista combina Redes Neurais Artificiais, lógica Fuzzy, utilizando o método de análise de gases dissolvidos proposto pela norma IEC, e a experiência dos especialistas, que representam a porção principal dos diagnósticos de falhas. A base de conhecimento é mostrada na Figura 2.2.

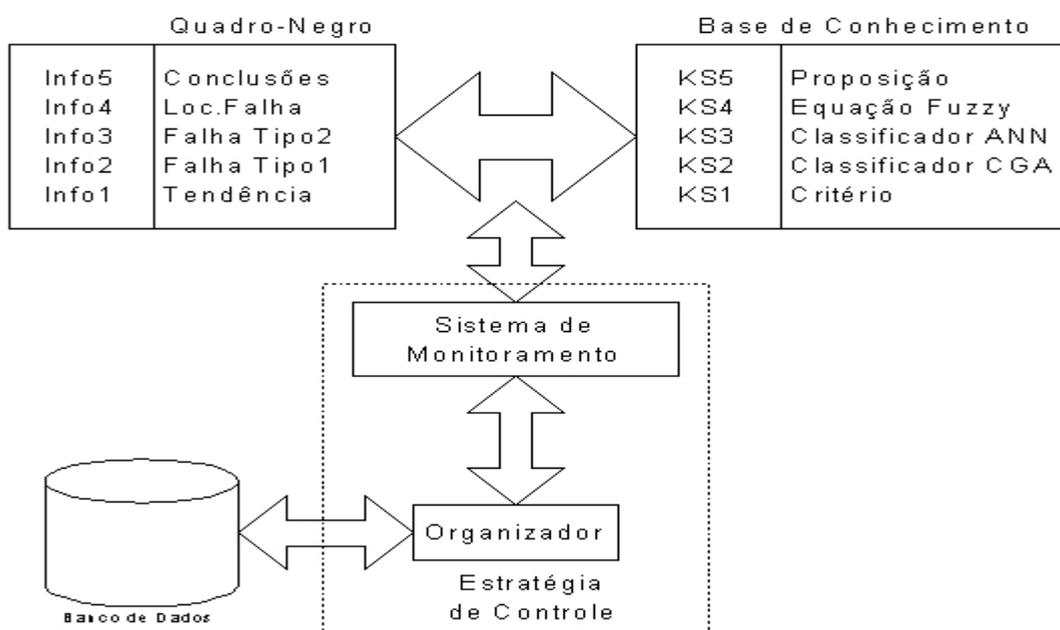


Figura 2.2 Base de Conhecimento (LIAO et al., 2001)

AHMAD e YAACOB (2002) desenvolveram um SE para emissão de diagnóstico de falhas em transformadores de potência segundo os critérios da IEC (*International Electrotechnical Commission*), CEGB (*Central Electric Board*) e CSUS (*California State University-Sacramento*). O *software* utilizado por eles para a tomada de decisões chama-se Exsys Corvid. Segundo os autores este SE, fornece ao usuário informações pertinentes às condições de operação dos transformadores e recomendações a serem tomadas antes que a falha ocorra.

Um dos inconvenientes das relações de gases dos métodos IEC e CEGB é que são apresentados em forma de números significativos da Análise de Gases Dissolvidos (DGA). Se os resultados obtidos caem dentro do código proposto, um único diagnóstico pode ser efetuado, enquanto que, com o sistema especialista, as equações matemáticas podem dividi-lo em duas partes. Na prática o sobreaquecimento é associado a uma única falha, mas usando o sistema especialista pode ser categorizado dentro de duas diferentes condições; primeiro pode ser devido ao sobreaquecimento local e segundo a um severo aquecimento.

Com o sistema especialista os autores detectaram em torno de 70% a mais de falhas geradas por arco em comparação à prática convencional, isto é sem utilização de técnicas de IA, onze casos de sobreaquecimento contra nove ou oito detectados na prática convencional e cinco casos de corona contra quatro. Entretanto, os autores advertem sobre uma das limitações do Exsys Corvid, o fato de estar disponível apenas para detecção *on-line*, não sendo possível imprimir ou exibir os resultados.

Além dos trabalhos analisados aqui, outras aplicações interessantes no setor elétrico utilizando SE foram propostas por MOKOHTARI, SINGH et al. (1988), MISEGUSHI (1995), RAYUDU, MAHARAJ et al. (2001), SARTOR (2002) e DE ALMEIDA (2003).

Como constatado da análise dos principais trabalhos correlatos e de acordo ao resumo apresentado na Tabela 2.1, existem aspectos que ainda precisam ser melhorados, como ser:

- Implementar uma maior quantidade de critérios ou métodos de diagnósticos de falhas incipientes.
- Utilizar o conhecimento e experiência dos especialistas (HEURÍSTICA) para confirmar a emissão dos diagnósticos emitidos segundo os critérios.

AUTOR(ES)	ANO	CRITÉRIOS	TÉCNICAS
Yan et. al.	1991	IEC e HEURÍSTICA	SE
Lin et. al.	1993	DORNEMBURG, IEC e ROGERS	SE e L. FUZZY
Wang et. al.	2000	IEEE e IEC	SE e RNA
Junqueira et. al.	2001	PUGH, ROGERS, LABORELEC e IEC	SE e RNA
Liao et. al	2001	IEC e HEURÍSTICA	SE, RNA e FUZZY

Tabela 2.1 Trabalhos utilizando DGA com técnicas de IA

Assim a exemplo da análise feita por THANG et al. (2000), os enfoques de IA disponíveis requerem para seu desenvolvimento, dos registros de DGA com as falhas reais observadas ou os diagnósticos de falhas por meio dos métodos convencionais. Entretanto, a aquisição dos registros de DGA e das falhas reais observadas nos transformadores é muito difícil, já que desligar um transformador em particular para confirmar uma suspeita de falha acarretaria um custo muito alto e inspecioná-lo após a ocorrência da falha, em geral torna-se impossível dependendo da gravidade da mesma.

Portanto, nem o enfoque por RNA e nem aqueles por SE e Lógica Fuzzy são capazes de detectar todas as falhas incipientes (defeitos) por não contar com uma boa amostra de falhas para seu treinamento, no primeiro caso, e por depender dos registros de DGA e os métodos de interpretação convencionais que levarão contidas deficiências inerentes a estes métodos, no outro caso.

Nesse sentido, nesta proposta foi desenvolvido o protótipo de um SE que implementa sete dos principais critérios consolidados internacionalmente, utilizados para a emissão dos diagnósticos. Os mesmos são confirmados com o conhecimento e a experiência dos especialistas implementado na forma de regras de inferência, para a emissão dos diagnósticos complementares de falha incipiente nos transformadores. O SE acessa todas as informações contidas na Base de Conhecimento modelada na forma de ontologia, onde se encontram armazenados os dados processados pelo motor de inferência do SE, bem como outras informações referentes aos transformadores, necessárias para a emissão dos relatórios.

3 - TRANSFORMADORES

Os transformadores são uns dos equipamentos chave dos sistemas de potência e o seu estado de operação está diretamente relacionado com a confiabilidade e estabilidade dos sistemas de potência (WENSHENG et al., 1998).

Os fundamentos teóricos utilizados neste capítulo foram baseadas em SEALEY (1948) e GOURISHANKAR (1990).

3.1 Definição

Um transformador é uma máquina elétrica, sem partes móveis, que por meio de indução eletromagnética transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primários) para outros circuitos (secundários, terciários), mantendo a mesma frequência, podendo haver alteração dos valores de tensão e corrente.

3.2 Aplicações

Algumas aplicações dos transformadores são:

- Elevação e abaixamento dos níveis de tensão e corrente em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia;
- isolamento de circuitos com altas tensões e/ou altas correntes para que se possa medi-las, bem como para a proteção de sistemas;
- alimentação de diversos equipamentos com tensões diferentes, a partir de uma única tensão de alimentação. Caso típico de instalações para telecomunicações e serviços auxiliares em subestações;
- controle e sinalização;
- isolamento de circuitos, porém com mesmo nível de tensão;
- alimentação de lâmpadas de descarga como as fluorescentes e/ou vapor de mercúrio;
- operação de campainhas e alarmes;

- alimentação de pontes conversoras.

De maneira geral encontram-se múltiplas aplicações e, para cada uma, tem-se um tipo diferente de transformador. O princípio de funcionamento mantém-se o mesmo para cada tipo.

3.3 Classificação

Não há classificação normalizada dos transformadores, porém, do ponto de vista técnico, podem ser classificados segundo:

- **O número de fases:** Monofásicos ou polifásicos (em geral, trifásicos).
- **O tipo do núcleo:** Os mais utilizados são:
 - **Núcleo envolvido ou Tipo Núcleo (*Core Type*):** Utilizado para altas tensões, as quais requerem muitas espiras da bobina e bom isolamento. Caracteriza-se por correntes relativamente baixas e pequeno fluxo magnético.
 - **Núcleo envolvente ou Encouraçado (*Shell Type*):** Usados em transformadores com tensões baixas, onde há poucas espiras, baixo isolamento, elevadas correntes, altas frequências e fluxos magnéticos.
- **O tipo de aplicação:** Os principais são: Transformadores de instrumentos, Transformadores a Corrente Constante, Transformador Série, Transformadores de Pequena Potência, Transformadores de comando e sinalização, Transformadores para operação de campainhas e alarmes, Transformadores para lâmpadas de descarga, Transformadores de Isolamento, Transformadores de aterramento e os Transformadores de Potência, sendo este último abordado neste trabalho.

Os transformadores de potência são utilizados normalmente em subestações redutoras e elevadoras de tensão, assim como nas casas de força

das usinas geradoras de energia elétrica. Podem ser considerados como transformadores de força, aqueles com potência nominal igual ou superior a 500 kVA;

Atualmente na maioria das aplicações dos transformadores de potência, a parte ativa está submersa em óleo mineral, que desempenha ao mesmo tempo a função de meio isolante e refrigerante. O óleo junto ao papel constituem os materiais isolantes mais importantes. Na seqüência são apresentadas algumas das características desses materiais de acordo a NBR-7274 (1982), MILASCH (1984) e GCOI (1986).

3.4 Isolante Sólido - Papel

O papel está presente no transformador como parte do isolamento sólido, principalmente no enrolamento, assim como no revestimento das conexões e barreiras. Atualmente é utilizado o papel Kraft termoestabilizado, cujas principais características são a alta resistência mecânica e a durabilidade química, apresentando maior estabilidade térmica e menor possibilidade de formação de água quando comparado ao papel Kraft convencional.

3.4.1 Degradação do Papel

A degradação do material celulósico produz dióxido de carbono, monóxido de carbono e outros gases em menores quantidades, podendo ser classificada em:

- Térmica: Quando é causada por variações da temperatura, sendo que neste caso os produtos formados são: glucose livre, água, óxidos de carbono (CO e CO₂) e ácidos orgânicos.
- Hidrolítica: É catalisada pela presença de um ácido ou pela acidez do

meio, que propicia a formação de glucose livre.

- Oxidativa: é devida à presença de oxigênio e outros agentes oxidantes e neste caso são formados ácidos, aldeídos e água.

3.5 Isolante Líquido - Óleo Mineral

3.5.1 Generalidades

No setor elétrico, o óleo mineral destaca-se pela sua ampla utilização em equipamentos como transformadores, disjuntores, chaves, cabos elétricos, capacitores e outros. Este material tem dupla função, sendo que como isolante evita a formação de arco entre dois condutores do equipamento; e como refrigerante dissipa o calor originado da operação do equipamento.

O primeiro óleo mineral a ser usado como líquido isolante foi o óleo parafínico, sendo utilizado no período de 1900 à 1925 aproximadamente como um óleo isolante de uso geral. No entanto, o óleo mineral utilizado atualmente é o naftênico.

3.5.2 Natureza e Principais Componentes

O óleo mineral isolante utilizado em aparelhos elétricos é extraído do petróleo. Sua composição e características dependem da base da qual foi extraído e do processo empregado em sua preparação.

O petróleo cru pode ser de base parafínica, cujo produto final da destilação é a cera parafínica ou de base naftênica, cujos produtos finais da destilação são de natureza asfáltica. Sabe-se que só 3% do petróleo disponível é de base naftênica. O óleo isolante originado do petróleo de base parafínica é chamado de óleo parafínico e o originado do petróleo naftênico, óleo naftênico.

As fontes de petróleo naftênico estão se tornando cada vez mais escassas, o que torna a utilização do óleo parafínico cada vez mais imperiosa. Tal fato motivou a realização de pesquisas para se obter um óleo parafínico com características apropriadas para ser utilizado em aparelhos elétricos.

O óleo mineral isolante é constituído de uma mistura de hidrocarbonetos com peso molecular médio da ordem de 300, em sua maioria, e de não hidrocarbonetos, também chamados de heterocompostos, em pequena proporção, contendo ainda impurezas como compostos de enxofre (S), nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂).

3.5.3 Características

O óleo isolante deve apresentar as seguintes características fundamentais:

Boa Condutibilidade Térmica: para facilitar a transferência de calor dos componentes internos para o meio.

Boas Características de Isolamento Elétrico: isento de umidade e de contaminantes (especialmente os polares).

Boa Estabilidade Térmica: elevada resistência à oxidação e à formação de ácidos e borra que ocorrem, principalmente quando a temperatura do óleo se eleva.

Baixa Reatividade Química: composição química estável, para que não danifique os materiais em contato.

Baixa Viscosidade: garante uma rápida circulação. Para equipamentos em ambientes de baixa temperatura, é fundamental que o óleo mantenha sua fluidez nessas condições; daí a exigência de um baixo ponto de fluidez.

Pode-se observar que o material a ser empregado deve atender a duas

exigências opostas, isto é, os materiais isolantes elétricos são também isolantes térmicos.

3.6 Indicadores de Desempenho

Vários são os indicadores de desempenho dos transformadores de potência. Os mais importantes constituem os parâmetros adquiridos pelos sistemas de monitoramento *on-line*, assim como as variáveis adquiridas de forma *off-line*, sendo destacados os resultados dos ensaios físico-químicos e da análise de gás cromatografia do óleo isolante, utilizados para a implementação do sistema proposto neste trabalho.

3.6.1 Ensaios Físico-químicos

Os ensaios físico-químicos mais importantes são detalhados a seguir:

- **Ponto de anilina:** É a temperatura na qual ocorre a mistura homogênea do óleo isolante com anilina, aquecidos sob agitação.

Este ensaio identifica o teor de aromáticos leves no óleo. Os hidrocarbonetos aromáticos leves são facilmente oxidados nas condições de operação dos transformadores. Um teor elevado de hidrocarbonetos aromáticos (ponto de anilina baixo) poderia provocar uma rápida oxidação da massa de óleo, por outro lado, os compostos aromáticos leves atuam como inibidores naturais, quando presentes em pequenas quantidades, por isso um limite superior do ponto de anilina é desejável para garantir que o produto possua aromáticos leves capazes de inibir o processo de oxidação dos demais hidrocarbonetos.

Cor: Os hidrocarbonetos que constituem o óleo são incolores. Assim, quanto melhor for o processo de refino, mais clara será a cor do produto final.

Este ensaio consiste em comparar a cor de uma amostra do óleo com uma

série de padrões de cores predefinidas.

- **Ponto de Fulgor:** É a temperatura do óleo na qual ocorre a inflamação dos gases desprendidos pelo aquecimento. Reflete a quantidade de compostos voláteis presentes na amostra de óleo.

O ensaio de Ponto de Fulgor (*Vaso Cleveland*) consiste em aquecer o óleo isolante e simultaneamente, expô-lo a ação de uma chama próxima a superfície do produto. Com o aquecimento, os compostos voláteis presentes no óleo irão vaporizar até que inflamem sob a ação da chama. A temperatura em que ocorre a chama (*Flash*) é tomada como o Ponto de Fulgor. Assim, pode concluir-se que este ensaio é uma determinação indireta da quantidade de compostos voláteis presentes na amostra de óleo. Quanto maior for o teor de voláteis, menor será o Ponto de Fulgor.

- **Ponto de Fluidez:** Este ensaio consiste em resfriar uma amostra do óleo isolante até que cesse seu escoamento pela ação da gravidade. A temperatura em Célsius em que isto ocorre é tomada como o Ponto de Fluidez. Os hidrocarbonetos de alto peso molecular e cadeia reta são os mais sensíveis à diminuição da temperatura e, portanto, quanto maior for o teor destes compostos na amostra, mais elevado será o Ponto de Fluidez.

- **Viscosidade:** É a propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao cisalhamento. A viscosidade do óleo isolante é um fator predominante para a refrigeração dos equipamentos.

- **Tensão interfacial:** Revela o estado de contaminação do óleo (pureza). Colocando uma camada de óleo isolante sobre a água; a tensão interfacial é a força necessária para fazer com que um anel de platina passe da camada de água para o óleo.

A tensão interfacial é a tensão na interface óleo-água, pois, tanto a água como o óleo possuem suas próprias interações intermoleculares e o ensaio relaciona-se com a isolação térmica, refrigeração, processo de refino, contaminação e deterioração.

O ensaio detecta contaminantes polares no óleo, solúveis em água e produtos de oxidação, tais como ácidos, peróxidos, álcool, etc. Valores baixos de tensão interfacial indica processo de refino deficiente, contaminação e/ou deterioração, e iminente formação de borra (se menor que 20 dinas). Um dos cuidados da manutenção é o controle de estado da sílica-gel, pois quanto menor a tensão interfacial do óleo, mais fácil a “entrada” da água nesse óleo, facilitando a dissolução do ácido dando maior poder de reação.

Este ensaio é feito colocando-se uma camada de óleo isolante sobre uma camada de água e, em seguida, fazendo-se um anel de platina imerso na água passar para a camada de óleo. A força necessária para fazer com que o anel rompa a superfície da água é tomada como a Tensão Interfacial Óleo/Água. A água é o óxido de hidrogênio, portanto, um material altamente oxigenado e de elevada polaridade molecular. Os hidrocarbonetos, por outro lado, são substâncias de muito baixa polaridade em sua molécula e não oxigenadas. Assim, quanto mais puro for o óleo, menor será sua interação com a camada de água e mais alto será o valor obtido para o ensaio.

- **Rigidez dielétrica:** É a medida da capacidade do isolante de resistir ao campo elétrico aplicado. Revela também a presença de impurezas polares como a água e outros oxigenados e sólidos (partículas microscópicas).

Este ensaio consiste em colocar uma amostra de óleo entre dois eletrodos padronizados e submetê-la a incrementos gradativos de tensão alternada até a ruptura do meio isolante e a conseqüente descarga entre os eletrodos. Os hidrocarbonetos que compõem o óleo isolante, por apresentarem polaridade

elétrica muito baixa, possuem uma Rigidez Dielétrica “intrínseca” extremamente elevada. Esta resistência ao impacto é sensivelmente diminuída pela presença de impurezas polares, como a água e outros oxigenados, e sólidas, como partículas microscópicas. Portanto, este ensaio objetiva verificar a pureza do produto e por conseguinte, a qualidade do processo de fabricação, transporte e manuseio.

Para esse ensaio, encontram-se dois tipos de eletrodos mais usados: eletrodos de disco e eletrodos de calota, sendo que as distâncias entre eles são definidas pelas normas.

- **Tangente delta a 90 °C:** A definição é baseada na defasagem existente entre a corrente superficial e a tensão aplicada. Essa defasagem é caracterizado como capacitivo, sendo 90° quando as perdas forem zero, num caso ideal sem resistência.

Neste ensaio, a amostra é colocada entre os dois eletrodos de um capacitor e em seguida é aplicada uma tensão constante a uma temperatura fixa. A leitura obtida no aparelho utilizado é tomada como o fator de Perdas Dielétricas. Como no caso anterior, a perda é intrínseca aos hidrocarbonetos, sendo extremamente baixo e alterado pela presença de impurezas. Neste caso, por ser um ensaio executado em condições de equilíbrio é sensível também às impurezas solúveis, que não interferem na Rigidez Dielétrica.

- **Estabilidade da oxidação:** determina a estabilidade química da amostra em estudo. Ao longo do tempo compromete o rendimento do equipamento, devido à acumulação de resíduos da oxidação do óleo (borra), que impede o fluxo térmico (superaquecimento).

Neste ensaio, a amostra de óleo é submetida a aquecimento a 100 °C, com borbulhamento de oxigênio e em presença de catalisador de cobre. Depois de 7 dias (164 horas) a amostra é retirada do sistema e determina-se o seu teor de borra e índice de acidez. A borra é um produto da oxidação dos hidrocarbonetos.

Também os produtos ácidos determinados pelo índice de acidez são resultantes da sua oxidação. Este ensaio visa, portanto, avaliar a estabilidade química da amostra em estudo.

É muito importante observar que este ensaio não guarda nenhuma relação com o processo real de oxidação do isolante no transformador. Trata-se apenas de uma medida da qualidade de fabricação do produto e indica uma tendência à oxidação mais rápida ou mais lenta.

- **Enxofre livre e corrosivo:** tem por objetivo verificar a eficiência da remoção dos compostos de enxofre durante o processo de refino.

É um ensaio simples que consiste em imergir uma pequena tira de cobre polida na amostra de óleo e, após submeter o conjunto a aquecimento sob atmosfera de Nitrogênio por 16 horas a 140 °C, deve ser observado o aparecimento de manchas negras de sulfeto de cobre na superfície da tira.

- **Teor de aditivo anti-oxidante:** o objetivo deste ensaio é verificar a presença e teor de aditivo anti-oxidante na amostra de óleo, por meios químicos.

Sua importância reside no fato de que um óleo isolante contendo este tipo de aditivo irá apresentar excelentes resultados no ensaio de Estabilidade à Oxidação, impedindo a verificação da real estabilidade química do produto original. No caso dos óleos adquiridos com este aditivo, é necessário verificar se o teor é aquele especificado por ocasião da compra. É de grande importância no caso de óleos regenerados, quando deve-se solicitar este ensaio no produto antes da sua aditivação para avaliar a qualidade do processo de regeneração. O teor de melhores resultados para óleos isolantes de boa qualidade está ao redor de 0,3%.

- **Teor de água**

Trata-se de um ensaio de caracterização e identificação do óleo e está

relacionado com isolamento térmica e contaminação. O ensaio detecta presença de água e indica a contaminação que prejudica as propriedades dielétricas do óleo, que apresenta assim tendências à oxidação. É afetado pela concentração de água dissolvida no óleo conforme abaixo :

- < 5 ppm de água não é afetada a Rigidez Dielétrica;
- 7 a 12 ppm de água a redução da Rigidez Dielétrica no óleo é maior;
- 12 a 23 ppm de água a redução da Rigidez Dielétrica no óleo é menor;
- > 23 ppm de água a redução da Rigidez Dielétrica no óleo é acentuada.

A água apresenta solubilidade muito baixa nos hidrocarbonetos, contudo, em óleos minerais novos, é solúvel até a faixa de 60 a 70 ppm/p. Acima destes teores encontra-se água em suspensão no óleo isolante. No caso dos óleos novos, este ensaio visa verificar a qualidade dos processos de fabricação, transporte e manuseio do produto.

- **Acidez:** Determina a quantidade total de compostos capazes de reagir com solução alcoólica de hidróxido de potássio

A presença de acidez no óleo inicia uma série de reações que tendem a atacar metais, celulosas, e outros. A determinação de acidez é feita pela neutralização do ácido com uma base, no caso o KOH (hidróxido de potássio), e é expresso em mg(KOH)/g de óleo. Quanto ao valor máximo de acidez recomendado para o óleo, embora as normas internacionais e nacionais recomendem um valor, muitas empresas de energia elétrica adotam seus próprios valores, que na maioria das vezes são valores menores que os recomendados pelas normas.

Outro ponto que merece destaque, principalmente para óleos usados e muito velhos, é a determinação de acidez livre, pois a sua presença implica num ataque mais efetivo junto aos materiais e metais que fazem parte da construção do equipamento. A acidez livre é a acidez inorgânica e se trata da acidez de

ácido forte e deve ser nula.

3.6.2 Análise de Gases Dissolvidos

A análise de gases dissolvidos (DGA) no óleo mineral isolante por cromatografia gasosa, é a técnica mais utilizada para monitorar o desempenho dos transformadores de potência (PUGH e WAGNER, 1961, DORNENBURG e STRITTMATER, 1974, DUKARM, 1993, COUDERC e BOURASSA, 1996, YANG e HUANG, 1998) assim como de outros equipamentos elétricos como reatores, reguladores, transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), buchas de alta tensão, e outros. A detecção de falhas incipientes (defeitos) na isolação óleo/papel pelo método de DGA é baseada no fato de que a quebra de isolação líquida e sólida sob condições térmicas e elétricas anormais fornecem uma variedade de substâncias voláteis e não voláteis resultantes da degradação (COUDERC e BOURASSA, 1996) que podem evoluir a falhas nos equipamentos.

Cromatógrafo é o nome dado ao equipamento utilizado para medir a concentração dos gases dissolvidos no óleo isolante, que é expressa em partes por milhão (ppm) volume/volume de óleo, medidas à temperatura de 23 °C. Daí, o nome do ensaio de cromatografia do gás.

