

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

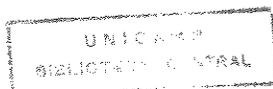
SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO
PARA CONTROLE E GUIA OPERACIONAL EM TEMPO REAL
DE ALTO FORNO

Este exemplar	_____	Assinatura da tese
defendida por	<i>Carlos A. de Castro</i>	_____
<i>Fernandes</i>		Assinatura
Julgada em	<i>05/09/91</i>	
	<i>[Assinatura]</i>	

Por: Carlos Alberto de Castro Fernandes
Orientador: Professor Dr. Fernando Gomide

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, abril de 1991.



ABSTRACT

A knowledge based system for real time supervisory control and operational guidance has been developed for blast furnaces of steel plants, with emphasis in on-line and real time process control aspects.

The knowledge based system is part of a blast furnace supervisory control system which includes not only an usual distributed control and monitoring equipment, but also a supervision workstation allocated exclusively for the expert control system inferences in real time with the process under control.

The prototype system was implemented for the operation pulpit of control room of blast furnace nº 2 of Companhia Siderúrgica Nacional, a brazilian steel plant, for final operational approval. System's functions aims at capturing operational knowledge about the stability of furnace ritnm, under the aspects of the furnace thermal level, permeability to the flow of reduction gases and chemical disturbances in the product.

Moreover, a particular methodology was derived and used for the system developement. It reflects our practical experience in the fusion of some existing techniques, methods and methodologies. The usefulness of the knowledge acquisition and representation approaches derived have shown to be very effective for the class of problems herein considered.

RESUMO

Foi desenvolvido um Sistema de Controle e Guia Operacional em tempo real para Altos-Fornos, utilizando a tecnologia de Sistemas Baseados em Conhecimento, e implementado um protótipo de validação contendo conhecimento suficiente para diagnosticar a estabilidade do ritmo do forno nos aspectos de nível térmico, permeabilidade ao fluxo dos gases redutores e estabilidade química do produto.

O sistema foi instalado no púlpito de operação da sala de controle do alto-forno nº 2 da Companhia Siderúrgica Nacional, com uma arquitetura integrada ao sistema de controle supervisorio do forno, privilegiando os aspectos de aquisição automática ("on-line") de dados do processo e de controle em tempo real compatível com as necessidades de resposta temporal do forno.

Ao lado de algumas considerações teóricas sobre o processo de aquisição, representação e validação do conhecimento, é proposta uma metodologia de desenvolvimento de Sistemas Baseados em Conhecimento, composta por uma fusão de diversos métodos e técnicas existentes, efetivamente utilizada e testada com sucesso no desenvolvimento do sistema em questão.

CONTEÚDO

CAPÍTULO 1: O CONTEXTO DO PROBLEMA.

- 1.1. INTRODUÇÃO.
- 1.2. OBJETIVOS.
- 1.3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.
 - 1.3.1 Descrição do processo siderúrgico.
 - 1.3.2 Automação e controle de um Alto Forno.
- 1.4. MOTIVAÇÕES.
 - 1.4.1 Porque usar SBC no controle de AFs.
 - 1.4.2 Identificação de problemas/soluções semelhantes.
- 1.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.
- 1.6. BREVE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO.
- 1.7. RESUMO

CAPÍTULO 2: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO

- 2.1. INTRODUÇÃO
- 2.2. UMA VISÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO
 - 2.2.1 Uma abstração do problema
 - 2.2.2 A abordagem operacional
 - 2.2.3 O processo
 - 2.2.4 O conhecimento
 - 2.2.5 Técnicas e métodos para aquisição de conhecimentos
- 2.3. UMA METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE SBC
 - 2.3.1 Introdução
 - 2.3.2 Atividades gerenciais
 - 2.3.3 O processo de desenvolvimento
- 2.4. RESUMO

CAPÍTULO 3: PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

- 3.1. INTRODUÇÃO
- 3.2. OBJETIVOS E SEGMENTAÇÃO
- 3.3. CARACTERÍSTICAS PARA TEMPO REAL
 - 3.2.1 Tempo real
 - 3.2.2 Sistemas Especialistas "off-line" versus "on-line"

- 3.4. ARQUITETURA DE IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE
- 3.5. ESTRUTURA DO SOFTWARE DE APOIO
- 3.6. REPRESENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS
 - 3.6.1 Representação dos conhecimentos
 - 3.6.2 Etapas dos procedimentos
- 3.7. AQUISIÇÃO DOS FATOS PARA INFERÊNCIA
 - 3.7.1 Obtenção dos dados brutos do processo
 - 3.7.2 Condicionamento dos dados
 - 3.7.3 Validação dos dados
 - 3.7.4 Pré-tratamento estatístico dos dados
 - 3.7.5 Aquisição dos fatos
- 3.8. ESTRUTURA DA BASE DE CONHECIMENTOS
 - 3.8.1 Estrutura geral
 - 3.8.2 Diagnóstico
 - 3.8.3 Recomendações
 - 3.8.4 Telas de resultados
 - 3.8.5 Acompanhamento
 - 3.8.6 Comentários gerais
- 3.9. DESEMPENHO DO SISTEMA
- 3.10. RESUMO

CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES

- 4.1. INTRODUÇÃO
- 4.2. CONCLUSÕES E EXPANSÃO DO SISTEMA
- 4.3. RESUMO

BIBLIOGRAFIA

ANEXO : Codificação de algumas Regras do Sistema

PREFÁCIO

A aplicação da tecnologia de Sistemas Baseados em Conhecimento à automação e controle de processos em tempo real é o campo que pretendemos investigar. Escolhemos uma aplicação na área da siderurgia onde a natureza do processo, sendo de difícil modelagem e formalização, é um campo próprio à aplicação de sistemas especialistas: o processo de fabricação do ferro nos Altos Fornos. A confecção do projeto, o estudo de casos semelhantes, a implementação de um protótipo e a sua aplicação e validação com os operadores-usuários e engenheiros especialistas dos Altos Fornos da Companhia Siderúrgica Nacional, nos dão a confiança de ter avançado no domínio da tecnologia e nos incentivam a prosseguir na direção de um projeto completo e definitivo.