Este ensaio é realizado em três etapas: 1) a amostra de óleo é coletada diretamente do equipamento em seringas de vidro; 2) no laboratório, a amostra é submetida a vácuo numa urna-câmara com agitação magnética onde são extraídos os gases dissolvidos no óleo e 3) os gases extraídos são injetados no cromatógrafo, onde são separados da mistura de gases em colunas específicas, seguidamente esses dados passam por um detetor que emite um sinal elétrico ao registrador gráfico, registrando na forma de picos. Desta forma os gases são identificados e quantificados, já que o tempo que o gás leva para aparecer no gráfico é característico, o que permite identificá-lo. A área do pico é

proporcional a concentração do gás.

Os gases normalmente detectados são: hidrogênio, metano, etileno, etano, acetileno e monóxido de carbono, que são chamados de gases combustíveis. Também são determinados oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono. Os valores obtidos ajudam a detecção de falhas incipientes (defeitos) e o acompanhamento do envelhecimento da isolação do transformador.

Os gases gerados por defeitos nos transformadores permanecem no óleo isolante, conforme uma concentração definida em função da pressão do sistema e a temperatura do óleo isolante. Na Tabela 3.1, são apresentados valores da concentração de solubilização de diversos gases no óleo isolante a 760 mmHg e 25°C.

GASES	CONCENTRAÇÃO DE SOLUBILIZAÇÃO
Hidrogênio	7.0 % volume
Nitrogênio	8.6 % volume
Monóxido de Carbono	9.0 % volume
Oxigênio	16.0 % volume
Metano	30.0 % volume
Hidróxido de carbono	120.0 % volume
Etano	280.0 % volume
Etileno	280.0 % volume
Acetileno	400.0 % volume

Tabela 3.1 Concentração de solubilização de gases (MILASCH, 1984)

Com o incremento da temperatura do óleo, alguns gases chegam a aumentar sua concentração de solubilização, como o hidrogênio, o nitrogênio, o

monóxido de carbono e o oxigênio; por sua vez, outros gases como o metano, o acetileno, o dióxido de carbono, o etileno e o etano diminuem a solubilidade.

Existem duas formas de detecção dos gases dissolvidos no óleo isolante, a primeira, e mais usual, trata-se da análise de maneira *off-line*, na qual o óleo é extraído do transformador e analisado em laboratório. Os cromatógrafos geralmente analisam nove gases, obtendo-se para cada gás os seguintes valores de sensibilidades em ppm (vol. de gás/vol. de óleo): Hidrogênio (H₂) 0,5; Oxigênio (O₂) 0,7; Nitrogênio (N₂) 1,0; Metano (CH₄) 2,0; Monóxido de carbono (CO) 3,0; Dióxido de carbono (CO₂) 3,0; Etileno (C₂H₄) 1,0; Etano (C₂H₆) 2,0 e Acetileno (C₂H₂) 3,0.

A segunda constitui-se na principal ferramenta dos sistemas de monitoramento *on-line*, que consiste na conexão do sensor de gases à válvula de dreno do transformador. Este tipo de sensor detecta geralmente os chamados gases chave: Hidrogênio (100% da concentração), Monóxido de carbono (18% da concentração), Etileno (1,5% da concentração), Acetileno (8% da concentração). Esse método, por não medir todos os gases, e não sendo expresso em ppm, serve como indicativo de anormalidade, ou tendência, surgindo a necessidade de ser complementado com a cromatografia *off-line*.

A interpretação dos resultados obtidos na análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante é uma arte (MILASCH, 1984); isto se reflete no fato de que cada empresa adota um ou mais métodos propostos para a emissão dos diagnósticos de falhas incipientes.

Inicialmente, os resultados da análise devem ser correlacionados com os resultados das análises anteriores do mesmo equipamento, verificando assim o incremento, ou taxa de evolução de cada gás. Além da concentração dos gases dissolvidos, calcula-se a concentração total dos mesmos, que podem ser combustíveis: CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ e C₂H₂, e não combustíveis: O₂, N₂ e

CO₂.

Também deve ser verificada a relação entre dióxido de carbono e monóxido de carbono (CO₂/CO), que conforme a norma IEC-60599, valores dessa relação entre 3 e 11, são indicativos de equipamentos livres de defeitos; proporções maiores que 11 ou menores do que 3 podem ser indicativos de alta temperatura nas proximidades da isolação de celulose.

E principalmente, devem ser analisadas as relações de gases de acordo com critérios disponíveis para emissão de diagnóstico de falhas, entre eles IEC/NBR, Rogers, Duval, Dörnemburg, Pugh, Laborelec, discutidos no Capítulo 4.

3.7 Transformadores Principais da Itaipu

3.7.1 Generalidades

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é um empreendimento binacional desenvolvido pelo Brasil e pelo Paraguai no Rio Paraná (ENGINEERING FEATURS ITAIPU, 1994). A potência instalada atualmente da usina é de 12.600 MW (megawatts), com 18 unidades geradoras de 700 MW cada, sendo 9 delas em 50 Hz e 9 em 60 Hz. Encontram-se atualmente em processo de instalação duas novas unidades geradoras, 9A (50 Hz) e 18A (60Hz); Itaipu passará então a ter uma capacidade instalada de 14.000 MW a partir de meados de 2004. A esse processo de geração encontra-se associado o processo de transformação por meio dos transformadores principais dos geradores.

Os transformadores principais dos geradores são utilizados para elevar a tensão de 18 kV na saída dos geradores à tensão nominal do sistema de transmissão de 500 kV a partir da Subestação Isolada a Gás (GIS), que interliga a Subestação da Margem Direita (SEMD), em 50 Hz. (Paraguai) e a Subestação Conversora de FURNAS em Foz de Iguaçu, em 60 Hz. (Brasil). Cada

transformador monofásico está instalado em um nicho de concreto à prova de explosão e incêndio, na galeria da jusante da cota 108,00m sobre o nível do mar. Dentro do nicho o transformador está montado sobre um poço que possui uma capa de brita de 1,10 m de profundidade com drenagem até os tanques de concreto na cota 90,00m, perto das unidades geradoras 3, 7, 10, 14 e 18. Cada nicho para transformador monofásico possui ventilação forçada e uma porta corta-fogo, na frente, com fechamento automático. O transformador possui um sistema de proteção contra incêndio principal por água nebulizada e um sistema de proteção secundário por CO₂.

3.7.2 Características Básicas

Os diferentes requisitos dos sistemas de 50 Hz e de 60 Hz resultaram em bancos de transformadores com diferentes potências nominais; sendo os de 50 Hz de 825 MVA e os de 60 Hz, 768 MVA. Em ambas as frequências os bancos são formados por três unidades monofásicas de polaridade subtrativa, com uma relação de transformação de 525 a 18 kV e derivações de carga de $\pm 2 \times 2.5\%$ sobre o lado neutro do enrolamento de alta tensão.

A parte ativa dos transformadores está submergida em óleo mineral isolante, com resfriamento por água (OFWF), cada um com quatro trocadores de calor óleo/água, um dos quais é redundante.

A elevação da temperatura do projeto é de 65 °C sobre a temperatura ambiente de 40 °C com a temperatura da água de resfriamento em 30 °C.

Na bucha de alta tensão (AT) estão instalados quatro transformadores de corrente para proteção, sendo dois deles do tipo linear, com relação de 2000-5A, e dois do tipo padrão com derivações múltiplas de 2000 até 3000-5A. As buchas de AT possuem dois transformadores de corrente para imagem térmica com relação de 3500-5A para as de 50 Hz e de 1200-2,5A para as unidades de 60

Hz. As duas buchas de baixa tensão não possuem transformadores de corrente.

Os transformadores elevadores dos geradores possuem um tanque de expansão de óleo (conservador), com uma membrana (em alguns casos bolsa) interna de borracha que impede o contato direto do óleo com o ar externo. Este conservador funciona como um pulmão para a dilatação térmica do óleo e possui um relé detetor de gás dissolvido do tipo Buchholz.

Os transformadores têm os indicadores usuais de nível de óleo, temperatura do óleo, temperatura dos enrolamentos e de circulação de água de resfriamento, com contatos de alarme e de disparo e das válvulas de alívio de pressão. O nível permissível de ruído previsto no projeto dos transformadores é de 85 dB.

3.7.3 Projeto e Fabricação dos Componentes

Apesar dos transformadores de 50 e de 60 Hz serem muito similares, a diferença na frequência e nas potências nominais resulta em pesos e dimensões muito diferentes.

A construção dos núcleos dos transformadores é do tipo "núcleo envolvido" com enrolamentos em ambos os braços. Os braços são enrolados com fita de fibra de vidro e as braçadeiras no núcleo são de aço, construídas para minimizar as perdas por correntes parasitas iniciadas na dispersão de fluxo da frequência básica e das harmônicas.

Um cilindro eletrostático é colocado entre o braço do núcleo e o enrolamento de baixa tensão (BT) para limitar a tensão transferida ao enrolamento de BT até um nível razoável quando o enrolamento de alta tensão (AT) é submetido a impulsos de tensão. Devido às pesadas correntes, o enrolamento BT é do tipo espiral com múltiplos condutores dispostos em paralelo.

A bucha de AT é conectada com o ponto médio do enrolamento de AT, e o neutro conduz aos extremos finais deste enrolamento. A otimização do transformador resultou da opção por um enrolamento de disco duplo intercalado, proporcionando a distribuição requerida de capacitâncias e tensões em série. As derivações de tensão são dispostas em cada metade do enrolamento.

O transformador tem dois comutadores de derivações sem carga montados verticalmente, um para cada metade do enrolamento.

O condutor do enrolamento está coberto por múltiplas camadas de papel isolante termicamente estabilizado. Entre as bobinas existem cilindros de papelão comprimido. Os condutores de AT são formados por eletrodos de cobre com papelão moldado, desde ambos os braços do enrolamento até a bucha.

A bucha de AT dos 54 transformadores, ora instalados na Itaipu são do tipo condensivo SF₆/óleo isolante, de tecnologia Papel Impregnado em Óleo (OIP), com capacidade nominal para 1550 kV. As buchas dos transformadores correspondentes a duas novas máquinas (9A e 18A) são de tecnologia Papel Impregnado em Resina (RIP).

O óleo de resfriamento é bombeado até o fundo dos enrolamentos, de onde flui até a parte superior. Defletores estrategicamente localizados dentro do tanque dirigem a circulação de óleo até os pontos potencialmente quentes para assegurar a uniformidade da temperatura de operação do enrolamento.

Ensaio de alta tensão foram realizados na fábrica usando uma configuração na qual a bucha SF₆/óleo do transformador foi montado como em serviço, junto com a sua câmara de conexão do gás SF₆. Sobre esta câmara, foi montada uma segunda bucha do tipo SF₆/ar, de tal maneira que tanto as partes em SF₆ quanto em óleo da bucha do transformador foram testadas juntas.

Para o ensaio de elevação de temperatura durante a operação (ensaio de

tipo), o transformador foi alimentado com corrente que correspondia à carga garantida, e para as unidades de 50 Hz com correntes harmônicas adicionais que simulavam o efeito da estação de conversão de corrente contínua de Furnas.

3.7.4 Desempenho de Operação e Manutenção

A seqüência de entrada em operação das unidades é apresentada na Tabela 3.2, na qual pode ser observado que a primeira está com quase 20 anos de operação e a última com quase 13 anos.

UNIDADES 50 Hz.	DATA	UNIDADES 60 Hz	DATA
01	19-03-84	10	31-08-89
02	27-12-84	11	28-06-89
03	20-08-85	12	02-02-89
04	17-12-85	13	09-09-88
05	04-05-87	14	15-12-86
06	16-07-87	15	11-11-86
07	23-10-87	16	07-06-90
08	23-02-88	17	09-01-91
09	14-07-88	18	08-04-91

Tabela 3.2 Entrada em operação dos geradores da IB (SOM, 1995)

Até 1990 ocorreu somente uma falha durante a operação. A falha de um enrolamento de AT em uma unidade de 50 Hz depois de 6 anos de operação. Isto resultou em uma descarga de óleo através da válvula de alívio de pressão e uma distorção do tanque junto com avarias nos enrolamentos. O transformador foi enviado à fábrica para pesquisa e reparo, mas a causa da falha não foi claramente estabelecida.

Na Tabela 3.3 é apresentada de uma forma seqüencial as falhas que

ocorreram com os transformadores principais desde a entrada em operação das primeiras máquinas geradoras até hoje.

LOCALIZAÇÃO	NÚMERO DE SÉRIE	DATA DA FALHA	ANO DE FABRICAÇÃO
TU 01, Fase R-50 Hz	500820	18/10/1987	1982
TU 11, Fase A-60 Hz	SP 15103	26/04/1990	1987
TU 17, Fase C-60 Hz	100296/4	26/04/1993	1989
TU 08, Fase T-50 Hz	500843	04/05/1997	1984
TU 07, Fase R-50 Hz	501857	12/07/2001	1993
TU 01, Fase R-50Hz	500820	10/11/2002	1982
TU 15, Fase B-60Hz	SP15090	20/06/2003	1982

Tabela 3.3 Falhas ocorridas nos Transformadores da Itaipu (SOM, 1995)

Da mesma forma, são apresentadas nas figuras 3.1 e 3.2, para efeito de comparação, as taxas de falhas dos transformadores principais da Itaipu, assim como as correspondentes aos transformadores do Brasil.

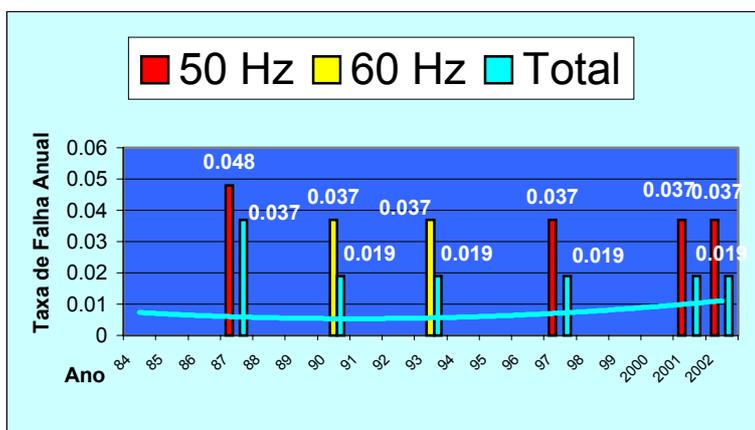


Figura 3.1 Taxa de Falha dos Transformadores da Itaipu, (PISA, 2003)

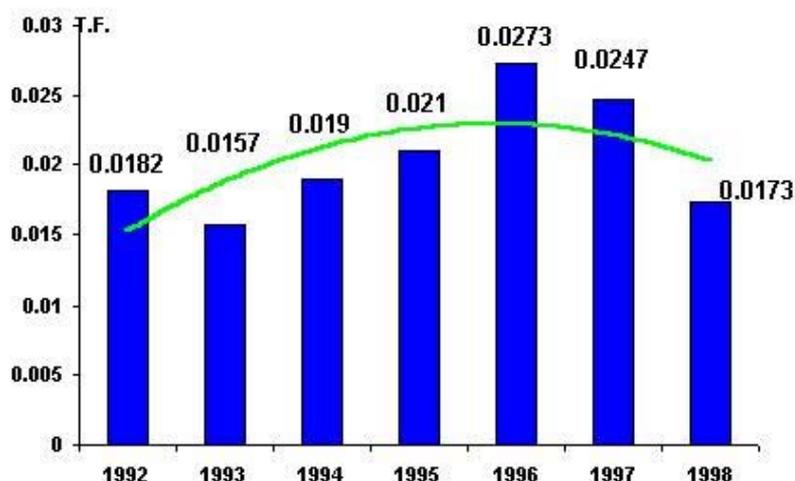


Figura 3.2 Taxa de Falha em Transformadores do Brasil, 92-98 (PISA, 2003)

Pode ser observado que a taxa de falha média nos transformadores de potência do setor elétrico brasileiro nesse período foi de 0,02 e a correspondente aos transformadores principais da Usina da Itaipu (50 e 60 Hz) é de 0,01. Destes valores conclui-se que, embora a taxa de falha dos transformadores da Itaipu seja 50% da média do Setor Elétrico brasileiro, devido à inércia do gerador, os transformadores de centrais hidrelétricas são mais afetados que outros e uma falha nos transformadores principais da Itaipu acarretaria graves conseqüências devido especialmente aos seguintes fatores:

- Estes transformadores desempenham um papel muito importante no sistema elétrico do Brasil e do Paraguay. A perda de uma grande capacidade de transformação de energia ocasionada pela falha de um transformador desses levaria a grandes problemas de estabilidade dos sistemas. Além dos prejuízos à qualidade de energia, estão envolvidos custos na recuperação (reparo em fábrica) ou compra de novos equipamentos e perdas devido ao lucro cessante, até a retomada da condição operativa normal.

- Os prazos necessários ao reparo em fábrica de um desses transformadores chegam a meses. Do mesmo modo, a compra de um

transformador novo pode envolver longos prazos. O mesmo se aplica também ao tempo necessário para a substituição desses transformadores e restabelecer a operação, que vai de uma a três semanas, dependendo do modelo.

- A sua localização é subterrânea e a parte ativa deles está imersa em óleo isolante. Portanto, falhas incipientes não detectadas em tempo hábil poderiam resultar em incêndios freqüentemente acompanhados de vazamento de óleo, com grandes perigos para as pessoas e o meio ambiente, assim como severas e incalculáveis conseqüências aos demais equipamentos e sistemas instalados na Casa de Força.

3.7.5 Sistema de Operação e Manutenção da Itaipu

O Sistema de Operação e Manutenção (SOM, 1995) é um método gerencial de normalização, planejamento, acompanhamento, controle e avaliação das atividades de operação e manutenção das áreas elétrica, mecânica e civil, com base nas modernas técnicas e processos consolidados a partir da experiência adquirida por empresas do setor elétrico e acumulada pela própria Itaipu Binacional.

O método baseia-se no controle permanente de equipamentos e estruturas, permitindo a detecção de qualquer alteração nas condições normais de operação antes que se transforme em falhas ou restrições operativas indesejáveis.

A seguir são definidos, de acordo com a Descrição Geral do SOM (1995), os tipos principais tipos de manutenção.

- **Manutenção Corretiva:** é toda manutenção realizada após a falha do equipamento, visando restabelecê-lo à sua função requerida. A manutenção corretiva pode ser subdividida em dois tipos: "paliativa", compreendendo intervenções do tipo retirada do estado de falha, a fim de colocar o equipamento, provisoriamente em estado de funcionamento antes da reparação; "curativa",

compreendendo intervenções tipo reparo de caráter definitivo a fim de restabelecer o equipamento à função requerida.

Geralmente a Manutenção Corretiva é aplicada como um "complemento residual" da Manutenção Preventiva. No SOM, a Manutenção Corretiva é classificada como manutenção de caráter "APERIÓDICO".

- **Manutenção Preventiva:** é toda manutenção realizada em um equipamento com a intenção de reduzir a probabilidade de falha. É uma intervenção prevista, preparada e programada antes da data provável do aparecimento da falha.

A Manutenção Preventiva poder ser subdividida em dois grupos: a "sistemática", que é a manutenção preventiva realizada conforme um quadro de programação preestabelecido em função do tempo ou do número de unidades de uso (horas de funcionamento, número de manobras, etc.) e a "não sistemática" que é a manutenção preventiva programada segundo o acompanhamento das características do estado do equipamento, levando em consideração valores predeterminados.

No SOM foi adotada a manutenção sistemática, sendo denominada Manutenção Preventiva Periódica e estabelecida a periodicidade das inspeções: trimestral, semestral, anual, bienal e quadrienal. A intervenção "Preventiva Não Sistemática" é considerada Manutenção "Aperiódica". Dentro do conceito de Manutenção Preventiva também encontram-se as Técnicas Preditivas, que são as atividades realizadas em um equipamento, sem indisponibilidade operativa, para predizer o ponto ótimo da manutenção.

3.7.6 Monitoramento de Transformadores

O sistema de monitoramento *on-line* de transformadores oferece grandes vantagens sobre a maioria dos métodos tradicionais de acompanhamento do estado operativo dos mesmos. No entanto, ainda exige um custo muito elevado

instalar um sistema de monitoramento e diagnóstico em cada equipamento da subestação, de forma que são reservados para os equipamentos críticos para a confiabilidade do sistema elétrico, como disjuntores e transformadores de potência (KENNEDY, 1999).

Os métodos mais importantes para avaliar o isolamento nos transformadores e diagnosticar falhas incipientes (defeitos) por monitoramento *on-line* dentre outros incluem descargas parciais (PD) e análises de DGA. Um dos maiores problemas com o monitoramento é a interpretação dos resultados em razão de não existir regras gerais que correlacionem as condições do transformador com as atividades de PD ou que as classifiquem (MARKS, 1999, WANG, 2000). O único parâmetro utilizável para este fim é um valor empírico do nível limite de PD (~300 pC). Este valor não parece ser de muita concordância por não pertencer a uma norma de padrão internacional e hoje existem empresas, como a Itaipu, que já adotam valores limite de 200 pC. No entanto, como apontado por PRADENAS (2003), é muito importante levar em consideração a forma em que evoluciona a descarga parcial durante os ensaios ou monitoramento e não apenas a grandeza medida ou valor numérico.

Atualmente se encontra em fase de implementação o sistema de monitoramento dos 54 transformadores principais das 18 unidades geradoras ora em operação na Usina Hidrelétrica da Itaipu. O sistema de monitoramento dos transformadores principais das novas unidades geradoras (9A e 18A) têm por finalidade a aquisição dos seguintes parâmetros (SIEMENS, 1992): gases dissolvidos no óleo com sensibilidade relativa à concentração de H₂ (100%), CO (18% ± 3,0%), C₂H₂ (8,0% ± 2,0%), C₂H₄ (1,5% ± 0,5%); umidade no óleo; temperaturas do óleo; temperatura ambiente; nível de óleo do conservador; vazão de água e óleo no sistema de refrigeração; comutador de derivações sem carga; corrente, assim como tensão e capacitância das buchas alta tensão.

A seguir são apresentadas as figuras (3.3 e 3.4) ilustrativas sobre o sistema de monitoramento dos transformadores principais nas unidades (9A e

18A): posicionamento ilustrativo dos sensores e a representação esquemática da interligação entre os painéis.

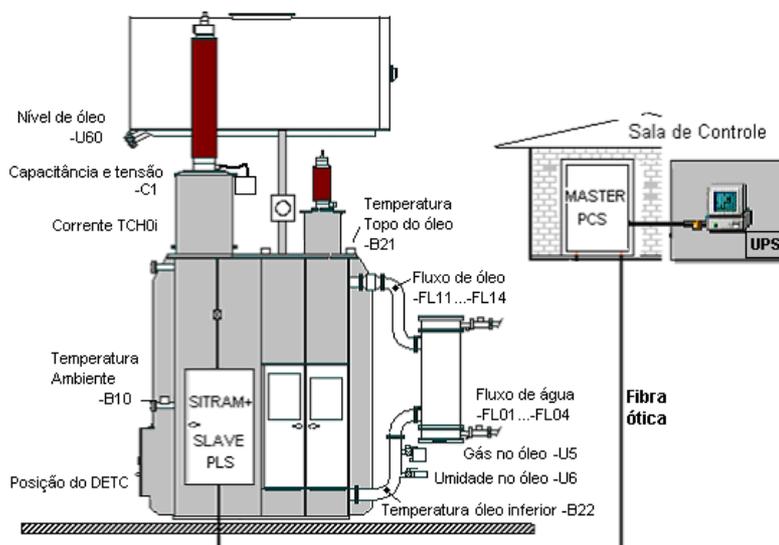


Figura 3.3 Posicionamento ilustrativo dos sensores (SIEMENS, 1992)

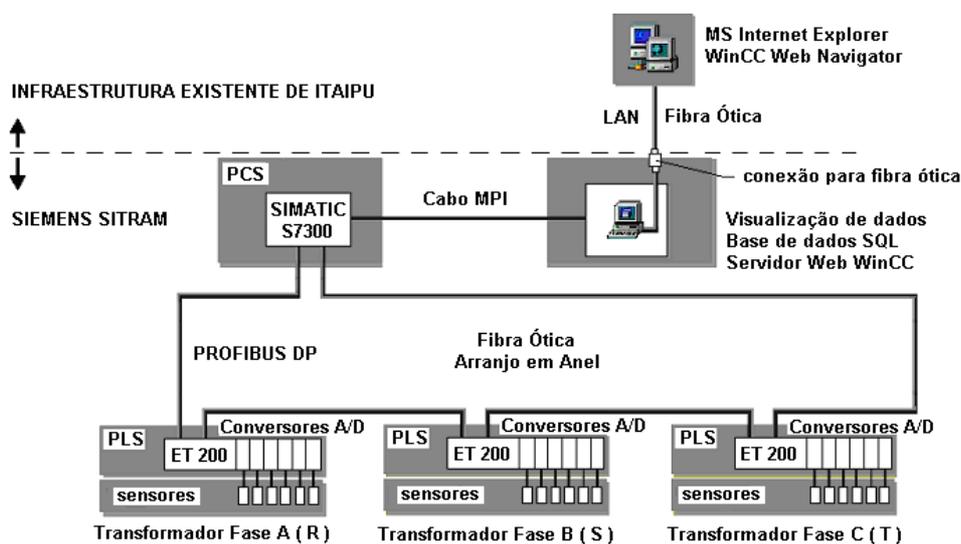


Figura 3.4 Representação da interligação entre os painéis, (SIEMENS, 1992)

Apesar de fugir aos objetivos específicos deste trabalho, na seqüência são reproduzidos alguns comentários e conclusões levantadas por KIRTLEY, et al.

(1996) sobre o sistema de monitoramento adaptável e inteligente baseado em modelos, desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT), instalado em quatro transformadores de potência do sistema elétrico da Boston Edison, nos Estados Unidos.

O uso de modelos adaptáveis facilita o monitoramento do estado do transformador sobre múltiplas escalas de tempo e permite compensar as diferenças entre os transformadores individuais. O veloz desvio de alguma medida com relação ao valor previsto indica uma anomalia em rápido desenvolvimento, que pode ser causada pela evolução de uma falha. O lento desvio dos parâmetros do modelo indica uma anomalia em lento desenvolvimento, que também pode ser causada pela evolução de uma falha. Adicionalmente, a determinação de tendências a longo prazo dos parâmetros do modelo pode ser usada para acompanhar o envelhecimento normal do equipamento com o potencial para formulação de prognósticos sobre a vida útil.

Em poucos meses de experiência com estes sistemas os autores chegaram aos resultados reproduzidos a seguir:

- O controle de temperatura do sensor Syprotec Hydran 201R, em caso de falta de alimentação leva a leituras inúteis. No entanto, a compensação baseada no modelo da leitura do sensor leva a uma leitura estável e útil.
- O modelo térmico existente da IEEE (C.57.115) não maneja bem os transitórios da temperatura ambiente. Poderá ser necessário um modelo térmico com bases mais físicas.
- As mudanças no estado e resfriamento podem enganar o sistema de geração de mensagem. Notamos, por exemplo que quando uma bomba de resfriamento controlada por temperatura é ligada, produz-se uma elevação transitória da temperatura do óleo medida na parte superior. Isto induz ao módulo de gás a predizer uma queda no conteúdo do gás, gerando um alarme com respeito a taxa de evolução do residual de gás.

- Durante um dia muito quente de verão, disparou um disjuntor auxiliar que alimenta as bombas de óleo, deixando sem resfriamento um transformador que estava sendo monitorado. Fomos alertados desta situação porque a leitura do Hydran saiu da escala. Com o modelo, conseguimos não apenas diagnosticar o problema imediatamente, mas também assegurar que o transformador não estava superaquecido.

Finalmente, os autores concluíram que muitas das mensagens de alarme nos sistemas de monitoramento são claramente resultados das deficiências do sensor. Por exemplo, existem sensores acústicos de descargas parciais que resultam ser sensíveis à cavitação no circuito de circulação de óleo, produzindo alarmes cada vez que o sistema de resfriamento entra em operação.

4 - CRITÉRIOS DE DIAGNÓSTICO DE DGA

Os critérios para interpretação dos resultados das análises de gases dissolvidos no óleo (DGA) internacionalmente conhecidos, estão baseados em diferentes métodos de diagnóstico de falhas incipientes (defeitos) e têm a finalidade de comparar os resultados obtidos, dando suporte aos especialistas na tomada de decisão sobre o estado operativo dos equipamentos (Szczepaniack e Rudnicki, 1999, Milasch,1984). Estes critérios foram sugeridos por entidades normativas como “International Electrotechnical Commission” – IEC, “Institute of Electrical and Electronic Engineers” – IEEE, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, por laboratórios como LABORELEC da Bélgica e por pesquisadores como Duval, Dörnemburg, Pugh, e outros. Esses critérios têm como principal objetivo descrever como as concentrações dos gases formados pela degradação do óleo ou do isolamento sólido, causadas por descargas elétricas ou solicitações térmicas de transformadores imersos em óleo, podem ser interpretadas para diagnosticar o estado operativo de um transformador.

Os métodos mais aplicados para interpretação dos resultados de DGA são apresentados a seguir (NBR-7274,1982, GCOI, 1986, Thang et.al.,2000).

4.1 Critério de Dörnemburg

O critério de Dörnemburg está baseado nas relações CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_6/C_2H_2 e C_2H_2/CH_4 . Por este critério três tipos de falhas são detectáveis: superaquecimento local (pontos quentes), descargas parciais e outros tipos de descargas (falhas elétricas), como mostrado na Tabela 4.1. Pelas recomendações deste critério deve-se determinar se a relação de gases dissolvidos está dentro dos valores estabelecidos, existindo a suspeita de falha incipiente (defeito) se uma ou mais razões excedem os limites. A implementação deste método resulta, às vezes, em casos sem diagnóstico, devido as quatro relações de gases propostas não abrangerem todas as combinações de gases dissolvidos possíveis.

Tipo de falha	RELAÇÕES			
	$(CH_4/H_2) \times 0.127$	$(C_2H_2/C_2H_4) \times 1.44$	$(C_2H_6/C_2H_2) \times 0.47$	$(C_2H_2/CH_4) \times 0.359$
Pontos quentes	> 0.1	< 1	> 0.2	< 0.1
Descargas elétricas (exceto descargas internas)	0.01 a 0.1	> 1	< 0.2	> 0.1
Descargas Internas	<0,01	---	> 0.2	< 0.1

Tabela 4.1 Tipos de falhas - Dörnemburg (GCOI, 1986)

4.2 Critério de Rogers

Este critério utiliza as seguintes relações: CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_2/C_2H_4 e C_2H_6/CH_4 . O diagnóstico de falhas é emitido por meio de um esquema de codificações simples baseado em faixas de relações. Por este critério são detectáveis quatro condições que são o envelhecimento normal, descargas parciais, falhas térmicas e falhas elétricas de vários graus de severidade. Este método é melhor do que o método de Dörnemburg, já que abrange uma faixa maior de combinações de razões, reduzindo significativamente o número de casos sem interpretação; todavia que nenhuma consideração seja dada para gases dissolvidos abaixo das concentrações normais. Portanto a utilização unicamente deste método pode levar a interpretações erradas.

Este critério está baseado em duas tabelas (4.2 e 4.3.) que fornecem as relações entre os gases característicos e os diagnósticos.

FAIXA DE R	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
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 4.2 Relações propostas pelo critério de ROGERS (GCOI, 1986)

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
Nenhuma falha: deterioração normal	0	0	0	0
Descargas parciais com baixa densidade de energia	5	0	0	0
Descargas Parciais com alta densidade de energia, possivelmente com formação de caminho de arco	5	0	0	1
Descargas de baixa energia: arco sem potência	0	0	0	1
Descargas de baixa energia: centelhamento contínuo para potencial em flutuação	0	0	1	1
Descargas de baixa energia: centelhamento contínuo para potencial em flutuação	0	0	1	2
Descargas de alta energia: arco com potência	0	0	2	1
Descargas de alta energia: arco com potência	0	0	2	2
Sobreaquecimento de condutor isolado	0	0	1	0
Falha térmica baixa (150°C)	0	1	0	0
Falha térmica média (100 – 200°C)	0	1	0	0
Falha térmica média (100 – 200°C)	1	1	0	0
Falha térmica média (100 – 200°C)	2	1	0	0
Falha térmica (150 – 300°C) sobreaquecimento do cobre por correntes parasitas	1	0	1	0
Falha térmica (300 – 700°C) maus contatos (formação de carbono pirolítico de corrente no núcleo e/ou no tanque)	1	0	2	0
Falha térmica (300 – 700°C) maus contatos (formação de carbono pirolítico de corrente no núcleo e/ou no tanque)	2	0	2	0

Tabela 4.3 Diagnóstico de falhas - ROGERS (GCOI, 1986)

4.3 Critério de Duval

Este critério é um método especial para diagnóstico de falhas já que está baseado na visualização da localização dos gases dissolvidos em um mapa triangular. Unicamente três gases dissolvidos são necessários CH_4 , C_2H_2 e C_2H_4 . Este critério permite diagnosticar quatro tipos de falhas que são descargas parciais, arco de alta e baixa energia e pontos quentes de várias faixas de temperatura (Tabela 4.4), relacionando os percentuais obtidos para os gases característicos utilizando as seguintes relações:

$$m[\%] = 100 \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4}$$

$$a[\%] = 100 \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4}$$

$$y[\%] = 100 \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4}$$

Tipo de Falha	m	a	y
Pontos quentes	0 - 96	0 - 16	0 - 100
Arco de alta energia	0 - 59	16 - 75	25 - 84
Arco de baixa energia	0 - 84	16 - 100	0 - 25
Descargas internas	96 - 100	0 - 4	0 - 4

Tabela 4.4 Tipos de falhas - Duval (GCOI, 1986)

Visto que neste critério não é indicada nenhuma condição de envelhecimento normal, a implementação cuidadosa deste critério resulta sempre em diagnóstico de uma das três falhas. Devido a este problema, antes de aplicar este método deve ser verificado se a evolução dos gases está dentro dos limites considerados normais pela empresa.

4.4 Critério IEC-60599/NBR 7274

A norma NBR 7274 foi desenvolvida para transformadores de potência com enrolamento de cobre isolados com papel, papelão ou celulose e imersos em óleo mineral isolante em serviço em sistemas de potência (NBR-7274, 1982); esta norma foi baseada no método recomendado pela IEC. O critério IEC-60599 é originado do método de Rogers, do qual foi suprimida a razão C_2H_6/CH_4 , por considerar que a mesma é indicada unicamente para uma faixa limitada de temperatura de decomposição. Quatro condições são detectáveis: envelhecimento normal, descargas parciais de alta e baixa densidade de energia, falhas térmicas e elétricas de vários graus de severidade. No entanto, o critério não faz nenhuma tentativa de identificar ditas falhas dentro de tipos mais precisos.

Este critério é baseado em duas tabelas: na Tabela 4.5 as relações entre os gases acetileno e etileno, metano e hidrogênio, e entre os gases etileno e etano, geram as relações 1, 2 e 3; e na Tabela 4.6 são mostrados os diagnósticos correspondentes a cada caso.

FAIXA DE R	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
$0.1 > R$	0	1	0
$0.1 < R < 1$	1	0	0
$1 < R < 3$	1	2	1
$R > 3$	2	2	2

Tabela 4.5 Relações características entre gases NBR, (NBR-7274, 1982)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \text{ Relação 1}$$

$$\frac{CH_4}{H_2} \text{ Relação 2}$$

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} \text{ Relação 3}$$

A tabela é completada de acordo com a posição ocupada pelo resultado das relações acima (1,2,3), levando em consideração as seguintes notas:

- a) O código utilizado para as relações é dado na tabela 4.5, na qual, as relações com denominador igual a zero são consideradas iguais a zero;
- b) Os valores dados para as relações devem ser considerados como típicos;
- c) Nesta tabela a relação C_2H_2/C_2H_4 se eleva de um valor compreendido entre 0,1 e 3 a um valor superior a 3 e a relação C_2H_4/C_2H_6 de um valor compreendido entre 0,1 e 3 a um valor superior a 3 quando a intensidade da descarga aumenta;
- d) Neste caso os gases provêm principalmente da degradação do isolamento sólido, o que explica o valor da relação C_2H_4/C_2H_6 ;
- e) Este tipo de falha é indicada normalmente por um aumento da concentração de gases. A relação CH_4/H_2 é normalmente da ordem de 1. O valor real superior ou inferior à unidade depende de numerosos fatores tais como o tipo de sistema de preservação do óleo, a temperatura e a quantidade do óleo;
- f) Um aumento da concentração de C_2H_2 pode indicar que a temperatura do ponto quente é superior a $1000^{\circ}C$;
- g) Os transformadores equipados com comutador de tensão sob carga podem indicar falhas do tipo 202/102 se os produtos de decomposição formados pelos arcos no comutador puderem se difundir no óleo do tanque principal do transformador;
- h) Na prática podem ocorrer combinações de relações diferentes da tabela. Para estes casos deve-se considerar a taxa de crescimento e/ou os perfis típicos de composição.

FALHA CARACTERÍSTICA	RELAÇÕES		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Sem falha	0	0	0
Descargas Parciais baixa energia	0	1	0
Descargas Parciais alta energia	1	1	0
Descargas de baixa energia (ver nota c)	1-2	0	1-2
Descargas de alta energia	1	0	2
Descargas de baixa energia	2	0	1
Descargas de baixa energia	2	0	2
Falha térmica baixa (<150 °C) (ver nota d)	0	0	1
Falha térmica média (150 – 300°C) (ver nota e)	0	2	0
Falha Térmica alta (300 – 700°C)	0	2	1
Falha Térmica muito alta (>700°C) (ver nota f)	0	2	2

Tabela 4.6 Diagnóstico de falhas - NBR (NBR-7274, 1982)

4.5 Critério de LABORELEC

Os diagnósticos de falhas por este método são mostrados na Tabela 4.8 e as orientações com relação à frequência da realização dos ensaios, assim como as ações a serem tomadas são fornecidas na Tabela 4.7.

ÍNDICE	FREQÜÊNCIA DE ENSAIO / AÇÃO A SER TOMADA
A	Evolução Normal
B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅ , B ₇ , B ₉	Próximo controle: Entre 6 e 12 meses
C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆ , C ₇ , C ₈	Próximo controle: Entre 3 e 6 meses
D	Para todos os índices "D" – próximo controle entre 1 e 3 meses
D ₁	Nova medição do nível de descargas parciais no transformador
D ₂ , D ₃	Possíveis gases formados no LTC, senão, inspecionar as conexões do transformador
D ₄ , D ₅ , D ₆ , D ₇	Possíveis gases formados no LTC, senão, inspecionar as conexões (pontos quentes) e revisão no sistema de resfriamento
D ₈	Inspeção nas conexões/determinação da resistência de isolamento (se valor baixo, considerar um reparo em oficina). Para o transformador reentrar em operação promover desgaseificação e retornar ao esquema de amostragem normal.

Tabela 4.7 Recomendações segundo critério Laborelec (GCOI, 1986)

CONCENTRAÇÃO [ppm]		CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₂	CO	ÍNDICE
H ₂	CH ₄ + C ₂ H ₄ + C ₂ H ₆				
≤ 200	≤ 300			≤ 400	A
201-300	≤ 300	≤ 0.15			B ₁
		0.16-1.0	≤ 20		B ₂
		0.16-1.0	> 20		B ₃
≤ 200	301-400	≥ 0.61		≤ 400	B ₄
		≥ 0.61		> 400	B ₅
		≤ 0.60	> 20	≤ 400	B ₆
		≤ 0.60	> 20	> 400	B ₇
201-300	301-400		> 20		B ₃
			≤ 20		B ₄
≤ 200	≤ 300			> 400	B ₉
301-600	≤ 400	≤ 0.15			C ₁
		0.16-1.0	≤ 50		C ₂
		0.16-1.0	> 50		C ₃
≤ 300	401-800	≥ 0.61		≤ 500	C ₄
		≥ 0.61		> 500	C ₅
		≤ 0.60	> 50	≤ 500	C ₆
		≤ 0.60	> 50	> 500	C ₇
301-600	401-800		> 50		C ₈
			≤ 50	≤ 500	C ₄
			≤ 50	> 500	C ₅
≥ 601	≤ 800	≤ 0.15			D ₁
		0.16-1.0	≤ 50		D ₂
		0.16-1.0	> 50		D ₃
≤ 600	≥ 801	≥ 0.61		≤ 700	D ₄
		≥ 0.61		> 700	D ₅
		≤ 0.60	> 50	≤ 700	D ₆
		≤ 0.60	> 50	> 700	D ₇
≥ 601	≥ 801		> 100		D ₈
			≤ 100	≤ 700	D ₄
			≤ 100	> 700	D ₅
Amplitude da degradação A – Normal B – Media C – Importante D – Muito		Definição da degradação 1: Descargas parciais (óleo) 2: Centelhamento (óleo) 3: Centelhamento (óleo) ou Gás proveniente do comutador 4: Térmica (óleo) 5: Térmica (óleo + papel) 6: Térmica (óleo) ou Gás proveniente do comutador 7: Térmica (óleo+papel) ou Gás proveniente do comutador 8: Arco no óleo ou Gás proveniente do comutador 9: Térmica (papel)			

Tabela 4.8 Tipos de falhas - Laborelec (GCOI, 1986)

4.6 Critério de Pugh

Este método, mais conhecido como “método do gás chave”, baseia-se no fato de que quando há uma falha incipiente (defeito) em evolução no transformador, a concentração dos gases a ela associados ultrapassa os valores normais de degradação da isolação estabelecidos em ensaios de laboratório (MILASCH, 1984). O gás que caracteriza o tipo de falha incipiente é chamado de gás chave, e a sua correlação com os tipos de falhas são mostrados a seguir:

- *Arco*: gas-chave acetileno (C_2H_2). Formam-se grandes quantidades de Hidrogênio (H_2) e Acetileno (C_2H_2), acompanhado de pequena evolução de Metano (CH_4) e Etileno (C_2H_4). Se a celulose for envolvida também haverá aumento de Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO_2). Sob a ação do arco o óleo se decompõe por pirólise, com formação de carbono coloidal, que se dispersa no óleo;
- *Corona*: Gás chave Hidrogênio (H_2). Sob a ação de descargas elétricas de baixa energia formam-se grandes quantidades de Hidrogênio (H_2) e em menor escala haverá a formação de Metano (CH_4). Se as descargas atingirem a celulose haverá evolução de Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO_2), e os gases indicadores são Hidrogênio (H_2) e Monóxido de Carbono (CO);
- A evolução de grande quantidade de Hidrogênio (H_2), sem que haja evolução anormal de Metano (CH_4), pode caracterizar eletrólise da água existente no óleo. Não confundir este tipo de falha com o de corona;
- *Superaquecimento do óleo*: gas-chave Etileno (C_2H_4). Sob efeito de altas temperaturas o óleo isolante se decompõe, formando Etileno (C_2H_4) e Metano (CH_4), junto com pequenas quantidades de Hidrogênio (H_2) e Etano (C_2H_6). Se o ponto quente apresenta temperatura acima de $700^\circ C$, haverá formação de pequenas quantidades de Acetileno (C_2H_2);

- *Superaquecimento da celulose*: gas-chave Monóxido de Carbono (CO). Sob o efeito de altas temperaturas, a celulose libera grandes quantidades de Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO₂). Estando o isolamento celulósico impregnado com óleo mineral, haverá pequena evolução de Metano (CH₄) e Etileno (C₂H₄).

A aplicação destes métodos não permite uma interpretação perfeita e completa e a combinação de vários critérios resulta quase sempre em diagnósticos diferentes, conseqüentemente a aplicação de técnicas de IA pode ser utilizada para tratar essas desvantagens (Thang et al., 2000).

Uma implementação correta deste critério requer a disponibilidade dos valores das concentrações normais dos gases dissolvidos. Se uma grande base de dados de DGA é disponível, valores de concentrações típicas de 90% são sugeridos como valores normais pela IEC. Outras informações dos transformadores também devem ser levadas em consideração para a tomada de decisão sobre o estado operativo dos mesmos, como o tipo, família, idade, condições de operação, e outros. Em conclusão, os critérios de interpretação dos dados de DGA disponíveis estão longe de ser satisfatórios e completos. Conseqüentemente, diagnósticos de falhas baseados em DGA são ainda pesadamente dependentes da experiência dos especialistas humanos.

5 - INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

As bases teóricas sobre Inteligência Artificial aqui utilizadas foram desenvolvidas entre outros por RICH (1983), RABUSKE (1995) e BITTENCOURT (1998).

5.1 Uma Visão Histórica

As correntes de pensamento que se cristalizaram em torno da IA já estavam em gestação desde os anos 30. No entanto, oficialmente, a IA nasceu em 1956 com uma conferência de verão em Dartmouth College, NH, USA. Nessa conferência, foi proposto realizar "um estudo durante dois meses, por dez homens, sobre o tópico "Inteligência Artificial". Ao que tudo indica, esta parece ser a primeira menção oficial à expressão "Inteligência Artificial", segundo McCorduck citado por Bittencourt (1998). Desde seus primórdios, a IA gerou polêmica, a começar pelo seu próprio nome, considerado presunçoso por alguns, até a definição de seus objetivos e metodologias. O desconhecimento dos princípios que fundamentam a inteligência, por um lado, e os limites práticos da capacidade de processamento dos computadores, por outro, levou periodicamente a promessas exageradas e às correspondentes decepções.

O que hoje chamamos de Inteligência Artificial (IA) é um ramo da ciência da computação ao mesmo tempo recente e muito antigo, pois a IA foi construída a partir de idéias filosóficas, científicas e tecnológicas herdadas de outras ciências, algumas tão antigas quanto a lógica com seus 23 séculos.

O objetivo central da IA é simultaneamente teórico - a criação de teorias e modelos para a capacidade cognitiva - e prático - a implementação de sistemas computacionais baseados nestes modelos. Nesse sentido, a IA tem uma relação com seu objeto de estudo semelhante a da psicologia, mas com uma importante diferença: os modelos e teorias da IA são implementados em um computador, o que os torna de certa forma autônomos. Assim, a validade de um modelo ou de uma teoria de IA não precisa ser provada através da comparação de seus

resultados previstos com o comportamento psíquico humano, como no caso da psicologia, mas pode ser implementada em um computador e demonstrada diretamente através da ação inteligente do programa no mundo.

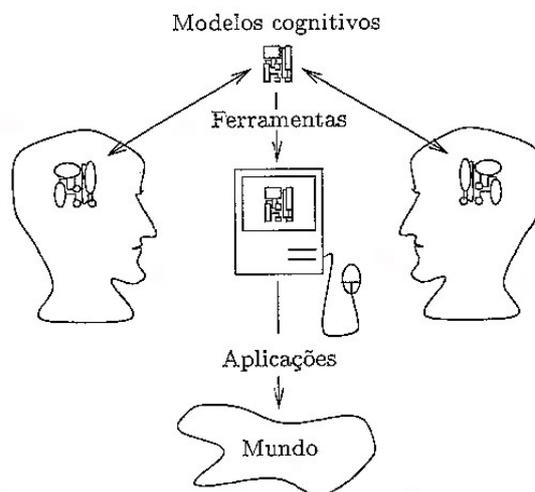


Figura 5.1 Atividades da IA (Bittencourt,1998).

Esta situação, representada esquematicamente na figura 5.1, reflete-se nos tipos de atividades desenvolvidas em IA, conforme classificação de Bundy, citado por Bittencourt: (i) desenvolvimento de modelos cognitivos, (ii) implementação de aplicações e (iii) construção de ferramentas para exploração e experimentação de técnicas computacionais que permitam que os modelos desenvolvidos em (i) sejam utilizados em (ii). Cada uma dessas atividades pode ser vista como uma manifestação recente de atividades humanas mais antigas e mais abrangentes: a filosofia, a matemática e a tecnologia.

Importantes fatores contribuíram para a evolução das pesquisas na área de Inteligência Artificial, tais como o avanço tecnológico na fabricação de computadores; a facilidade na divulgação e disseminação das pesquisas através da *internet* ; avanços consideráveis da ciência na compreensão dos mecanismos que determinam a inteligência humana, e outros.

5.2 Definição

Dada a impossibilidade de uma definição precisa para IA, visto que para tanto seria necessário definir primeiramente a própria inteligência (RICH, 1983), foram propostas algumas definições operacionais, por exemplo McCarthy: "uma máquina é inteligente se ela é capaz de solucionar uma classe de problemas que requer inteligência para serem solucionados por seres humanos"; Barr e Feigenbaum: "Inteligência Artificial é a parte da ciência da computação que compreende o projeto de sistemas computacionais que exibam características associadas, quando presentes no comportamento humano, à inteligência", ou ainda Charniak e McDermott: "Inteligência Artificial é o estudo das faculdades mentais através do uso de modelos computacionais".

Outros se recusam a propor uma definição para o termo e preferem estabelecer os objetivos da IA: "tornar os computadores mais úteis e compreender os princípios que tornam a inteligência possível".

5.3 Linhas de Pesquisa

Existem duas linhas principais de pesquisa para a construção de sistemas inteligentes: a LINHA CONEXIONISTA e a LINHA SIMBÓLICA.

A linha conexionista visa a modelagem da inteligência humana através da simulação dos componentes do cérebro, isto é, de seus neurônios e de suas interligações.

Esta proposta foi formalizada inicialmente em 1943, quando o neuropsicólogo McCulloch e o lógico Pitts propuseram um primeiro modelo matemático para um neurônio. Um primeiro modelo de rede neuronal, isto é, um conjunto de neurônios interligados, foi proposto por Rosenblatt. Este modelo foi chamado de Perceptron. Durante um longo período essa linha de pesquisa não foi muito ativa, mas o advento dos microprocessadores, pequenos e baratos, tornou praticável a implementação de máquinas de conexão compostas de

milhares de microprocessadores, o que aliado à solução de alguns problemas teóricos importantes, deu um novo impulso às pesquisas na área. O modelo conexionista deu origem à área de RNA .

A linha simbólica segue a tradição lógica e teve em McCarthy e Newell seus principais defensores. O sucesso dos Sistemas Especialistas, a partir da década de sessenta, estabeleceu a manipulação simbólica de um grande número de fatos especializados sobre um domínio restrito como paradigma corrente para a construção de sistemas inteligentes do tipo simbólico.

5.4 Sistemas Especialistas

Os sistemas especialistas são usados amplamente em muitos domínios. Entre as aplicações mais novas dos sistemas especialistas se destacam o raciocínio dos agentes inteligentes, nos sistemas de planejamento de recursos das empresas, e a validação de pedidos para o comércio eletrônico (FRIEDMANN-HILL, 2003).

5.4.1 Algumas Definições

Um Sistema Especialista é um programa capaz de tratar um determinado problema num domínio específico, imitando o comportamento de um especialista humano neste domínio. Entende-se por especialista uma pessoa que detém conhecimentos e experiências numa área determinada. O conhecimento que um especialista detém pode ser de dois tipos: o conhecimento que é de domínio público; e o conhecimento que ele detém devido à sua vivência profissional e pessoal, que o leva a fazer suposições e a usar do bom senso; tal conhecimento é denominado de conhecimento heurístico.

5.4.2 Principais Formas de Representação do Conhecimento

Usualmente o conhecimento dentro de uma aplicação de IA é representado por: Regras de Produção, Redes Semânticas, *Frames* ou Quadros

e mais recentemente as Ontologias.

- **Regras de Produção**

A expressão do conhecimento pelos especialistas é realizada normalmente utilizando um conjunto de relações do tipo situação-ação, as quais são denominadas regras. Este tipo de representação do conhecimento consiste em estruturá-lo em uma série de relações SE (lado esquerdo "LHS") - ENTÃO (lado direito "RHS") (RICH, 1983).

Quando se utiliza a representação do conhecimento por regras de produção enfrenta-se o inconveniente da granulosidade do conhecimento. Com isto, a determinação de quais regras são sensibilizadas em um dado estado do sistema só é possível após o teste sobre todas as regras, o que em geral consome muito tempo. Esta é uma das formas de representação utilizada neste trabalho e o exemplo de implementação é mostrado no item 6.3.1.

- **Redes Semânticas**

As redes semânticas foram originalmente projetadas como um meio de representar os significados de palavras inglesas. A representação do conhecimento por redes semânticas consiste num conjunto de nós, que representam objetos, conceitos ou situações de aplicação, interligados por um conjunto de arcos que representam as relações semânticas entre estes nós.

Este tipo de representação possibilita a inferência por herança, ou seja, as características atribuídas a um nível da rede são automaticamente assumidas pelos níveis inferiores. Um fragmento de uma rede semântica típica é apresentado na Figura 5.2.

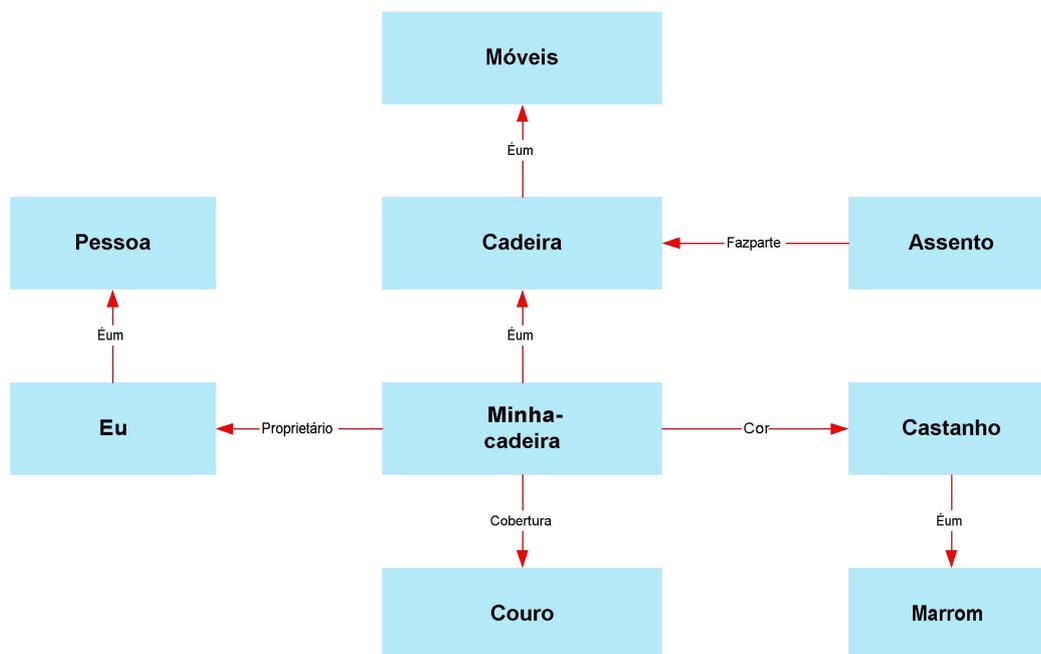


Figura 5.2 Uma Rede Semântica (RICH, 1983)

- **Quadros**

Este tipo de representação, também conhecido por *Frames*, é utilizado principalmente em aplicações de grande complexidade, como interpretação de linguagem natural e interpretação da visão. Um objeto ou uma situação é descrita internamente num quadro através de *slots* (escaninhos). A cada *slot* são associadas características ou procedimentos de um objeto ou situação, que podem, por sua vez, estar detalhados em outros quadros, formando assim uma estrutura de ascendência e descendência entre quadros (hereditariedade).

Através do quadro "cadeira-do-Renato", abaixo, pode-se ter um exemplo de como se apresenta esta estrutura (RABUSKE, 1995).

Quadro	: Cadeira-de-Renato
slot	: número-de-pernas - 4
slot	: tipo-de-assento - anatômico
slot	: número-de-braços - nenhum
slot	: cor - incolor

- **Ontologias**

Desde o começo dos anos noventa, como citado por DE ALMEIDA (2003), as ontologias tornaram-se um tópico de pesquisa popular investigado por várias comunidades de IA, incluindo engenharia do conhecimento, processamento de linguagem natural e representação de conhecimento. Mais recentemente a noção de ontologia também está ficando difundida em campos como integração inteligente da informação, recuperação de informação na Internet, e administração do conhecimento.

O uso de ontologias tem-se tornado um tema popular, já que elas prometem um entendimento compartilhado e comum de algum domínio que pode ser comunicado entre as pessoas e computadores.

Uma ontologia define um vocabulário comum para os pesquisadores que precisam compartilhar informação num domínio, e inclui as definições interpretáveis pelas máquinas sobre os conceitos básicos dentro do domínio e as relações entre eles.

De acordo com CHANDRASEKARAN (2003), as teorias sobre inteligência artificial podem ser classificadas em duas grandes categorias: as teorias dos mecanismos e as teorias do conteúdo. As ontologias são teorias do conteúdo com relação às classes de objetos, às propriedades dos objetos e às relações dos objetos que são possíveis dentro de um domínio específico do conhecimento. Elas fornecem termos potenciais para descrever o conhecimento sobre o domínio.

Para os nossos fins, e de acordo com CHANDRASEKARAN (2003), podemos descrever uma ontologia como sendo uma descrição formal e explícita dos conceitos em um domínio de discurso (classes, às vezes chamadas de conceitos), propriedades de cada conceito descrevendo várias características e atributos do conceito (*slots*, às vezes chamados de papéis ou propriedades), e restrições sobre *slots* (facetas, às vezes chamadas de restrições do papel). Uma

ontologia junto a um jogo de instâncias individuais e classes constitui uma base de conhecimentos. Na realidade, é difícil demarcar onde termina uma ontologia e começa a base de conhecimentos.

Em termos práticos, o desenvolvimento de uma ontologia inclui: definir as classes na ontologia; dispor as classes numa hierarquia taxonômica (subclasses - superclasses); definir os *slots*, descrever valores permitidos e preencher os mesmos com os valores para as instâncias.

A ferramenta utilizada nesta proposta, Protégé 2000, dispõe de uma interface gráfica, baseada em janelas, que permite ao usuário construir uma ontologia do domínio, formatar formulários para aquisição do conhecimento e então completar com o conhecimento do domínio. Sua plataforma pode ser estendida com outros programas aplicativos, que aparecem como novos "TABs", adicionando capacidade de gerar diagramas gráficos das ontologias criadas e executar diretamente em seu ambiente arquivos de regras de linguagens como o Jess que utilizam a base de conhecimento criada no Protégé, como é o caso do "JessTab" utilizado neste trabalho.

Podemos, então, criar uma base de conhecimentos definindo instâncias individuais destas classes, preenchendo a informação específica do valor dos *slots* e as restrições adicionais dos mesmos. Nas Figuras 5.3 e 5.4 são apresentados exemplos ilustrativos de como isto é feito, sendo que, os exemplos de aplicação real são apresentados no Capítulo 6 e na seção de ANEXOS.

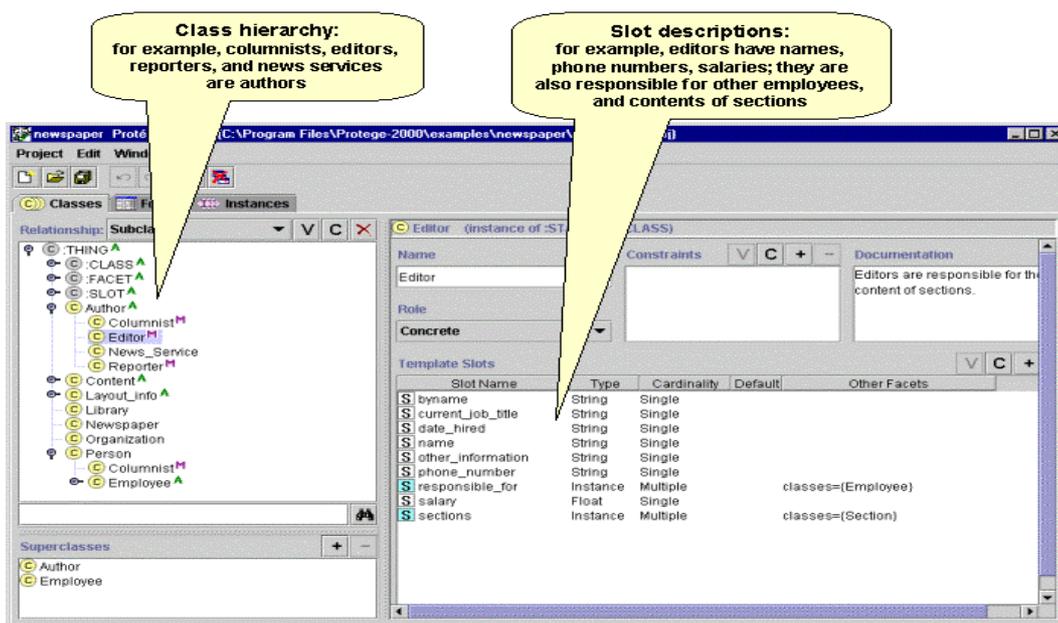


Figura 5.3 Definição das classes (PROTÉGÉ, 2000)

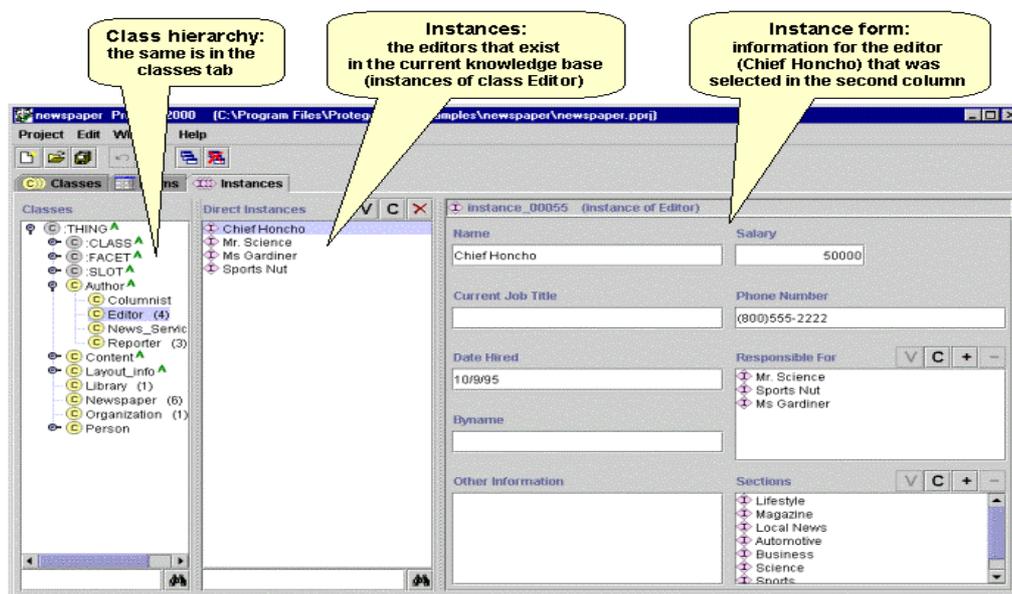


Figura 5.4 Definição das instâncias dos objetos (PROTÉGÉ, 2000).

Em anos recentes o desenvolvimento de ontologias tem sido gradualmente deslocado do âmbito dos laboratórios para os escritórios dos peritos em domínios. As ontologias têm sido comuns na World Wide Web. As ontologias na

Web abrangem desde as grandes taxonomias categorizando os sítios Web, tais como em Yahoo, até as classificações de produtos para a venda e suas características, tais como em Amazon.com.

Existe na literatura vários trabalhos de aplicação de Ontologia no setor elétrico como apresentados, dentre outros por BERNARAS, LARESGOITI et al. (1996) e DE ALMEIDA (2003).

5.4.3 Sistemas de Produção

A fim de facilitar a estruturação e a representação do conhecimento, bem como agilizar o processo de procura, a maioria dos programas de IA são estruturados de uma forma denominada Sistemas de Produção. Um Sistema de Produção consiste de:

- Um conjunto de regras, com indicações de sua aplicabilidade e de suas ações correspondentes;
- Uma base de conhecimento;
- Uma estratégia de controle que especifica a ordem na qual as regras são usadas e como resolver conflitos quando mais de uma regra puder ser aplicada.

Novas regras podem ser adicionadas a um Sistema de Produção sem maiores alterações no resto do programa, porque o acesso às regras é associativo, isto é, não há necessidade de explicitar qual regra será utilizada e a sua ativação é não determinística, ou seja, não há necessidade de explicitar a ordem em que as regras serão aplicadas. Esta característica é muito importante, pois assim um sistema pode constantemente ser aperfeiçoado.

5.4.4 Categorias de Aplicação

De acordo com RICH (1983) em função de sua aplicação final, um

Sistema Especialista pode ser classificado em uma (ou mais de uma) das categorias abaixo relacionadas:

- Interpretação, que consiste em inferir a descrição de situações a partir de sensores;
- predição, que consiste em inferir possíveis conseqüências de determinadas situações;
- diagnóstico, que consiste em inferir a causa de mau funcionamento a partir de observações;
- planejamento, que consiste em projetar ações;
- monitoração, que consiste em comparar observações a valores esperados;
- Depuração, que consiste em determinar soluções para as causas de mau funcionamento;
- Reparo, que consiste em executar planos para administrar a aplicação das soluções obtidas pela depuração;
- Controle, que consiste em comandar o comportamento de sistemas;
- Instrução, que consiste em transmitir conhecimentos, tendo ainda a capacidade de realizar testes, avaliar resultados, repetir instrução, e outros.

5.4.5 Estrutura de um Sistema Especialista

No núcleo do Sistema Especialista está implementada a sua perícia. Ele é composto de dois módulos fundamentais:

- A Base de Conhecimento, que possui armazenado o conhecimento do especialista;

- O Motor de Inferência, que contém as técnicas de procura da solução de problemas, de aplicação do conhecimento, de tratamento de incertezas e de tratamento de conflitos e de justificativas.

O módulo Interface com o usuário permite dar entrada ao problema, fornecer informações adicionais ao Sistema, obter as respostas e eventualmente as justificativas sobre seu processo de raciocínio.

O módulo Aquisição de Conhecimento ou Interface com o especialista permite o acesso à Base de Conhecimento para que esta possa sofrer modificações ou ampliações.

5.4.6 Tipos de Ferramenta para Construção de um SE

Existem basicamente dois tipos de ferramentas que possibilitam o desenvolvimento de um Sistema Especialista:

- **Linguagens de Programação**

Oferecem uma grande flexibilidade no projeto do Sistema Especialista, mas tudo o que diz respeito à sua estrutura funcional tem que ser construído, pois existe a necessidade de se projetar a base de conhecimento, o motor de inferência e as interfaces com usuário. (Ex.: LISP, PROLOG).

- **Linguagem de Engenharia do Conhecimento**

São menos flexíveis que as linguagens de programação, pois a estrutura da base de conhecimento, o motor de inferência e as interfaces com usuário já estão predefinidas. Todo o trabalho consiste em introduzir o conhecimento propriamente dito. (Ex.: ROSIE, EMYCIN, EXSYS, JESS, e outros).

Desta maneira, o desenvolvimento é mais fácil e mais rápido que com o uso de uma linguagem de programação, embora o resultado final seja geralmente de menor qualidade.

5.4.7 Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais

Algumas das diferenças que os Sistemas Especialistas apresentam em relação aos Sistemas Convencionais de processamento são:

Os Sistemas Convencionais basicamente utilizam estruturas de dados e aplicam algoritmos bem definidos repetitivamente enquanto os Sistemas Especialistas utilizam conhecimentos descritos por representação simbólica e aplicam regras heurísticas através de processos dedutivos.

Uma vez que o controle é separado do conhecimento, os Sistemas Especialistas permitem que conhecimentos possam ser retirados, incluídos ou modificados sem que isto cause qualquer alteração na estrutura do programa, o que dificilmente pode ocorrer num Sistema Convencional.

5.4.8 Limitações de um Sistema Especialista

Os sistemas especialistas possuem atualmente algumas limitações que tenderão a desaparecer com o tempo, graças aos progressos obtidos na área de Inteligência Artificial:

- Os Sistemas Especialistas possuem limites de atuação e falham quando solicitados para executarem tarefas diferentes daquelas para as quais foram projetados;
- não possuem senso comum, isto é, o conhecimento que uma pessoa adquire ao longo de sua existência sobre o universo que a rodeia; o conhecimento de um Sistema Especialista é limitado à sua área de atuação;
- eles têm capacidade muito limitada de criar novos conhecimentos;
- não existe generalização na forma de representar o conhecimento em SEs, o que exige a presença de Engenheiros do Conhecimento para cada sistema.

6 - IMPLEMENTAÇÃO

6.1 Descrição da Proposta

Na Itaipu Binacional, assim como em outras empresas do setor elétrico, a maior aliada dos especialistas na tomada de decisão com base nos diagnósticos de falhas incipientes (defeitos) de transformadores de potência constitui-se na análise dos gases dissolvidos no óleo (DGA), e a interpretação dessa análise é realizada utilizando-se os métodos convencionais baseados nos principais critérios de diagnóstico consolidados descritas no CAPÍTULO 4. Entretanto, como apontado por THANG et al. (2000) esses métodos apresentam as seguintes desvantagens:

- As razões de gases definidos por esses critérios estão baseadas principalmente em julgamentos humanos. Nenhuma tentativa sistemática tem sido realizada para aprender a partir das medidas de DGA.
- Existe ainda um alto grau de inconsistência e ambigüidade quando se aplica esses critérios, devido à não consideração de todas as combinações possíveis das razões de gases.
- A existência de dúvidas na validade dos diagnósticos de falhas definidas pelas razões.
- Não são capazes de detectar com alta confiabilidade múltiplas falhas que ocorrem simultaneamente dentro do transformador.
- São incapazes de detectar falhas novas ou desconhecidas devido à carência do conhecimento dos especialistas dentro deles.

Neste trabalho é apresentado protótipo de um sistema especialista que implementa sete dos critérios mais conhecidos. Entretanto, também incorpora o conhecimento e a experiência dos especialistas representados em forma de regras de inferência para a emissão de outros diagnósticos complementares de

falha assim como as prováveis causas das mesmas e as providências a serem tomadas. Desta forma, o diagnóstico final é produzido baseando-se numa combinação do conhecimento do especialista e dos métodos convencionais de interpretação de DGA.

Na Figura 6.1 é apresentado o esquema da proposta aqui desenvolvida e as funções e significado de cada uma das partes são detalhadas na seqüência.

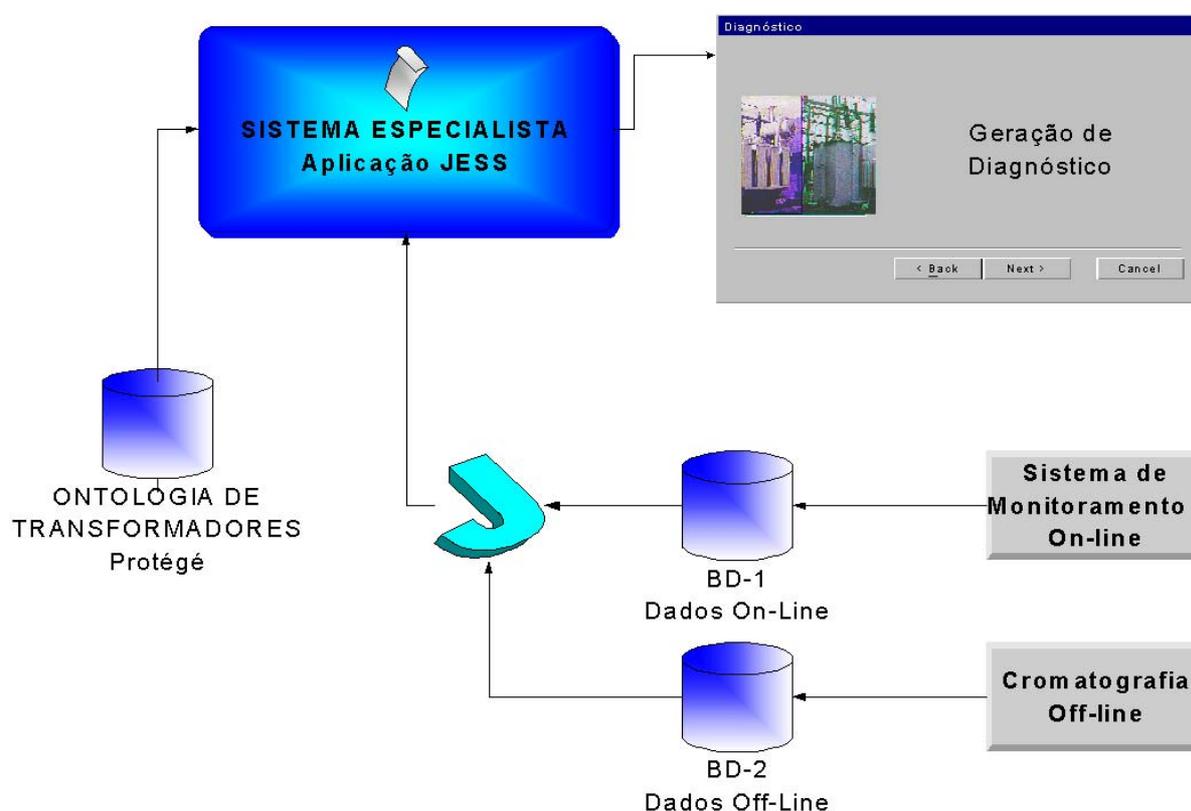


Figura 6.1 Esquema do sistema proposto

Na Figura 6.1 o BD-2 Dados Off-Line se refere ao banco de dados relacional, que contém o resultado dos ensaios da análise de gases dissolvidos no óleo dos transformadores principais dos geradores da Usina de Itaipu.

Neste banco encontram-se armazenados os resultados dos ensaios de cromatografia off-line, realizados nas amostras de óleo retiradas dos equipamentos durante as manutenções periódicas ou fora desses períodos quando alguma operação anormal é detectada. Na Tabela 6.1 é mostrada uma parte da base de dados do histórico de um dos transformadores utilizado como caso teste no protótipo.

Estes dados correspondem a um transformador que apresentava claramente no seu histórico o aumento gradativo dos gases dissolvidos no óleo, que o levaram ao ponto de causar uma falha, seguida de explosão com severas conseqüências no equipamento e nas vizinhanças da instalação do mesmo. Este fato é muito importante, já que possibilitou a confirmação dos resultados obtidos na execução do protótipo, uma vez comparada às discussões e conclusões dos especialistas da Itaipu e do fabricante constantes nos relatórios de inspeção na fábrica.

Neste protótipo os dados do BD-2 foram colocados na Base de Conhecimento modelada na forma de ontologia, com o intuito de comprovar a sua integração com o Sistema Especialista.

DATA	NUMERO SERIE	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
14/06/91	100296	50,0	24,0	12,0	12,0	3,0	2,0	8900	29950	180
28/06/91	100296	50,0	21,0	16,0	14,0	4,0	3,0	8300	30800	200
16/07/91	100296	50,0	9,0	13,0	15,0	3,0	4,0	5850	21150	170
28/08/91	100296	75,0	21,0	25,0	22,0	6,0	9,0	4650	18650	220
13/09/91	100296	75,0	27,0	35,0	29,0	10,0	10,0	6800	29400	330

Tabela 6.1 Análise cromatográfica, exemplo de dados (SOM, 1995)

Atualmente na Itaipu Binacional está em fase de implementação o sistema de monitoramento On-line das duas novas unidades geradoras 9A e 18A, o qual foi descrito brevemente no item 3.7.6. Uma vez implementado, os dados adquiridos por este sistema serão armazenados num banco de dados a exemplo do BD-1 Dados On-Line, cujo estado de mudança nos dados poderia ser utilizado como um "disparador" do sistema especialista, sob condições previamente definidas, assunto este proposto como trabalho futuro.

O Conversor de dados Java (J) tem a função de converter os dados contidos tanto no BD-2 Dados Off-Line, quanto no BD-1 Dados On-Line, para um formato interpretável pelo Jess, possibilitando a leitura e o processamento pelo Sistema Especialista (Aplicação Jess).

O sistema especialista então acessa as informações necessárias contidas na ONTOLOGIA DE TRANSFORMADORES Protégé para finalmente concluir com a Geração de Diagnóstico de falhas nos transformadores.

6.2 Escolha das Ferramentas

A escolha das ferramentas foi feita com base nas vantagens da utilização de Linguagens de Engenharia de Conhecimento no lugar de Linguagens de Programação. As ferramentas escolhidas foram Protégé 2000 e Jess (FRIEDMANN-HILL, 2002 e 2003) devido à sua portabilidade, disponibilidade e eficiência. Outra das razões da escolha foi a possibilidade da integração (HENRIK, 2003a e 2003b) da Base de Conhecimento com o Sistema Especialista, que processa as informações contidas nela, na forma de regras de inferência.

Propostas utilizando estas ferramentas de forma individual ou combinadas foram realizadas por FREITAS (2002), SARTOR (2002), DE ALMEIDA (2003) e SILVA (2003).

6.2.1 Protégé 2000

É uma ferramenta integrada de *software* (Protégé, 2000) utilizada por peritos para desenvolver sistemas baseados no conhecimento de domínios específicos, que possibilita a modelagem de conhecimentos na forma de ontologia. Assim essas aplicações são usadas para a solução de problemas de tomadas de decisão dentro de um determinado domínio de conhecimento.

O editor de ontologia Protégé permite uma integração do (1) domínio de uma ontologia de classes descrevendo um tema determinado, (2) a criação de uma ferramenta de aquisição de conhecimento para coletar o conhecimento, (3) a entrada de instâncias específicas de dados e a criação de uma base de conhecimento, e finalmente (4) a execução de aplicações.

A ferramenta para a aquisição de conhecimentos é desenhada para ser específica ao domínio, permitindo aos peritos do domínio estabelecer de maneira fácil e natural a base de conhecimento da área.

O pressuposto principal do Protégé é que os sistemas baseados em conhecimento costumam ser muito caros de ser elaborados e mantidos, isto porque o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento normalmente implica o esforço de uma equipe, incluindo tanto desenvolvedores quanto especialistas no domínio que poderão estar menos familiarizados com o *software* de computadores.

O Protégé foi projetado para guiar os desenvolvedores e especialistas de domínio no processo de desenvolvimento do sistema, permitindo aos mesmos reutilizar as ontologias e os métodos para a resolução de problemas, encurtando o tempo requerido para isto.

6.2.2 Jess - "Java Expert System Shell"

O Jess foi escrito por Ernest Friedman-Hill no Sandia National Laboratories (FRIEDMANN-HILL, 2002 e 2003), como parte de um projeto interno de investigação. Esta é uma ferramenta para construir um tipo de *software* inteligente denominado Sistemas Especialistas.

O mecanismo de inferência do Jess utiliza uma forma melhorada do algoritmo *Rete* para aplicar as regras à base de conhecimento. Este algoritmo faz com que o Jess seja muito mais rápido do que um simples conjunto de declarações SE-ENTÃO, localizados em cascata dentro de um laço. Jess foi concebido originalmente como um *clone* Java do CLIPS, mas hoje possui muitas características que o fazem diferente.

Este arcabouço pode ser utilizado de duas maneiras. Primeiro pode ser uma máquina de regras. Um programa baseado em regras pode ter centenas ou mesmo milhares de regras que o Jess aplica aos dados na forma de uma base de conhecimentos. Muitas vezes as regras representam o conhecimento heurístico de um especialista em algum domínio, e a base de conhecimento representa o estado de uma situação em evolução (uma entrevista, uma emergência). Neste caso se diz que representam um sistema especialista.

O Jess também é usado para fins gerais e ainda pode acessar diretamente todas as classes e bibliotecas Java. Por este motivo, é usado freqüentemente como um ambiente de desenvolvimento de aplicação rápida. No entanto, o código Java tem que ser compilado antes de poder ser executado; uma linha de código Jess é executada imediatamente após ser digitada. Isto permite experimentar interativamente com APIs Java e construir grandes programas de maneira incremental. Também resulta muito fácil estender a aplicação Jess com novos comandos escritos em Java ou em Jess mesmo, de maneira que esta pode ser adaptada com alterações para aplicações específicas.

Jess pode ser usado de muitas maneiras. Além das diferentes categorias de problemas nos quais Jess pode ser aplicado, por ser uma biblioteca, ele é capaz de ser usado em muitas classes diferentes de programas Java. Jess pode ser usado em aplicativos de linha de comando, aplicações *GUI*, *servlets*, e *applets*. Podem ser desenvolvidas aplicações Jess (com ou sem *GUIs*) sem compilar uma única linha de código Java. Pode-se escrever aplicações Jess que são controladas totalmente pelo código Java escrito, com um mínimo de código em Jess.

O passo mais importante no desenvolvimento de uma aplicação Jess consiste na seleção de uma arquitetura dentro de uma faixa de possibilidades, como é mostrado abaixo. Uma maneira de organizar as possibilidades consiste em colocá-las na lista segundo a quantidade crescente de programação Java envolvida.

- Escritos na linguagem Jess pura, sem nenhum código Java.
- Escritos na linguagem Jess pura, podendo acessar *APIs* Java.
- Grande parte escrito em Jess, mas algo de código Java sob a forma de novos comandos Jess escritos em Java.
- Parte escrita em Jess, com uma quantidade substancial de código Java fornecendo comandos especiais e *APIs*, sendo que o procedimento principal é controlado pelo Jess.
- Parte escrita em Jess, com uma quantidade substancial de código Java fornecendo comandos especiais e *APIs*, sendo que o procedimento principal é fornecido pelo próprio usuário.
- Preferencialmente código Java, que carrega menos procedimentos em Jess durante o tempo de execução do programa.
- Todo código Java, que manipula Jess totalmente através de seu Java

API. Esta opção não é plenamente suportada pela versão atual.

A seleção irá depender de muitos fatores, mas finalmente dependerá do que resulte mais cômodo ao usuário.

6.3 Desenvolvimento do Protótipo

Não existe uma metodologia estabelecida para a construção de um Sistema Especialista; entretanto, a filosofia de uma abordagem por refinamentos sucessivos, adotada para a elaboração desta proposta, está presente ao longo do desenvolvimento dos sistemas especialistas (RICH, 1983).

Neste trabalho foi feita a classificação e a modelagem do conhecimento na forma de ontologia utilizando a ferramenta Protégé 2000. Também foi desenvolvido o protótipo de um sistema especialista com o arcabouço Jess, para emissão de diagnóstico de falhas incipientes (defeitos) nos transformadores de potência da Itaipu Binacional, que poderá auxiliar os especialistas na tomada de decisões.

A implementação do aplicativo utiliza a linguagem Jess e as *APIs* do Protégé para Java, que processa as informações disponíveis na base de conhecimento modelada em Protégé 2000, atuando como motor de inferência para a geração dos diagnósticos necessários.

Neste protótipo do sistema especialista proposto, foram implementados os seguintes critérios de diagnóstico de falhas incipientes (defeitos) em transformadores de potência: Normas NBR7274/IEC/IEEE, Rogers, Laborelec, Pugh, Duval, Dörnemburg, bem como critério da relação de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), necessários para a geração dos diagnósticos sobre o envolvimento ou não da celulose nas falhas.

O conhecimento e a experiência dos especialistas em transformadores foram implementadas na forma de regras de inferência para a emissão de outros diagnósticos complementares, bem como as possíveis causas das falhas

incipientes e as providências necessárias para auxiliar na tomada de decisão sobre o estado operativo dos transformadores. Na seqüência são mostrados, a modo de exemplo algumas dessas regras.

Regra 1

SE Diagnóstico = Arco **E** sobreaquecimento da celulose,
ENTÃO Causas = 1- Curto circuito nos enrolamentos
2- Circuito aberto nos enrolamentos

Regra 2

SE Diagnóstico = Corona **E** sobreaquecimento da celulose,
ENTÃO Causas = 1- Distorção ou deslocamento do enrolamento

Regra 3

SE Diagnóstico = Arco **E** Corona **E** sobreaquecimento,
ENTÃO Causas = 1- Conexão do terminal de Bucha solto

Regra 4

SE Diagnóstico = Arco **E** Corona,
ENTÃO Causas = 1- Trocadores de calor sem água
2- Mistura excessiva no óleo
3- Partículas de metal flutuando

Regra 5

SE Diagnóstico = Corona
ENTÃO Causas = 1- Conexão da blindagem de Corona solta
2- Colar, espaçador, lâmina de aterramento do núcleo ou braçadeiras soltas
3- Partículas de metal flutuando

Regra 6

SE Diagnóstico = Sobreaquecimento da celulose

ENTÃO Causas = 1- Ponto quente perto da celulose

Regra 7

SE Diagnóstico = Sobreaquecimento da celulose **E** Sobre aq. do óleo

ENTÃO Causas = 1- Sobre carregamento do transformador.

A eventual necessidade de implementar mais critérios de diagnóstico assim como a inclusão de mais regras de inferência em base ao conhecimento heurístico dos especialistas, assim como a utilização de outras técnicas de IA (como Lógica Fuzzy e RNA) é apresentada como proposta de trabalhos futuros.

6.3.1 Regras de Produção em Jess

A seguir é mostrado um trecho do programa fonte, com o fim de destacar uma das regras do protótipo do sistema especialista, implementada em Jess. Esta regra consiste da implementação de um dos critérios de diagnóstico, especificamente o proposto pela norma IEC-60599. Na seção ANEXOS são mostrados outros trechos do programa fonte.

Esta regra dispara quando seu lado esquerdo (LHS) fica satisfeito, ou seja quando os fatos "fato_ensaio1" e "fato_ensaio2" contidos na base de conhecimento modelada em Protégé, são encontrados na lista dos fatos carregados na memória temporária. Uma vez satisfeita o LHS, o lado direito da regra (RHS) é executado para calcular as razões dos gases combustíveis dissolvidos (razão1, razão2 e razão3). Logo é atribuído um código de acordo aos valores das razões para ser gerada a tabela dos diagnósticos.

```

(defrule criterio_iec
  ?aux <- (executa_criterio_iec)
  ?ens1 <- (fato_ensaio1 $?x)
  ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
=>
  (if (= (nth$ 6 ?y) 0) then
    (bind ?razao1 0)
  else
    (bind ?razao1 (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y))) ; acetileno/etileno)
  (if (= (nth$ 7 ?y) 0) then
    (bind ?razao2 0)
  else
    (bind ?razao2 (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y))) ; metano/hidrogenio)
  (if (= (nth$ 4 ?y) 0) then
    (bind ?razao3 0)
  else
    (bind ?razao3 (/ (nth$ 6 ?y) (nth$ 4 ?y))) ; etileno/etano)
  (if (< ?razao1 0.1) then
    (bind ?codigo1 (str-cat 0))
  else
    (if (and (>= ?razao1 0.1) (< ?razao1 1)) then
      (bind ?codigo1 (str-cat 1))
    else
      (if (and (>= ?razao1 1) (< ?razao1 3)) then
        (bind ?codigo1 (str-cat 1))
      else
        (bind ?codigo1 (str-cat 2))))))
  (if (< ?razao2 0.1) then
    (bind ?codigo2 (str-cat 1))
  else
    (if (and (>= ?razao2 0.1) (< ?razao2 1)) then
      (bind ?codigo2 (str-cat 0))
    else
      (if (and (>= ?razao2 1) (< ?razao2 3)) then
        (bind ?codigo2 (str-cat 2))
      else
        (bind ?codigo2 (str-cat 2))))))
  (if (< ?razao3 0.1) then
    (bind ?codigo3 (str-cat 0))
  else
    (if (and (>= ?razao3 0.1) (< ?razao3 1)) then
      (bind ?codigo3 (str-cat 0))
    else
      (if (and (>= ?razao3 1) (< ?razao3 3)) then
        (bind ?codigo3 (str-cat 1))
      else
        (bind ?codigo3 (str-cat 2))))))
  (bind ?x (str-cat "NBR" ?codigo1 ?codigo2 ?codigo3))
  (assert (metodo ?x )))

```

Figura 6.2 Exemplo de regra no Jess, para o critério IEC

6.3.2 Entradas, Execução e Saída do Sistema

As entradas mais significativas do sistema especialista são os resultados (em ppm) dos ensaios cromatográficos de gás feitos na amostra de óleo isolante retirado dos equipamentos. Os resultados utilizados como caso teste estão armazenados na base de conhecimentos como atributos das instâncias da subclasse “cromatografico”, com o intuito de avaliar a integração entre a base de conhecimento e o Sistema Especialista.

Uma vez executado o SE, o usuário deve ingressar com o número de série, identificador principal do equipamento a ser analisado, o que ativa a regra “localiza_transformador” fazendo uma procura em profundidade nos fatos carregados na “memória de trabalho” disponibilizada uma vez carregada a base de conhecimento Protégé, modelada na forma de ontologia.

Seguidamente o usuário deve selecionar duas datas dos ensaios a serem analisados. O motor de inferência então faz o cálculo da taxa de crescimento dos gases combustíveis entre os dois ensaios analisados e se for menor do que 10%, não é emitida nenhuma recomendação de diagnóstico, caso contrário, se for superior a 10%, recomenda-se efetuar o diagnóstico da falha. Então, são “disparadas” as regras de processamento do sistema especialista para a emissão dos diagnósticos de falha segundo os seis critérios ou métodos implementados. Além disso, são mostrados também exemplos típicos de falhas e as providências a serem tomadas, quando disponíveis nos critérios. Adicionalmente a esses diagnósticos, o *software* ainda analisa os níveis dos gases monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), por meio da relação sugerida pela IEC, para verificar o envolvimento da celulose na falha.

Também são emitidos diagnósticos de falha complementares denominados “CRITÉRIO DE ESPECIALISTA”, assim como as causas e providências a serem tomadas em cada caso. Isto constitui as principais saídas, que irão auxiliar o especialista na tomada de decisão com relação ao estado operacional dos

transformadores.

6.3.3 Discussão e Apresentação dos Resultados

As falhas incipientes (defeitos) dos transformadores de potência estão longe de ser diagnosticadas com absoluta certeza a ponto de prevenir a evolução até a ocorrência das falhas. Este fato se ilustra nos casos de falhas da Tabela 3.2, cujas causas não foram totalmente esclarecidas, mesmo após realizada a inspeção e reparo em fábrica; fato este devido quase sempre à impossibilidade da inspeção exaustiva após o evento de falha, devido às seqüelas dos danos causados e especialmente quando acompanhada de explosão ou incêndio.

Muitas hipóteses podem ser levantadas com o intuito de explicar as causas da “morte súbita” dos transformadores, denominadas assim quando os indicadores de desempenho ou resultados da DGA não acusam a iminência da falha. Após discussões pelas equipes envolvidas na análise dos acontecimentos, uma provável causa levantada, no caso dos transformadores da Itaipu, seria o sistema de resfriamento tipo OFWF, especificamente as bombas de óleo dos trocadores de calor, do qual consta o projeto dos transformadores desse modelo, que podem estar ocasionando descargas eletrostáticas não detectadas pelo indicadores de desempenho ora utilizados. Esta hipótese ainda não foi devidamente investigada a ponto de ser afirmada ou comprovada, sendo necessárias mais pesquisas e estudo um sistemático e criterioso para sua confirmação.

A seguir são apresentadas algumas telas da base de conhecimento sobre transformadores nos quais, para fins de modelagem, foram utilizados os 54 transformadores principais dos geradores da Usina Hidrelétrica de Itaipu ora instalados, mais algumas unidades de reserva.

Na seção de ANEXOS, são mostradas mais telas, onde podem ser verificadas as informações correspondentes aos demais critérios assim como os correspondentes aos critérios dos especialistas.

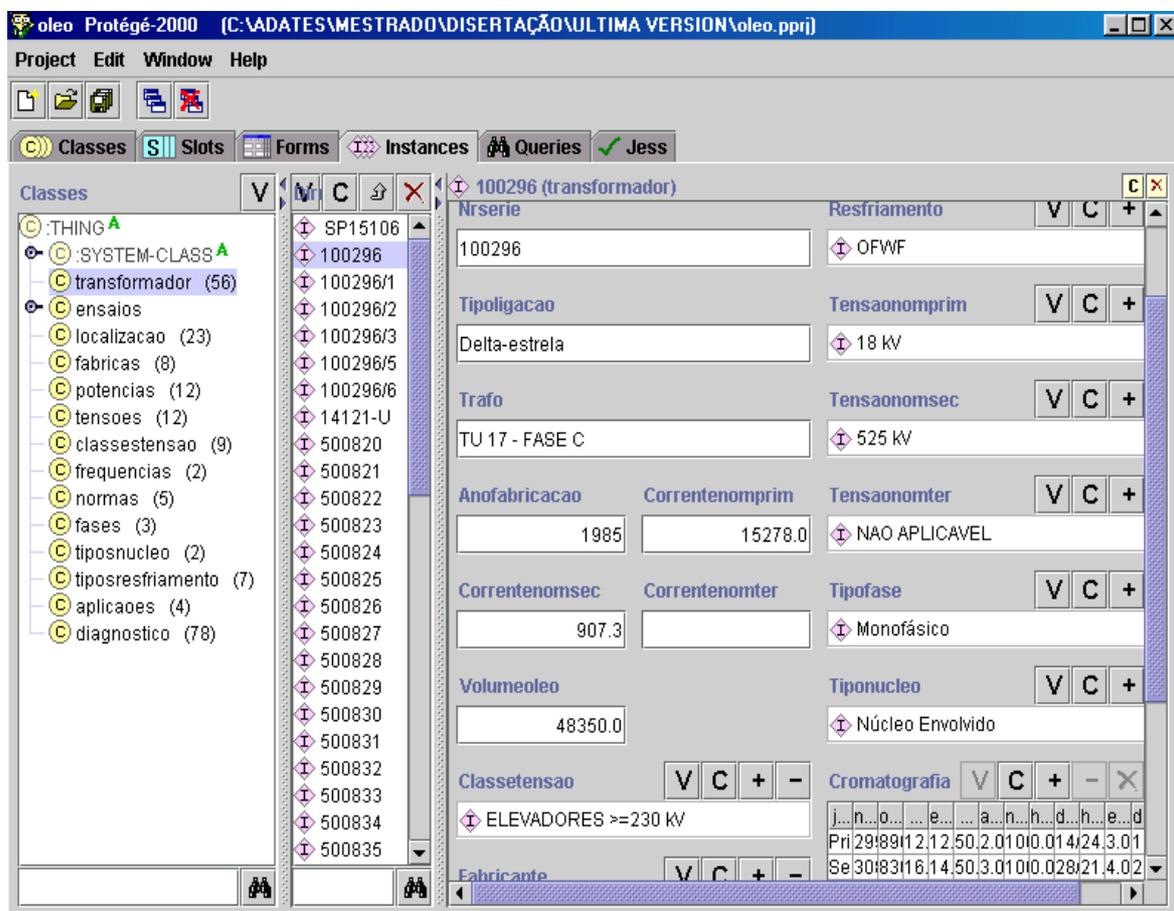


Figura 6.3 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "transformador"

Na figura 6.3, pode-se notar a classificação básica do domínio, sendo que de acordo com a aplicação a ser implementada as subclasses poderão facilmente expandir-se, fazendo uso de uma das principais vantagens da escolha da ferramenta e graças às características do Protégé.

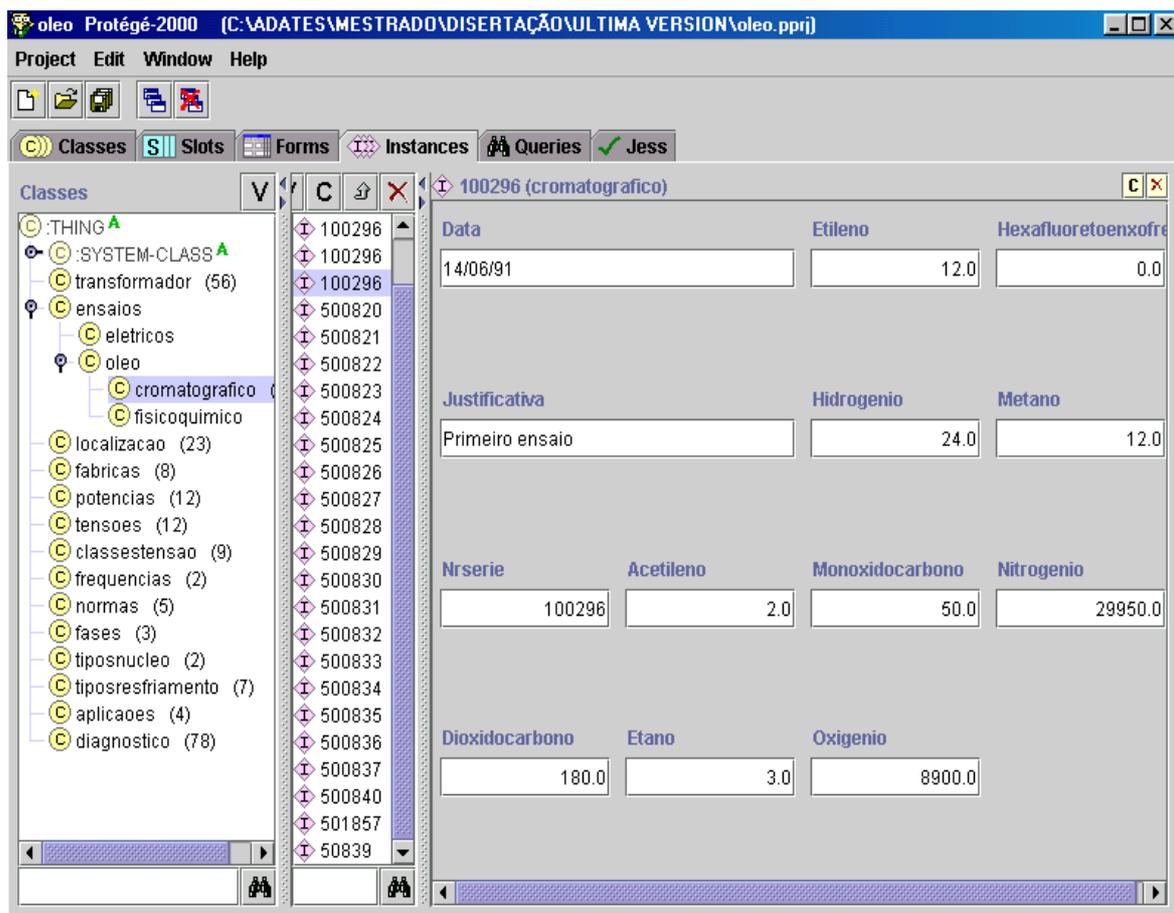


Figura 6.4 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "cromatografico"

Na figura 6.4, são mostradas várias instâncias da subclasse "cromatografico", com os valores dos atributos preenchidos com dados reais correspondentes aos ensaios de cromatografia de gás, realizados nos transformadores, identificados pelo seu número de série. Neste caso são mostrados os "slots" preenchidos com os dados do ensaio cromatográfico realizado no dia 14/06/1991 no transformador de número de série 100296, como primeiro registro no histórico desse equipamento, em caráter de ensaio inicial (vide atributo "Justificativa"). Estes dados foram utilizados no caso teste, cujos resultados são apresentados posteriormente.

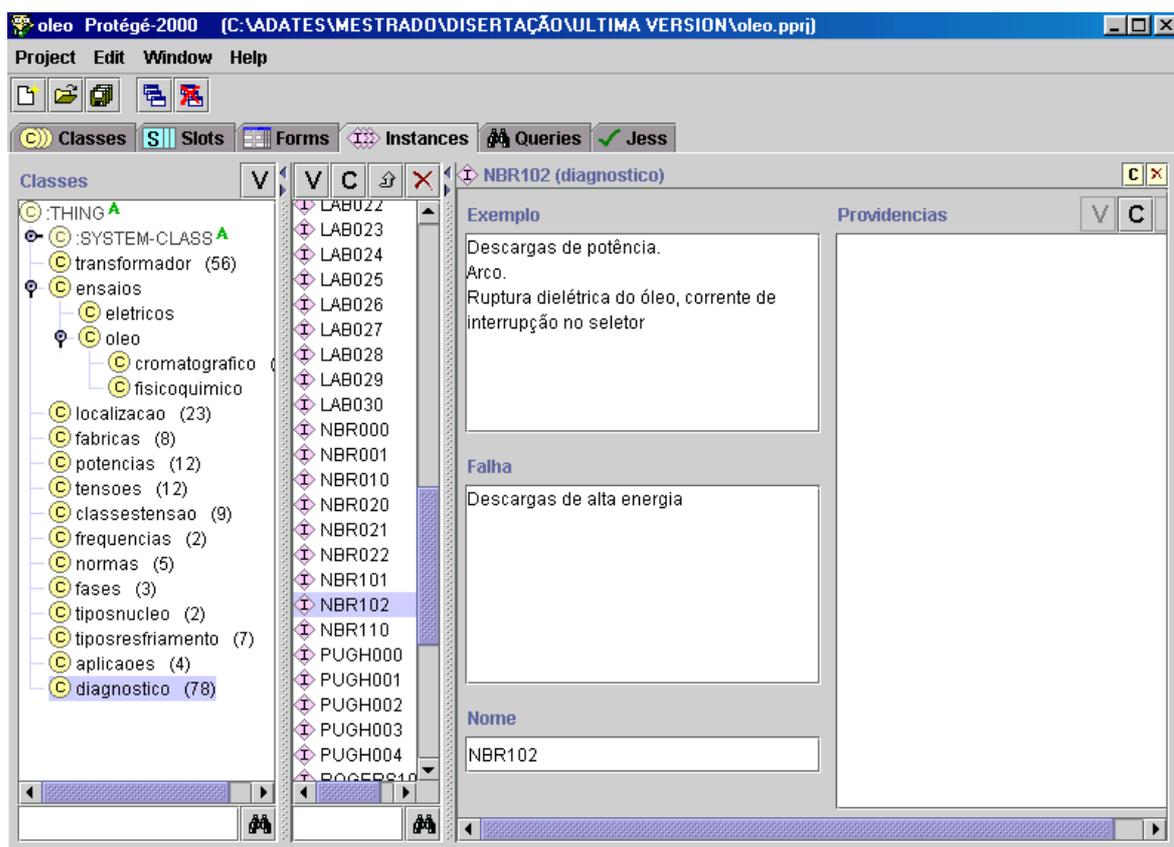


Figura 6.5 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

Na Figura 6.5 são mostradas algumas instâncias da classe "diagnóstico", com os quatro campos (Exemplo, Providencias, Falha e Nome) que determinam um diagnóstico de falha, neste caso correspondente ao critério NBR102 que mais adiante é exibido como resultado da execução do Sistema Especialista. Como pode ser notado, esta classe tem setenta e oito instâncias, e foram colocadas na ontologia Protégé por considerar que são informações estáticas. Com isto, foram poupadas perto de 800 linhas de programação em Jess, levando à conseqüente redução do tempo de execução, facilitando as futuras atualizações ou modificações da base graças às características peculiares do Protégé.

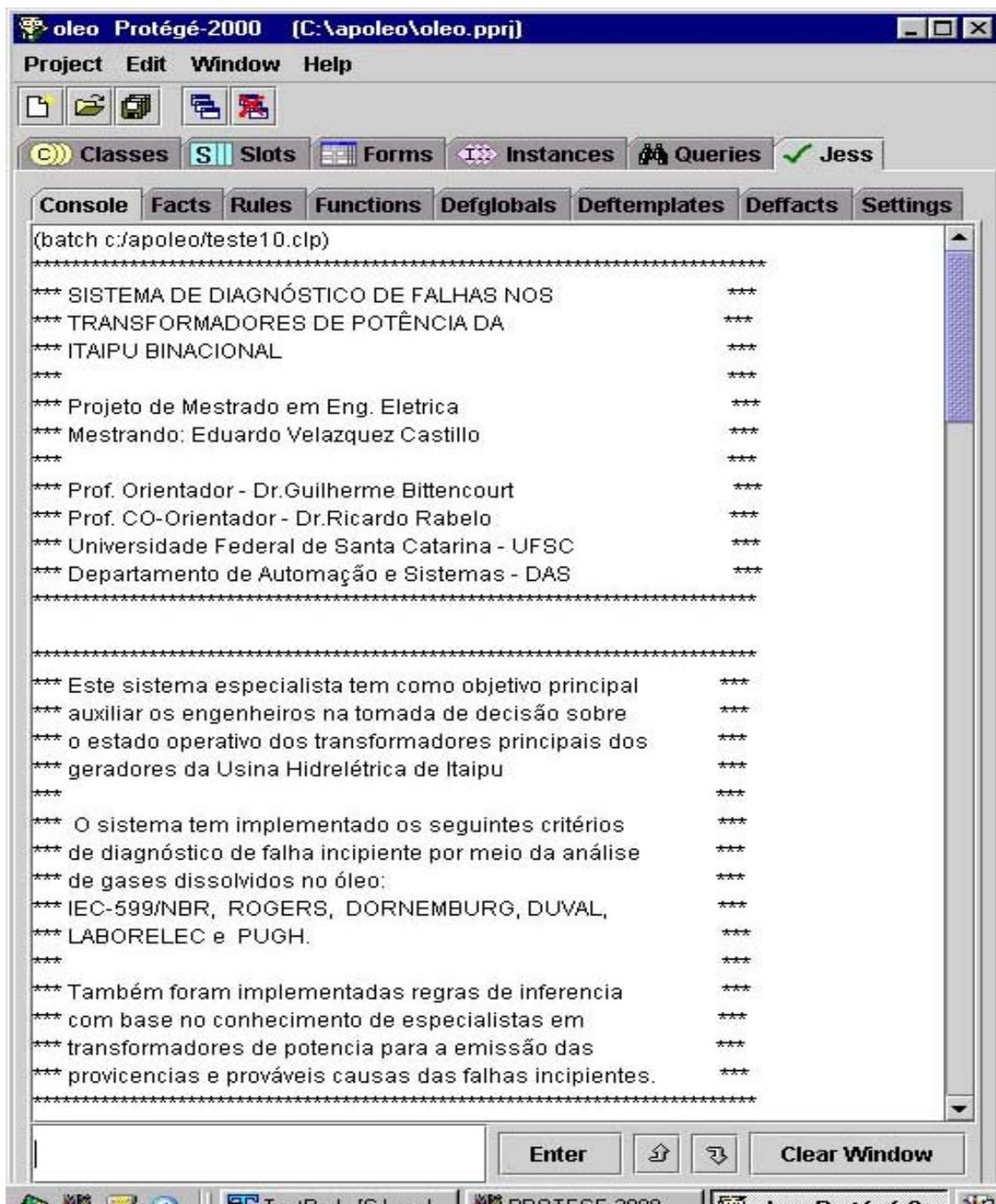


Figura 6.6 Saída do Sistema Especialista: Tela inicial de execução

Na figura 6.6 pode ser constatada a interação inicial do usuário com o sistema especialista. Isto é realizado diretamente a partir da Interface Homem Máquina (IHM) do Protégé graças ao *JessTab* (HENRIK 2003a e 2003b), que possibilita esta “integração” entre as duas ferramentas.

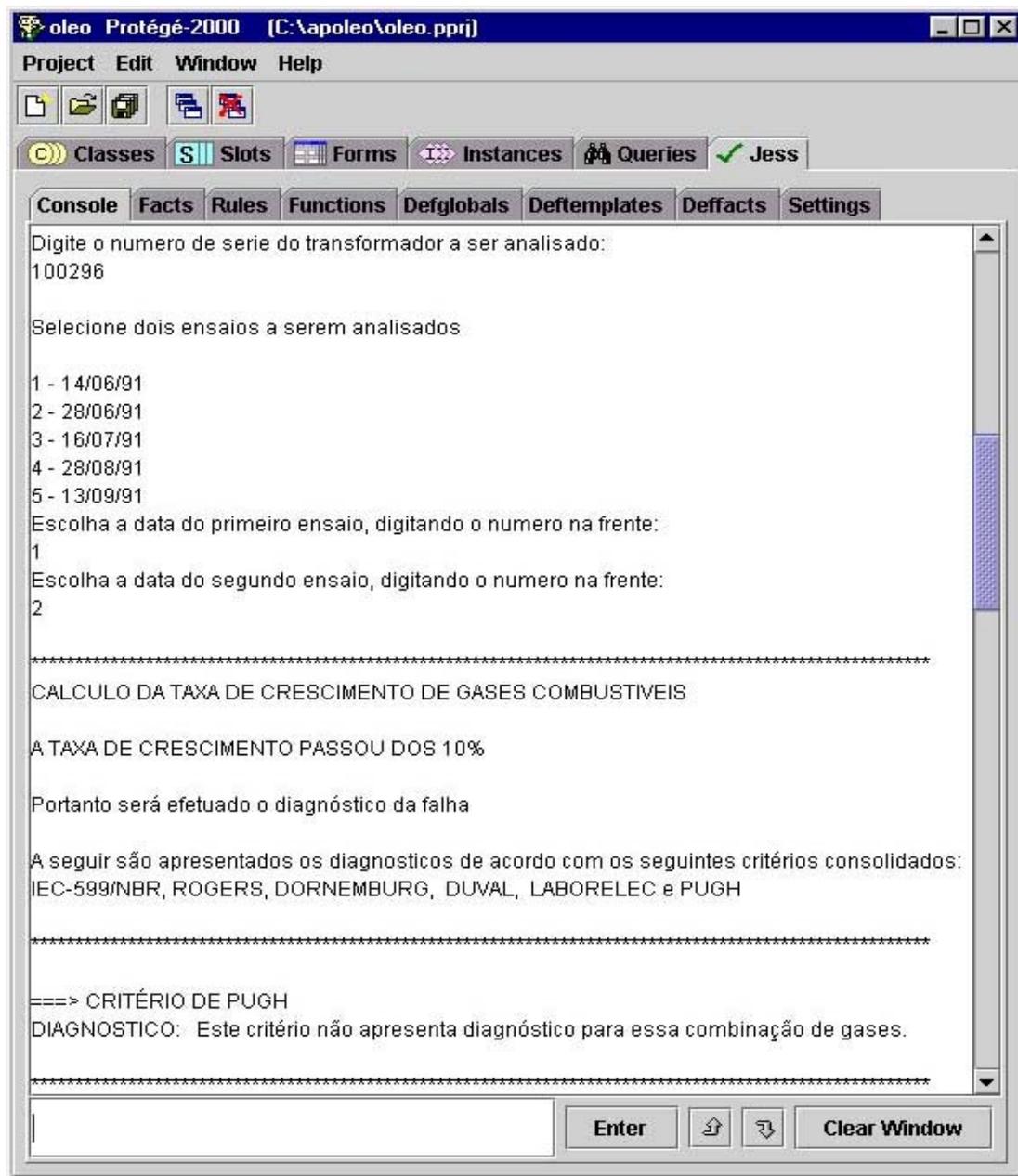


Figura 6.7 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos

Na figura 6.7 é mostrado que uma vez executado o Sistema Especialista Jess, o usuário deve ingressar com o número de série do transformador a ser analisado, neste caso o "100296". Na seqüência, o usuário deve escolher as duas datas dos ensaios cromatográficos cujos resultados serão analisados pelo sistema especialista. O resultado apresentado é que "A taxa de crescimento dos

gases combustíveis passou de 10%" e como consequência o SE emite a mensagem: "Recomenda-se efetuar o diagnóstico da falha".

Dando prosseguimento à execução do Sistema Especialista, seguidamente são mostrados os diagnósticos de falhas segundo cada um dos seis critérios de análise consolidados (Pugh, IEC/NBR, Rogers, Dörnemburg, Duval e Laborelec), como mostrado nas figuras 6.7 a 6.9. Estes resultados se referem exatamente aos valores dos "slots" das instâncias da classe diagnóstico. Com isto pode-se concluir que efetivamente o SE acessou os valores da base de conhecimento, ou seja, a ontologia modelada em Protégé, confirmando a integração entre ambas as ferramentas.

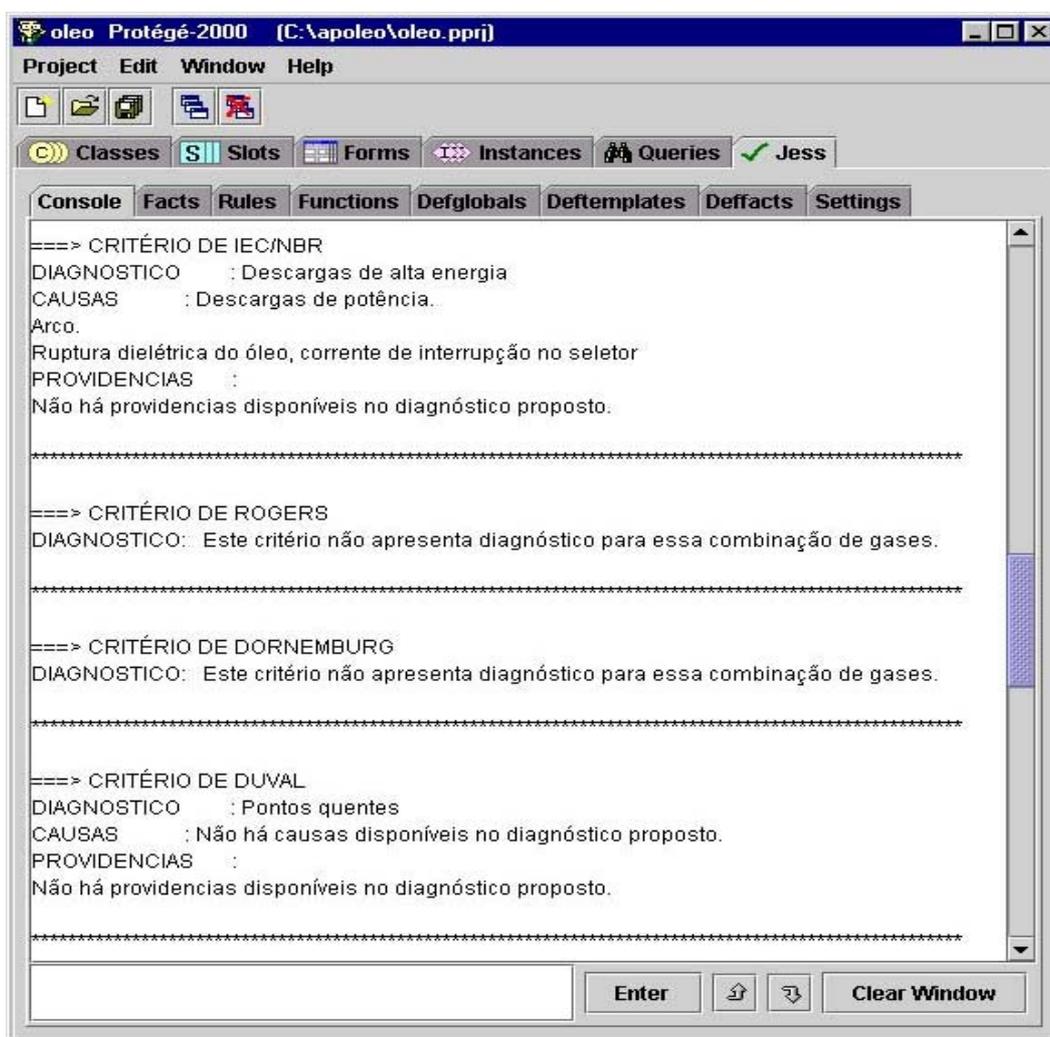


Figura 6.8 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos

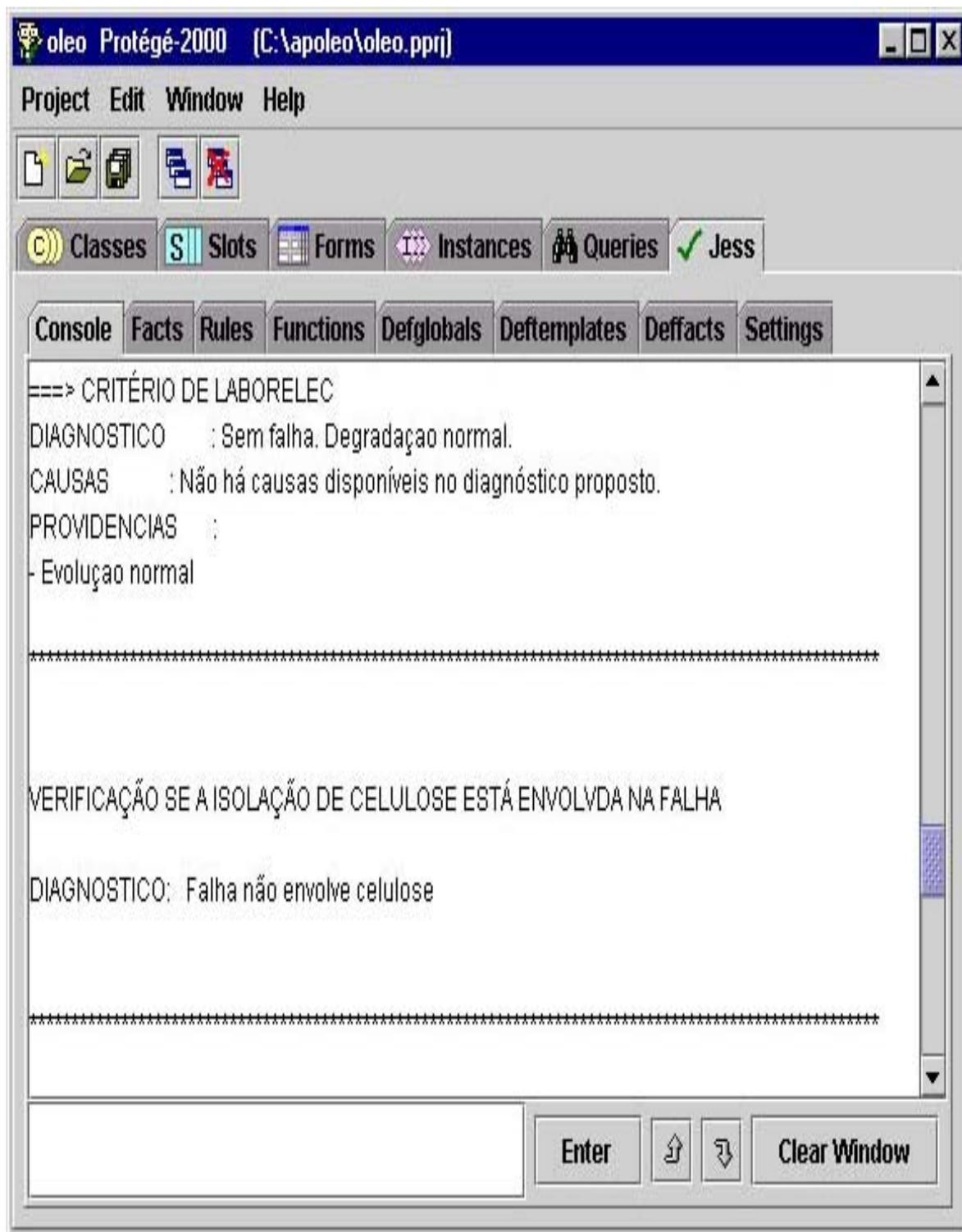


Figura 6.9 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos

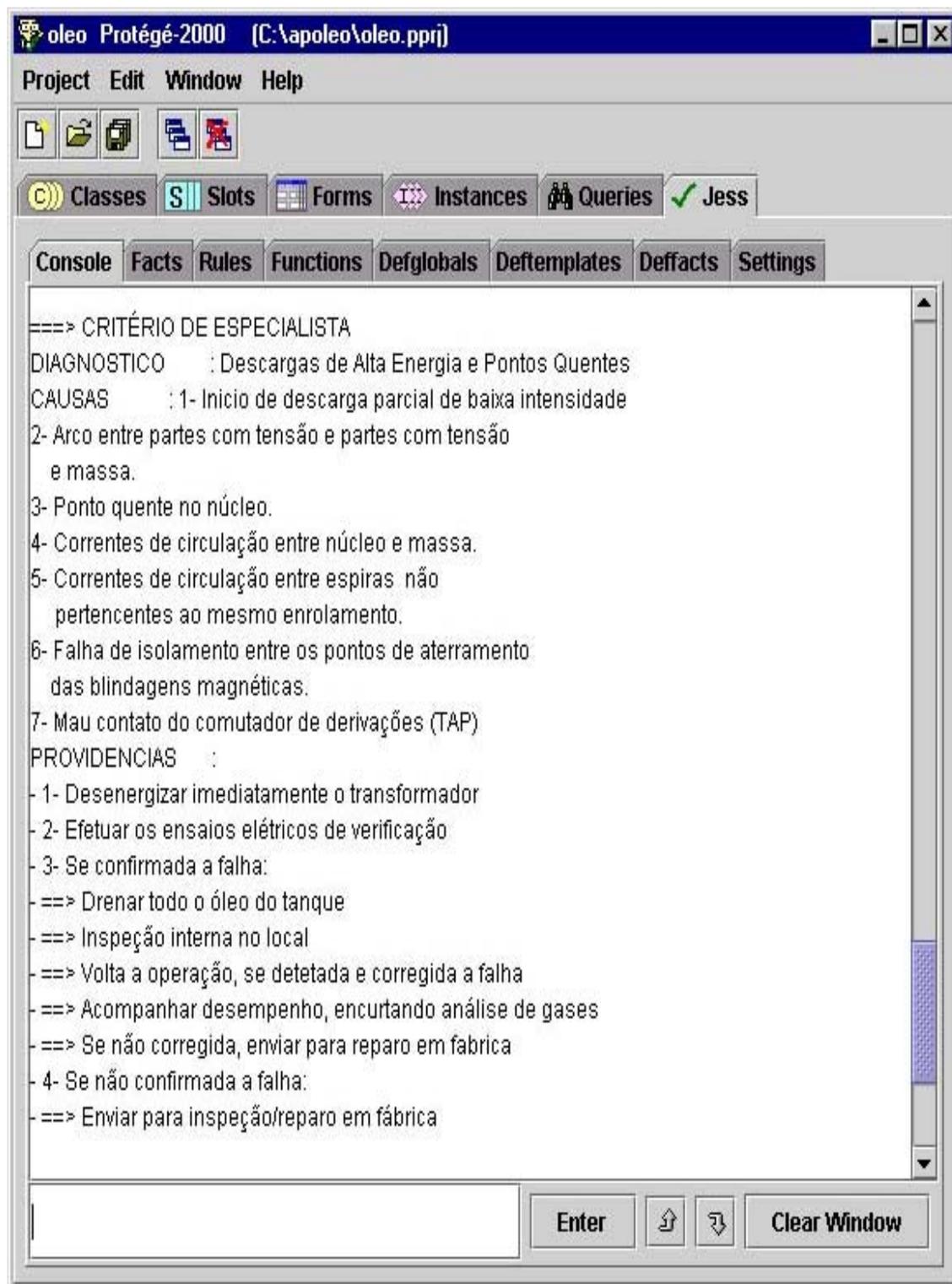


Figura 6.10 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos

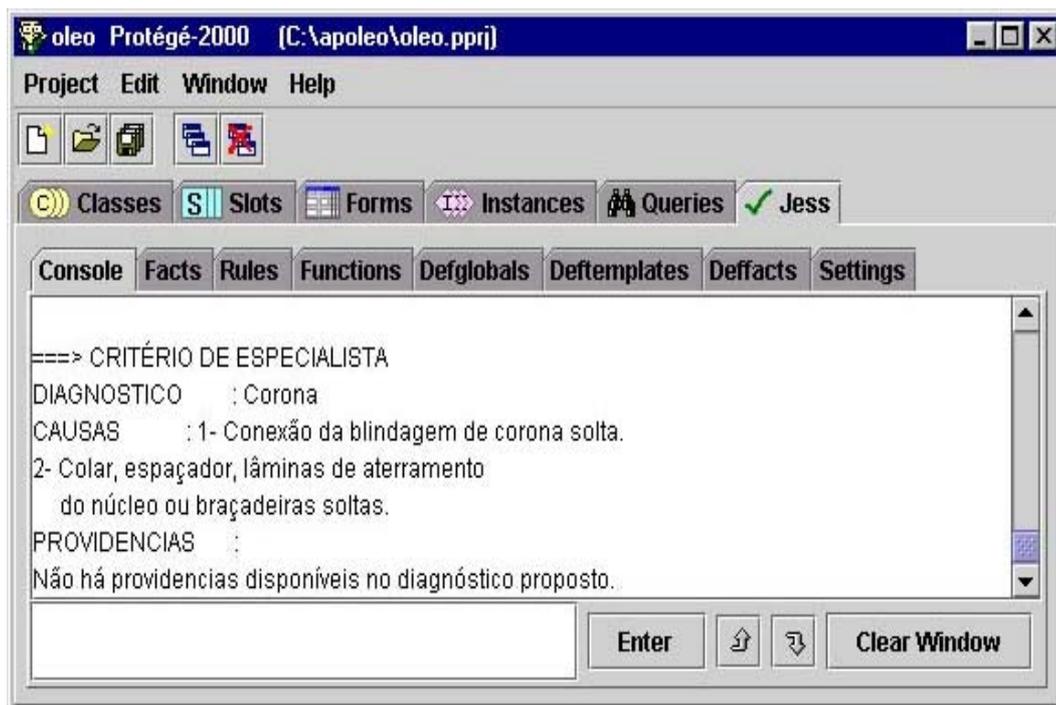


Figura 6.11 Saída do Sistema Especialista: Tela de diagnósticos

Como pode ser visto em alguns critérios de diagnóstico, no campo denominado "Exemplos" é mostrada a mensagem "Não há exemplos disponíveis no diagnóstico proposto"; similarmente no campo denominado "Providencias" é mostrada a mensagem "Não há providencias disponíveis no diagnóstico proposto", já que não foram considerados pelos critérios correspondentes. Por esse motivo e pelo fato de existirem vários diagnósticos quase sempre não coincidentes entre eles, no SE proposto foi acrescentado o conhecimento de profissionais com vasta experiência na área de transformadores (BISCHOFF, PRADENAS, SUÑÉ, SIHVENGER, 2003), com o intuito de complementar ditos diagnósticos. Esse conhecimento heurístico foi implementado neste protótipo em forma de regras de produção por considerar ser a forma de representação mais adequada, os diagnósticos resultantes são mostrados nas Figuras 6.10 e 6.11.

7 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se os resultados obtidos, discutidos no capítulo anterior conclui-se que:

1. A modelagem da base de conhecimento na forma de Ontologia é adequada para a classificação de transformadores, por tratar-se de informações normalmente expressas em termos lingüísticos, e a sua aplicação em sistemas deste tipo, fica justificada pela rapidez na elaboração e a possibilidade de reutilização em outras aplicações de interesse da empresa.

2. É possível uma eficiente integração entre o Sistema Especialista e a Base de Conhecimento, devido a que ambas as ferramentas, Jess e Protégé foram desenvolvidas na linguagem Java.

3. Com a utilização combinada das ferramentas Jess e Protégé, o tamanho do programa fonte do protótipo do SE proposto reduziu-se em aproximadamente oitocentas linhas de programação, pelo fato da maior parte das informações utilizadas pelo SE para a emissão dos diagnósticos, estarem armazenadas na Base de Conhecimento. Com isto a modificação, atualização e manutenção do SE poderão ser realizadas com relativa facilidade e rapidez levando ao conseqüente baixo custo do sistema.

4. Muito embora exista diversidade de opinião entre as empresas do setor elétrico em determinar qual ou quais critérios utilizar para a emissão de diagnósticos a partir da DGA, um SE, a exemplo do proposto aqui, pode auxiliar os especialistas de forma mais rápida e precisa na tomada de decisão em relação à "saúde" dos transformadores de potência, na medida que forem implementadas a maior quantidade de regras decorrentes do conhecimento e experiência dos especialistas.

5. Com relação ao envolvimento da celulose na falha usando a razão CO/CO₂, proposta pela IEC, é preciso muita cautela, já que nem sempre o

diagnóstico reflete a realidade, como confirmado durante a inspeção realizada na fábrica de um dos transformadores utilizado no caso teste.

6. Os resultados obtidos validaram a proposta, uma vez que a avaliação de desempenho feita no SE com relação à qualidade e coerência das respostas, bem como a integração com a base de conhecimento foi satisfatória.

Como propostas de trabalhos futuros podemos citar:

- Adaptar a Ontologia proposta neste trabalho para as demais áreas de interesse da Usina Hidrelétrica de Itaipu e de uma forma mais abrangente, para o sistema elétrico interligado nacional.

- Implementação de uma interface Java que permita ao SE utilizar os dados oriundos dos ensaios de cromatografia de gás *off-line* e do sistema de monitoramento *on-line*, e outras variáveis armazenadas em banco de dados convencional, utilizando como mecanismo de “disparo” do SE a mudança de estado em tempo real dos dados, oriundos do sistema de monitoramento atualmente em fase de implantação na Usina Hidrelétrica de Itaipu.

- Atualizar o SE, implementando mais regras de inferência geradas a partir do conhecimento e experiência dos especialistas, demais dados indicadores de desempenho, problemas levantados durante a inspeção na fábrica, históricos e resultados dos ensaios elétricos da manutenção e outros, visando gerar de uma forma automática diagnósticos e procedimentos mais completos e confiáveis.

- Fazer um estudo sistemático, criterioso e comparativo dos diversos métodos de DGA atualmente utilizados, visando propor critérios alternativos de diagnóstico de falhas incipientes, combinando várias técnicas de IA. Visto que é preciso adapta-los aos novos avanços de projeto, materiais e tecnologia hoje utilizados nos transformadores de potência, já que a maioria dos critérios consolidados foram gerados há mais de trinta anos com base na experiência em transformadores dessa época, que hoje podem não mais serem aplicados ou

devam ser considerados sob várias restrições.

- Em decorrência da conclusão de número cinco, avaliar a relação custo/benefício de utilizar vários pontos de retiradas de amostras de óleo dos transformadores. Já que existe a hipótese da discrepância entre o diagnóstico e a realidade, ser atribuída à dificuldade em se obter uma amostra homogênea dos gases em grandes volumes de óleo (30.000 a 42.000 litros) utilizados nos transformadores principais da Itaipu, visto que as amostras de óleo para análise atualmente são retiradas de um único ponto do tanque principal do transformador.

ANEXOS

ANEXO 1: Trechos do Protótipo Desenvolvido em JESS

A seguir é mostrado alguns trechos do programa fonte utilizados para a implementação do protótipo em Jess.

```
(clear)
(reset)
/watch activations)
/watch rules)
(load-package JessTab.JessTabFunctions)
(load-project c:/apoleo/OLEO.pprj)
(mapclass :THING)
; REGRA DE INICIO DO PROGRAMA
(defrule inicio
(declare (saliente 100))
=>
(printout t "*****" crlf)
(printout t "**** SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS NOS      ***" crlf)
(printout t "**** TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DA          ***" crlf)
(printout t "**** ITAIPU BINACIONAL                          ***" crlf)
(printout t "****                                             ***" crlf)
(printout t "**** Projeto de Mestrado em Eng. Eletrica          ***" crlf)
(printout t "**** Mestrando: Eduardo Velazquez Castillo        ***" crlf)
(printout t "****                                             ***" crlf)
(printout t "**** Prof. Orientador - Dr.Guilherme Bittencourt  ***" crlf)
(printout t "**** Prof. CO-Orientador - Dr.Ricardo Rabelo     ***" crlf)
(printout t "**** Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC ***" crlf)
(printout t "**** Departamento de Automação e Sistemas - DAS  ***" crlf)
(printout t "*****" crlf)

(printout t "*****" crlf)
(printout t "**** Este sistema especialista tem como objetivo principal ***" crlf)
(printout t "**** auxiliar os engenheiros na tomada de decisão sobre ***" crlf)
(printout t "**** o estado operativo dos transformadores principais dos ***" crlf)
(printout t "**** geradores da Usina Hidrelétrica de Itaipu          ***" crlf)
(printout t "****                                             ***" crlf)
(printout t "**** O sistema tem implementado os seguintes critérios ***" crlf)
(printout t "**** de diagnóstico de falha incipiente por meio da análise ***" crlf)
(printout t "**** de gases dissolvidos no óleo:                    ***" crlf)
(printout t "**** IEC-599/NBR, ROGERS, DÖRNEMBURG, DUVAL,          ***" crlf)
(printout t "**** LABORELEC e PUGH.                                  ***" crlf)
(printout t "****                                             ***" crlf)
(printout t "**** Também foram implementadas regras de inferencia ***" crlf)
(printout t "**** com base no conhecimento de especialistas em ***" crlf)
(printout t "**** transformadores de potencia para a emissão das ***" crlf)
(printout t "**** provicencias e prováveis causas das falhas incipientes. ***" crlf)
(printout t "*****" crlf)

(bind ?i 1)
(while (<= ?i 10) do
  (bind ?j 1)
  (while (<= ?j 100000) do
    (bind ?j (+ ?j 1)))
  (bind ?i (+ ?i 1)))
```

```

(printout t "Digite o numero de serie: " crlf)
(bind ?ajuda (read))
(bind ?x (str-cat ?ajuda))
(assert (mnumserie ?x))
; LOCALIZA O TRANSFORMADOR NO QUAL SERÁ FEITO O DIAGNÓSTICO
(defrule localiza_transformador "localiza o transformador no qual será feito o diagnóstico"
(mnumserie ?x)
; LOCALIZA UM EQUIPAMENTO E ATRIBUI AS VARIÁVEIS
?mtransf <- (object (is-a transformador)(nrserie ?x)(frequencia ?mfreq)(trafo ?xtrafo)(cromatografia
$?mcro))
=>
(bind ?mf (slot-get ?mfreq nome))
(bind ?tam (length$ $?mcro)); armazena a quantidade de ensaios existentes para este nrserie
(bind ?i 1)
(printout t crlf "selecione duas datas para serem analisadas" crlf)
(while (<= ?i ?tam) do
(printout t ?i " - " (slot-get (instance-address(nth$ ?i $?mcro)) data) crlf)
(bind ?i (+ ?i 1)))
(printout t "Digite o nr. da primeira data desejada: ")
(bind ?pdata (read))
(printout t "Digite o nr. da segunda data desejada: ")
(bind ?sdata (read))
(bind ?mdata1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) data))
(bind ?macetileno1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) acetileno))
(bind ?moxigenio1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) oxigenio))
(bind ?mdioxidocarbono1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) dioxidocarbono))
(bind ?mmetano1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) metano))
(bind ?metano1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) etano))
(bind ?mnitrogenio1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) nitrogenio))
(bind ?mmonoxidocarbono1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) monoxidocarbono))
(bind ?mhidrogenio1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) hidrogenio))
(bind ?metileno1 (slot-get (instance-address(nth$ ?pdata $?mcro)) etileno))
;(bind ?ensaio1 (create$ ?mhexafluoretoenxofre1 ?macetileno1 ?moxigenio1 ?mdioxidocarbono1
?mmetano1 ?metano1 ?mnitrogenio1 ?mmonoxidocarbono1 ?mhidrogenio1 ?metileno1))
(bind ?mdata2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) data))
;(bind ?mjustificativa2 (slot-get (instance-address(nth$ 2 $?mcro)) justificativa))
;(bind ?mhexafluoretoenxofre2 (slot-get (instance-address(nth$ 2 $?mcro)) hexafluoretoenxofre))
(bind ?macetileno2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) acetileno))
(bind ?moxigenio2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) oxigenio))
(bind ?mdioxidocarbono2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) dioxidocarbono))
(bind ?mmetano2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) metano))
(bind ?metano2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) etano))
(bind ?mnitrogenio2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) nitrogenio))
(bind ?mmonoxidocarbono2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) monoxidocarbono))
(bind ?mhidrogenio2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) hidrogenio))
(bind ?metileno2 (slot-get (instance-address(nth$ ?sdata $?mcro)) etileno))
;(bind ?ensaio2 (create$ ?mhexafluoretoenxofre2 ?macetileno2 ?moxigenio2 ?mdioxidocarbono2
?mmetano2 ?metano2 ?mnitrogenio2 ?mmonoxidocarbono2 ?mhidrogenio2 ?metileno2))

(assert (equipo ?mdata1 ?mdata2 ?macetileno1 ?moxigenio1 ?mdioxidocarbono1 ?mmetano1
?metano1 ?mnitrogenio1 ?mmonoxidocarbono1 ?mhidrogenio1 ?metileno1 ?macetileno2 ?moxigenio2
?mdioxidocarbono2 ?mmetano2 ?metano2 ?mnitrogenio2 ?mmonoxidocarbono2 ?mhidrogenio2
?metileno2)))

;CALCULO DA TAXA DE CRESCIMENTO DOSS GASES COMBUSTIVEIS

(defrule calcula-taxa-crescimento
?aux <- (equipo ?mdata1 ?mdata2 ?macetileno1 ?moxigenio1 ?mdioxidocarbono1
?mmetano1 ?metano1 ?mnitrogenio1 ?mmonoxidocarbono1 ?mhidrogenio1 ?metileno1 ?macetileno2
?moxigenio2 ?mdioxidocarbono2 ?mmetano2 ?metano2 ?mnitrogenio2 ?mmonoxidocarbono2
?mhidrogenio2 ?metileno2)
=>

```

```

(bind ?ensaio1 (create$ ?mdata1 ?macetileno1 ?mmetano1 ?metano1
?mmonoxidocarbono1 ?metileno1 ?mhidrogenio1 ?mdioxidocarbono1 ?mnitrogenio1 ?moxigenio1))
(bind ?ensaio2 (create$ ?mdata2 ?macetileno2 ?mmetano2 ?metano2
?mmonoxidocarbono2 ?metileno2 ?mhidrogenio2 ?mdioxidocarbono2 ?mnitrogenio2 ?moxigenio2))
(assert (fato_ensaio1 ?ensaio1))
(assert (fato_ensaio2 ?ensaio2))
(bind ?total 0)
(bind ?m1 (sub-string 4 5 (nth$ 1 ?ensaio1)))
(bind ?m2 (sub-string 4 5 (nth$ 1 ?ensaio2)))
(bind ?a1 (sub-string 7 8 (nth$ 1 ?ensaio1)))
(bind ?a2 (sub-string 7 8 (nth$ 1 ?ensaio2)))
(bind ?i ?a1)

```

; VERIFICA SE A TAXA DE CRESCIMENTO DOS GASES COMBUSTÍVEIS PASSOU DE 10% E ATIVA A REGRA QUE AVISA ISSO

```

(if (and (> (nth$ ?i ?taxa) 10) (<= ?i 7)) then
(assert (passou_taxa_dez_porcento)))
(bind ?i (+ ?i 1)))

(defrule aviso_maior_dez_porcento
?aux <- (passou_taxa_dez_porcento)
=>
(printout t crlf "*****")
(printout t "*****" crlf)
(printout t "CALCULO DA TAXA DE CRESCIMENTO DE GASES COMBUSTIVEIS" crlf
crlf)
(printout t "A TAXA DE CRESCIMENTO PASSOU DOS 10%" crlf crlf)
(printout t "Portanto será efetuado o diagnóstico da falha" crlf crlf)
(printout t "A seguir são apresentados os diagnósticos de acordo com os seguintes
critérios consolidados: " crlf)
(printout t "IEC-599/NBR, ROGERS, DÖRNEMBURG, DUVAL, LABORELEC, PUGH" crlf)
(assert (executa_criterio_especialista))
(assert (executa_criterio_laborelec))
(assert (executa_criterio_duval))
(assert (executa_criterio_Dörnemburg))
(assert (executa_criterio_rogers))
(assert (executa_criterio_iec))
(assert (metodo "PUGH005" "PUGH"))
(assert (executa_criterio_pugh))

```

; IMPLEMENTAÇÃO DO CRITERIO DÖRNEMBURG

```

(defrule criterio_Dörnemburg
?aux <- (executa_criterio_Dörnemburg)
?ens1 <- (fato_ensaio1 $?x)
?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
=>
(if (= (nth$ 7 ?y) 0) then
(bind ?razao1 0)
else
(bind ?razao1 (* (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 0.127)) ; metano/hidrogenio)
(if (= (nth$ 6 ?y) 0) then
(bind ?razao2 0)
else
(bind ?razao2 (* (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 1.44)) ; acetileno/etileno)
(if (= (nth$ 2 ?y) 0) then
(bind ?razao3 0)
else
(bind ?razao3 (* (/ (nth$ 4 ?y) (nth$ 2 ?y)) 0.47)) ; etano/acetileno)
(if (= (nth$ 7 ?y) 0) then
(bind ?razao4 0)
else
(bind ?razao4 (* (/ (nth$ 4 ?y) (nth$ 3 ?y)) 0.359)) ; etano/metano)

```

```

(if (and (and (and (> ?razao1 0.1) (< ?razao2 1)) (> ?razao3 0.2)) (< ?razao4 0.1)) then
  (bind ?codigo (str-cat "000"))
  else
    (if (and (and (and (and (>= ?razao1 0.01) (< ?razao1 0.1)) (> ?razao2 1)) (<
?razao3 0.2)) (> ?razao4 0.1)) then
      (bind ?codigo (str-cat "001"))
    else
      (if (and (and (< ?razao1 0.01) (> ?razao3 0.2)) (< ?razao4 0.1)) then
        (bind ?codigo (str-cat "010"))
      else

```

; DIAGNÓSTICO QUE VERIFICA SE ESTÁ ENVOLVIDA ISOLAÇÃO DE CELULOSE NA FALHA

```

(defrule analisar_teor_co_co2
  ?aux <- (analisa_teor_co_co2)
  ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y) ; este é o segundo ensaio entre os dois selecionados
=>
  (bind ?co (nth$ 5 ?y))
  (bind ?co2 (nth$ 8 ?y))
  (bind ?res (/ ?co2 ?co))
  (printout t crlf crlf "O próximo passo verifica se está envolvida isolação de celulose na
falha" crlf)
  (if (and (>= ?res 3) (<= ?res 11)) then
    (printout t crlf "Diagnóstico: Falha não envolve celulose")
  else
    (printout t crlf "Diagnóstico: Temperaturas elevadas perto da isolação de celulose"))
(run)

```

; IMPLEMENTAÇÃO DO CONHECIMENTO DO ESPECIALISTA

```

(defrule criterio_especialista
  (declare (salience -50))
  ?aux <- (executa_criterio_especialista)
  ?ens1 <- (fato_ensaio1 $?x)
  ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
=>
;(printout t "Entrou na regra do criterio ESPECIALISTA. e termina o programa" crlf crlf)
  (bind ?soma (+ (+ (nth$ 3 ?y) (nth$ 2 ?y)) (nth$ 6 ?y)))
  (bind ?soma1 (+ (+ (nth$ 3 ?y) (nth$ 2 ?y)) (nth$ 4 ?y)))
  (bind ?razao1 (* 100 (/ (nth$ 3 ?y) ?soma)))
  (bind ?razao2 (* 100 (/ (nth$ 2 ?y) ?soma)))
  (bind ?razao3 (* 100 (/ (nth$ 6 ?y) ?soma)))
  (assert (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)))
(defrule esp000
  (declare (salience 100))
  ?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
  ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
  ; Os tres testes seguintes verificam arco
  (test (and (>= ?razao1 0) (<= ?razao1 84)))
  (test (and (>= ?razao2 16) (<= ?razao2 100)))
  (test (and (>= ?razao3 0) (<= ?razao3 84)))
  ; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento da celulose
  (test (<= (nth$ 7 ?y) 200))
  (test (<= ?soma1 300))
  (test (> (nth$ 5 ?y) 400))
=>
  (bind ?x "ESP000")
  (assert (metodo ?x "ESPECIALISTA")))
(defrule esp001
  (declare (salience 100))
  ?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
  ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
  ; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento da celulose

```

```

(test (<= (nth$ 7 ?y) 200))
(test (<= ?soma1 300))
(test (> (nth$ 5 ?y) 400))
; Os tres testes seguintes verificam corona
(test (> (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 0.1))
(test (and (> (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 0.1) (< (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 1)))
(test (> (/ (nth$ 6 ?y) (nth$ 4 ?y)) 1))
=>
(bind ?x "ESP001")
(assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
(defrule esp002
(declare (salience 100))
?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento da celulose
(test (<= (nth$ 7 ?y) 200))
(test (<= ?soma1 300))
(test (> (nth$ 5 ?y) 400))
; Os tres testes seguintes verificam corona
(test (> (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 0.1))
(test (and (> (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 0.1) (< (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 1)))
(test (> (/ (nth$ 6 ?y) (nth$ 4 ?y)) 1))
; Os tres testes seguintes verificam arco
(test (and (>= ?razao1 0) (<= ?razao1 84)))
(test (and (>= ?razao2 16) (<= ?razao2 100)))
(test (and (>= ?razao3 0) (<= ?razao3 84)))
=>
(bind ?x "ESP002")
(assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
(defrule esp003
(declare (salience 100))
?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
; Os tres testes seguintes verificam corona
(test (> (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 0.1))
(test (and (> (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 0.1) (< (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 1)))
(test (> (/ (nth$ 6 ?y) (nth$ 4 ?y)) 1))
; Os tres testes seguintes verificam arco
(test (and (>= ?razao1 0) (<= ?razao1 84)))
(test (and (>= ?razao2 16) (<= ?razao2 100)))
(test (and (>= ?razao3 0) (<= ?razao3 84)))
=>
(bind ?x "ESP003")
(assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
(defrule esp004
(declare (salience 100))
?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
; Os tres testes seguintes verificam corona
(test (> (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 0.1))
(test (and (> (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 0.1) (< (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 1)))
(test (> (/ (nth$ 6 ?y) (nth$ 4 ?y)) 1))
=>
(bind ?x "ESP004")
(assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
(defrule esp005
(declare (salience 100))
?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento da celulose
(test (<= (nth$ 7 ?y) 200))
(test (<= ?soma1 300))

```

```

=> (test (> (nth$ 5 ?y) 400))

(bind ?x "ESP005")
(assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
(defrule esp006
  (declare (saliency 100))
  ?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
  ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
  ; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento da celulose
  (test (<= (nth$ 7 ?y) 200))
  (test (<= ?soma1 300))
  (test (> (nth$ 5 ?y) 400))
  ; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento do oleo
  (test (<= (nth$ 7 ?y) 300))
  (test (and (>= (+ (+ (nth$ 3 ?y) (nth$ 2 ?y)) (nth$ 4 ?y)) 301) (<= (+ (+ (nth$ 3 ?y) (nth$ 2
?y)) (nth$ 4 ?y)) 400)))
  (test (<= (nth$ 2 ?y) 20))
  (test (<= (nth$ 5 ?y) 400))

=>
  (bind ?x "ESP006")
  (assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
  (defrule esp007
    (declare (saliency 100))
    ?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
    ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
    ; Os tres testes seguintes verificam sobreaquecimento do oleo
    (test (<= (nth$ 7 ?y) 300))
    (test (and (>= (+ (+ (nth$ 3 ?y) (nth$ 2 ?y)) (nth$ 4 ?y)) 301) (<= (+ (+ (nth$ 3 ?y) (nth$ 2
?y)) (nth$ 4 ?y)) 400)))
    (test (<= (nth$ 2 ?y) 20))
    (test (<= (nth$ 5 ?y) 400))

=>
  (bind ?x "ESP007")
  (assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))
  (defrule esp008
    (declare (saliency 100))
    ?aux <- (valores_esp ?razao1 ?razao2 ?razao3 ?soma1)
    ?ens2 <- (fato_ensaio2 $?y)
    ; Os tres testes seguintes verificam Descargas de alta energia
    (test (and (> (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 0.1) (< (/ (nth$ 2 ?y) (nth$ 6 ?y)) 3)))
    (test (and (> (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 0.1) (< (/ (nth$ 3 ?y) (nth$ 7 ?y)) 1)))
    (test (> (/ (nth$ 6 ?y) (nth$ 4 ?y)) 1))
    ; Os tres testes seguintes verificam Pontos Quentes
    (test (and (>= ?razao1 0) (<= ?razao1 96)))
    (test (and (>= ?razao2 0) (<= ?razao2 16)))
    (test (and (>= ?razao3 0) (<= ?razao3 100)))

=>
  (bind ?x "ESP008")
  (assert (metodo ?x "ESPECIALISTA"))

```

ANEXO 2: Telas de Saída do Sistema

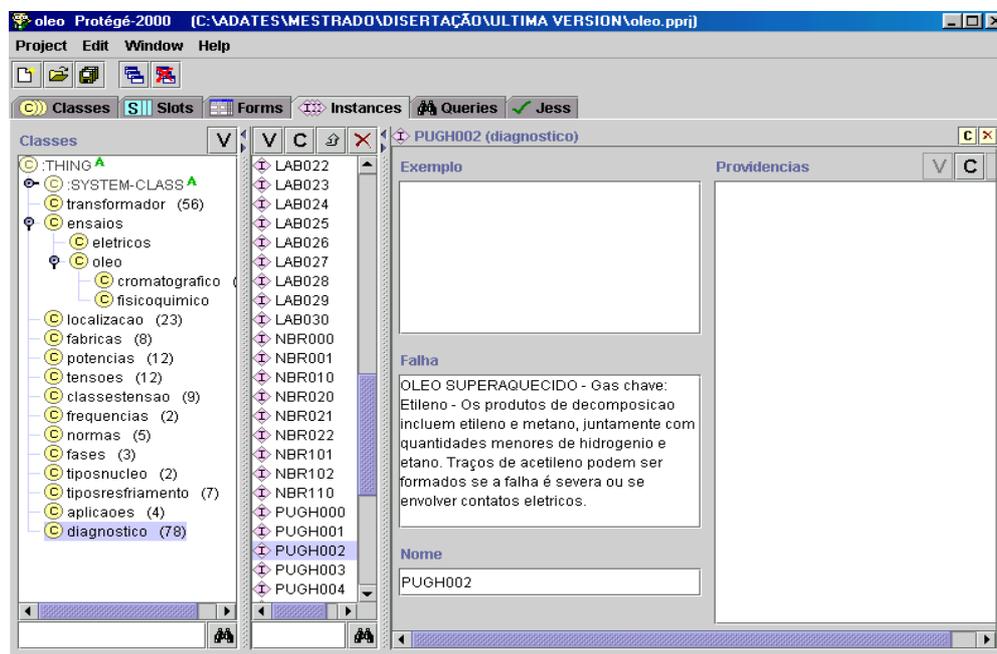


Figura 8.1 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

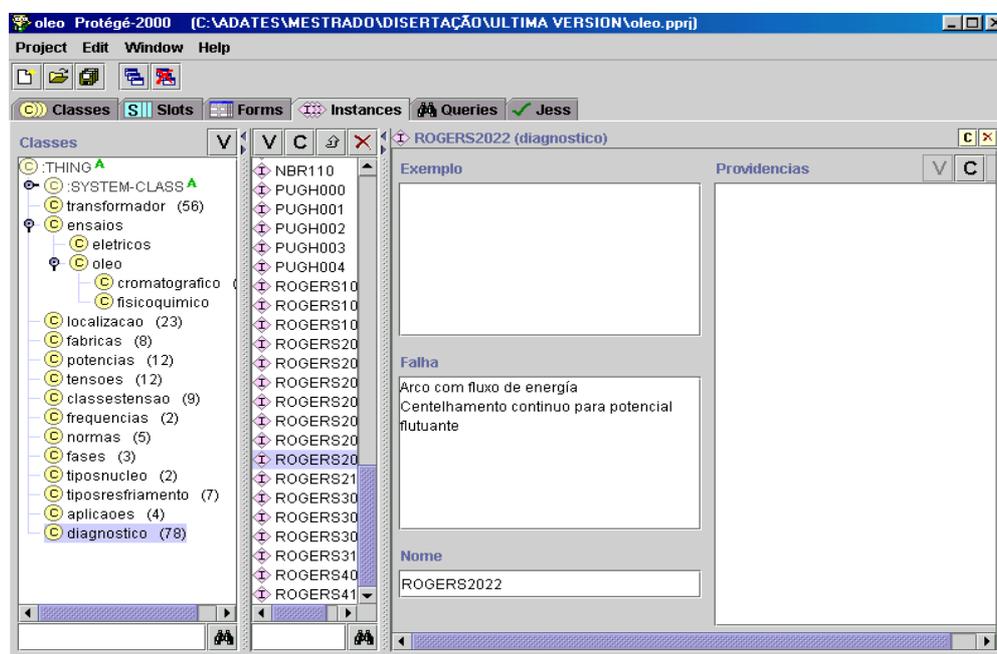


Figura 8.2 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

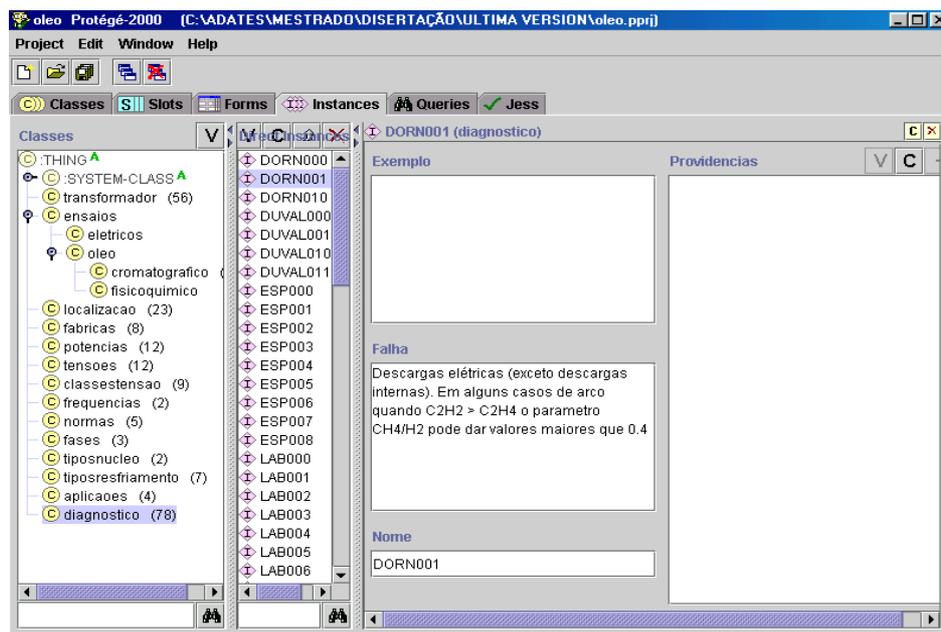


Figura 8.3 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

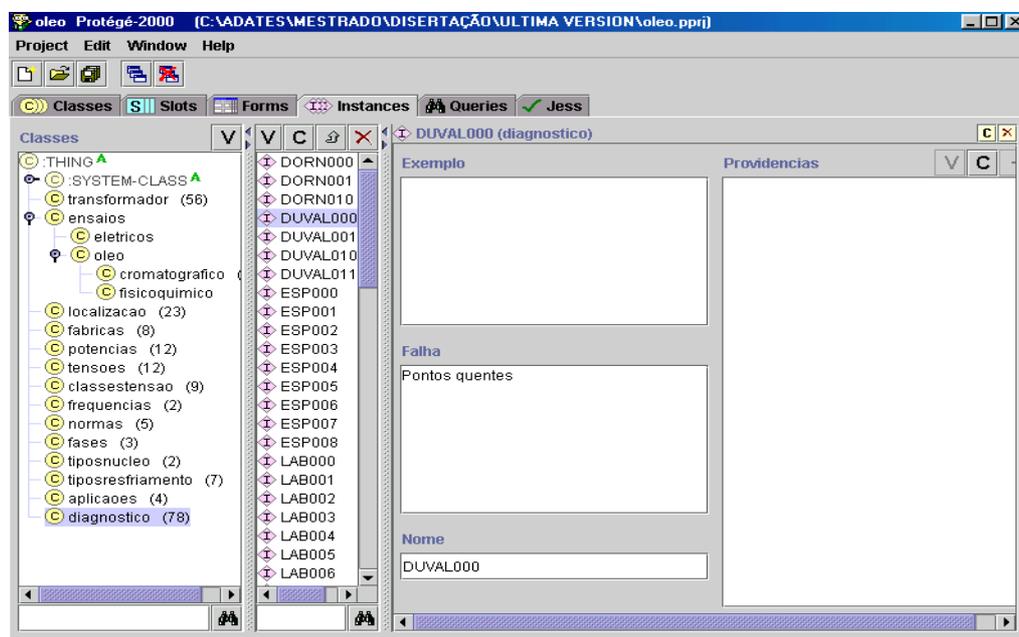


Figura 8.4 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

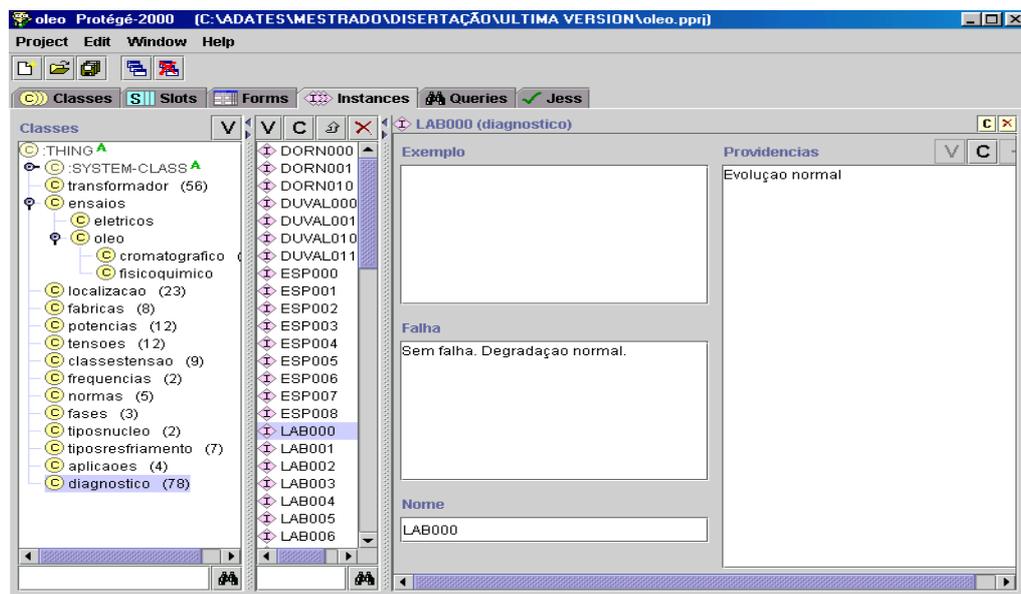


Figura 8.5 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

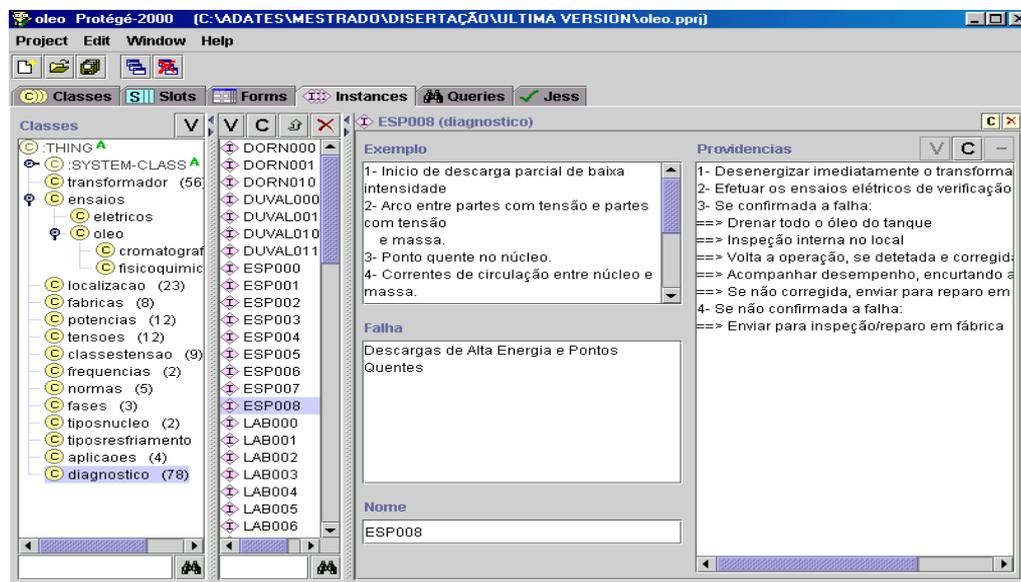


Figura 8.6 Tela da ontologia Protégé: Instâncias da classe "diagnóstico"

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, M. B.; YAACOB, Z. *Dissolved Gas Analysis Using Expert System*. Proceedings of 2002 Student Conference on research and Development . March, 2002, Shah Alam, Malaysia, pp. 313-316.
- BERBARAS, A., LARESGOITI, I., BARTOLOME, N. et al. *An Ontology for Fault Diagnosis in Electrical Networks*. Intelligent Systems Applications to Power Systems. Proceedings, ISAP'96, 28 Jan.-2 Feb.1996. pp. 199-203.
- BIRLASEKARAN, S., XINGZHOU, Y., FETHERSTONE, F. et al. *Diagnosis and Identification of Transformer Faults from Frequency Response Data*. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 3, 23-27 Jan. 2000 pp. 2251 -2256.
- BISCHOFF, H. CONTATO PESSOAL CONSULTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA. São Paulo BR. goalene@terra.com.br. (julio de 2003).
- BITTENCOURT, G. *Inteligência Artificial – Ferramentas e Teorias*. Editora da UFSC – Florianópolis, 1998.
- BO, Z.Q., AGGARWAL R.K. and JOHNS, A.T. *A Novel Measurement Technique for Power Transformer Faults Using Spectral Comparison Technique*. Electrotechnical Conference, 1996. MELECON'96. 8th Mediterranean, 13-16 May 1996, pp.1179-1182,vol.3
- CHANDRASEKARAN, B.; JOSEPHSON, J.R.; BENJAMINS, V.R. *What are ontologies, and why do we need them?*. Intelligent Systems, IEEE, Vol. 14, Issue:1, Jan.-Feb.1999. pp. 20 -26.
- COURDEC, D.; BOURASSA, P. and MUIRAS, J.M. *Gas-in-oil Criteria for the Monitoring of Self-contained Oil-filled Power Cables*. IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, october 20-23, 1996.
- DA SILVA, I. N.; DE SOUZA, A. N.; ULSON, J.; et al. *Técnicas de Sistemas inteligentes Aplicadas na Identificação do Envelhecimento de Transformadores*. XVI SNTPEE-Seminário Nac. de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 21-26 de out. 2001, Campinas-SP, Brasil.
- DE ALMEIDA Jr, C. *Sistema Especialista para Diagnóstico de Problemas no Sistema de Geração de Energia Elétrica de uma Refinaria de Petróleo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC - Brasil, Julho 2002.
- DENGHUA, M. *A New Fuzzy Information Optimization Processing Technique for Monitoring the Transformer*. Dielectric Materials, Measurements and Applications. Conference Publication No. 473. IEE 2000, pp. 192-195.
- DORNENBURG, E. e STRITTMATER, W. *Monitoring Oil Transformers by Gas Analysis*. Brown Boverly Review, 61, 1974, pp. 238-274.

- DUKARM, J.J. *Transformer Oil Diagnosis Using Fuzzy Logic and Neural Networks*. Electrical and Computer Engineering. Canadian Conference on, 14-17 Sept. 1993. CCECE/CCGEI'93. IEEE. pp. 329-332.
- Engineering Features Itaipu: Hydroelectric Project, Curitiba-PR. Itaipu Binacional. 1994.
- FARROKHI, M. and RAFIEE, M. *Evaluation of Used and Repaired Power Transformers Using Neural Networks*. Proceedings of the IEEE. Nov. 2001, pp. 143-146.
- FREITAS, F.L. *Sistemas Multiagentes Cognitivos para a Recuperação, Classificação e Extração Integradas de Informação da WEB*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC - Brasil, Agosto 2002.
- FRIEDAMN-HILL, E.J. *JESS IN ACTION, Rule-Based System in Java*. Manning Publications Co. Greenwich, CT - USA, 2003.
- FRIEDAMN-HILL, E.J. *Jess, The Java Expert System Shell. User's Guide*. <http://www.herzberg.ca.sandia.gov/jess> (current Dec. 10, 2002).
- GAO, N. ; YAN, Z. *New Approach on Comprehensive Diagnosis of Insulation Faults in Power Transformer*. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, Ma USA, April 7-10, 2002, pp. 203-206.
- GOURISHANKAR, V. *Conversión de Energía Electromecánica - capítulo 4. Ediciones Alfaomega. México, 1990*.
- HENRIK, E. Using JessTab to Integrate Protégé and Jess. Published by the IEEE Computer Society. March/April 2003
- HENRIK, E. Using JessTab Manual - Integration of Protégé and Jess. Linköping University Germany. Febreary 10, 2003. her@ida.liu.se
- HUNEAULT, M.; ROSU, C.; MANOLIU, R.; et al. *A Study of Knowledge Engineering Tools in Power Engineering Applications*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, Nov 1994, pp. 1825-1832.
- ISLAM, S.M. and LEDWICH G. *Locating Transformer Faults Through Sensitivity Analysis of High Frequency Modeling Using Transfer Function Approach*. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.
- JUNQUEIRA, A. F; SILVA, A. P. H.; GRIMONI, J. A. B; et al. *Monitoramento e Sistema Especialista para diagnóstico de equipamentos de subestações XVI SNPTEE-Seminário Nac. de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. 21-26 de out. 2001, Campinas-SP, Brasil.
- KIRTLEY, J. L. Jr. ; HAGMAN, W.H.; LESIEUTRE, B. C. et al. *Monitoring the Health of Power Transformers*. IEEE Computers Application in Power, 1996,

pp. 18 - 23.

- KUMBHAT, M.; AMMAR, H. H.; CHOUDHRY, M. A. *The Application of Fuzzy Logic to the Design of on-line Monitoring Systems*. Proceedings of the IEEE. Nov. 1992, pp. 1036-1039.
- LIAO, R.; Yao, C.; Sun, C.; et al. *Blackboard Expert System of Multi-Expert Cooperating Diagnosis for Transformers Insulation*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, May 2001, pp. 809-812.
- LIN, C.E.; LING, J.M.; HUANG, C.L.. *An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 231-238.
- MARKS, J. Substation Monitoring and Diagnostics. *Electrical World*, Nov/Dec. 1999, pp. 16-21.
- MILASCH, M. *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*. Edgar Blücher; Itajubá - MG; Escola Federal de Engenharia, 1984.
- MIZEGUSHI, R. *A Expert Systems Research in Japan*. 1995 IEEE. pp. 14-23.
- MOKOHTARI, S.; SINGH, J.; WOLLENBERG, B., - A Unit Commitment Expert System – IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, February 1988, pp. 272-277
- NBR 7274. *Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Abril, 1982.
- NUNES, E.L. *Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise da Implantação em uma Sistemática de Manutenção Preventiva Consolidada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC - Brasil, Outubro 2001.
- PING, Z.; SHIHENG, X. *A Fuzzy Logic Expert System for Fault Diagnosis and Security Assessment of Power Transformers*. Proceedings of the IEEE. Int'l Conf. on Tools with AI, Boston, Massachusetts, Nov. 1993, pp. 480-481.
- PISA, L.F. CONTATO PESSOAL. SMIE.DT - CHI, ITAIPU BINACIONAL. pisa@itapu.gov.br. (março, 2003).
- PRADENAS, L.A. CONTATO PESSOAL. MTSI.SU - CHI, ITAIPU BINACIONAL - São Paulo - BR. pradenas@itapu.gov.py. (abril, 2003).
- PRADENAS, L.A. *Grandes Transformadores - Experiência de la Itaipu*. MTSI.SU. Itaipu Binacional, marzo 1996.
- Protégé 2000. *User's Guide*. <http://www.smi.stanford.edu/projects/protege>. (current Mar. 3, 2002)
- PUGH, P.S. WAGNER, H.H. Detection of Incipient Fault in Transformer by Gas

- Analysis. AIEE Transactions, 1961, Vol. 80, , pp.189-195.
- PURKAIT, P.; CHAKRAVORTI, S. *An Expert System for Fault Diagnosis in Transformers During Impulse Tests*. Proceedings of the IEEE. Jun. 2000, pp. 2181-2186.
- RABUSKE, R.A. *Inteligência Artificial*.: Editora da UFSC. Florianópolis, 1995.
- RAYUDU, R.K; MAHARAJ, A. and RANIGA, J.K. *A Practical Expert System Transformer Restoration Advice*. Power Engineering Society Summer Meeting. 15-19 July, 2001. IEEE, Vol 2. pp. 899-902.
- RICH, E. *Artificial Intelligence*. McGraw Hill, 1983.
- ROIZMAN, O. and DAVYDOV, V. *Neuro-Fuzzy Computing for Large Power Transformers Monitoring and Diagnostics*. Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on 4-7 Dec. 2000. vol.1, pp 253 -258.
- SARTOR, A. F. *Sistema Especialista para Auxílio à Recuperação de Subestações de Transmissão na Fase Fluente*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC - Brasil, Julho 2002.
- GCOI - *Recomendação para Utilização da Análise Cromatográfica em Óleo Mineral Isolante na Recepção e na Manutenção de Equipamentos*. SCM-047. Grupo Coordenador para Operação Interligada, GCOI. Agosto 1986.
- SEALEY, W.C. *Transformers Theory and construction*. International Texbooh Company, Scranton, Pennsylvania USA. 1948
- SILVA, T. M. *Extração de Informação Semântica na WEB Baseada em Ontologías*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC - Brasil, Julho 2002.
- SIEMENS - *Sistema de Monitoramento SITRAM. Informe Técnico*. Itaipu Binacional. Julho, 1992.
- SIHVENGER, J.C. *CONTATO PESSOAL. SMIL.DT - CHI, ITAIPU BINACIONAL. sihvenge@itapu.gov.br*. (junho de 2003).
- SOM - *Descrição geral. Manual G01. Usina Hidrelétrica da Itaipu Binacional. Foz do Iguaçu - PR. Brasil. março, 1995.*
- SUÑÉ, J. *Manutenção Preditiva Inteligente de Transformadores Via Análise Cromatográfica*. Itajubá–MG, Dezembro de 2001. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, - Brasil.
- SUÑÉ, J. *CONTATO PESSOAL. SMIE.DT - CHI, ITAIPU BINACIONAL. sune@itapu.gov.br*. (março, 2003).

- SZCZEPANIAK, P.S. and RUDNICKI, M. *Soft-Computing Methods for Diagnosis and Design of Electrical Devices*. AFRICON, 1999 IEEE, 28 Sept.-1 Oct. 1999. pp 753 -758, vol 2.
- THANG, K.F.; AGGARWAL, R.K.; ESP, D.G.; et al. *Statistical and Neural Network Analysis of Dissolved Gas in Power Transformers*. Dielectric Materials, Measurements and Applications. Conference Publications No. 473 IEEE 2000.
- VELÁZQUEZ, C.E. *M.C.C. Valiosa Herramienta para la Gerencia e Producción* 1er Seminario Técnico del Area de Producción - SETAP ITAIPU BINACIONAL, Foz do Iguaçu 28-10 al 01-11-1996.
- VELÁZQUEZ, C.E. *Sistema Experto de Apoyo a las Especificaciones Técnicas de Transformadores de Potencia*. V SESEP-CIGRE - Comité Nacional Paraguayo, CE-34.09. Asunción 2002.
- VELÁZQUEZ, C.E. *Sistema Experto de Apoyo a la Inspección en Fábrica de Transformadores de Potencia*. X ERLAC. CIGRÉ X/PI-12.3. Puerto Yguazú - Argentina, 18-22-05, 2003.
- WANG, Z.; GUO, J.W.; XIE, J. D. et al. *An Introduction of a Condition Monitoring System of Electrical Equipment*. Electrical Insulating Materials, 2001. (ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium on , 19-22 Nov. 2001 pp 221 -224.
- WANG, Z.; LIU, Y.; WANG N. C.; et al. *Artificial Intelligence in Power Equipment Fault Diagnosis*. Power System Technology 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on, 4-7 Dec. 2000. vol.1 pp 247 -252
- WANG, Z. *Artificial Intelligence Applications in the Diagnosis of Power Transformer Incipient Faults*. Thesis for the Degree of PhD. Blacksburg-Virginia, August 8, 2000.
- WARD, B.H. and LIDGREN, S. *A Survey of Developments in Insulation Monitoring of Power Transformer*. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000. pp. 141-147.
- WENSHENG, G.; Zheng, Q. and Zhang Y. *A Multi-Resolution System Approach to Power Transformer Insulation Diagnosis*. Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating. Toyohashi, Japan, Sept. 27-30, 1998.
- WESLEY, R. G. S. *Isoladores de Linhas de Transmissão do Sistema Elétrico Brasileiro, Parte 2: Avaliação de Desempenho*. X ERLAC. CIGRÉ X/PI-12.3. Puerto Yguazú - Argentina, 18 a 22-05-03.

- YAN, Z.; SHANG, Y. and DONG, M. *Development of Insulation Diagnosis in P. R. China*. Electrical Insulating Materials, 2001. (ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium on 19-22 Nov. 2001. pp 518 -523.
- YAN, Z.; WU, Y. Z.; ZHOU, Y. *Application of Expert System in Insulation Diagnosis*. Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. July 8-12, 1991, Japan, pp. 63-65.
- YANG, H.T. and HUANG, Y.C. *Intelligent Decision Support for Diagnosis on Incipient Transformer Faults Using Self-Organizing Polynomial Networks*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998. pp. 946-952.
- ZHANG, G.; QIAN, Z.; YANG, Z. *Application in Development of DGA Technology for Insulation Fault Diagnosis of Power Transformer*. IEEE Transformer Vol. 36, No. 1, January 1999.
- ZHANG, Z.Z., HOPE, G.S., MALIK, O.P. *Expert Systems in Electric Power Systems – A bibliographical Survey* – IEEE Transactions on Power Systems. Vol.4, No. 4, October 1989, pp.1335-1362.