No primeiro capítulo apresentamos o contexto do problema, o ambiente siderúrgico no qual acontece a aplicação, as motivações para o problema e a identificação de problemas e soluções semelhantes no mundo, com uma breve descrição da solução aqui proposta.

A ausência de uma metodologia bem definida para compor a engenharia de desenvolvimento de "software" na área de aquisição, representação e validação dos conhecimentos, nos levou a desenvolver uma metodologia composta por uma fusão de métodos e técnicas existentes, utilizada com sucesso no desenvolvimento do projeto e à qual dedicamos parte substancial do capítulo II, ao lado de algumas considerações teóricas sobre o processo de desenvolvimento.

O terceiro capítulo é dedicado a detalhes técnicos do projeto e implementação da solução, tais como características de sistemas especialistas para controle em tempo real e "on-line" com o processo, as arquiteturas de hardware e software de apoio, a estrutura da base de conhecimentos, as funções do sistema e a sequência de representação do conhecimento de acordo com a metodologia proposta.

Agradecemos à Companhia Siderúrgica Nacional, pela oportunidade de executar o projeto, nas pessoas do Diretor Industrial, engº Sebastião Faria de Sousa, do Superintendente Geral de Metalurgia de Redução, engº Cirilo Rubel Dorileo Rodrigues, do Superintendente Técnico de Operação, engº Darcio de Paula Sarchis, ao colega engº Marco Barreto, ao engº especialista Henrique Amado, cuja excepcional dedicação propiciou a realização do trabalho, e ao apoio à formação técnica de recursos humanos do Superintendente Geral de Automação, Instrumentação e Comunicações, engº José Rogerio Prado de Castro e do engº Luis Antonio de Souza Baptista.

Agradecemos muitíssimo o suporte técnico do prof. Dr. Fernando Gomide, e o suporte pessoal e afetivo dos meus pais, Sr. e Sra. Renato e Hilca de Castro Fernandes, e de minha esposa Katia, que embora grávida, soube apoiar nossas viagens à Campinas.

Carlos Alberto de Castro Fernandes
Volta Redonda, março de 1991

CAPÍTULO 1

O CONTEXTO DO PROBLEMA

CONTEÚDO

<i>Seção</i>	<i>Página</i>
1.1. INTRODUÇÃO.....	I.1
1.2. OBJETIVOS.....	I.2
1.3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	I.4
1.3.1 Descrição do Processo Siderúrgico.....	I.4
1.3.1.1 Uma Usina Siderúrgica.....	I.4
1.3.1.2 O Alto Forno.....	I.8
1.3.2 Automação e controle de um Alto Forno.....	I.10
1.4. MOTIVAÇÕES.....	I.13
1.4.1 Porque usar SBC no controle de AFs.....	I.13
1.4.1.1 Sistemas convencionais versus SEs.....	I.13
1.4.1.2 Benefícios intangíveis.....	I.14
1.4.2 Identificação de problemas/soluções semelhantes.....	I.17
1.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	I.19
1.6. BREVE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO.....	I.23
1.7. RESUMO.....	I.26

A Inteligência Artificial tem apresentado nos últimos anos resultados importantes, principalmente a tecnologia de Sistemas Especialistas (SEs), ou Sistemas Baseados em Conhecimento (SBCs) em geral.

A aplicação de SEs representa o estado da arte no controle e guia operacional de Altos-fornos (AFs), e a evolução normal dos modelos tipo "go-stop" e de simples formulação matemática. Tem sido usado por todas as principais companhias siderúrgicas do Japão com resultados atrativos. Por exemplo, as recomendações operacionais do SE do Alto-forno nº 5 de Kimitsu, usina da Nippon Steel, foram consideradas superiores ou iguais às recomendações e ações dos operadores em 98,3% dos casos. Nesta empresa, haviam cerca de 70 SEs instalados já em fins de 1988 em várias usinas, sendo constatado que em outubro de 1990 este número havia crescido substancialmente, em uma ampla gama de aplicações.

Este trabalho visa o projeto e a implementação de um protótipo de SBC para o Alto-forno nº 2 da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), com o objetivo de demonstrar a viabilidade do conceito e esclarecer aspectos técnicos, teóricos, e a possibilidade de sua execução com os recursos disponíveis na CSN e no Brasil.

Neste capítulo são definidos os objetivos do trabalho e as principais características necessárias e desejáveis em um Sistema Baseado em Conhecimento para o controle em tempo real. São descritos o ambiente siderúrgico no qual se dá a aplicação, bem como uma análise das vantagens e benefícios na aplicação de SBCs ao controle de certos processos, exemplificados pelo sucesso no seu uso em algumas aplicações semelhantes à aqui considerada, identificadas e comentadas. Finalmente é feita uma breve descrição da solução projetada e implementada.

1.2. OBJETIVOS

O propósito principal é a construção de um Sistema Baseado em Conhecimento para controle e guia operacional do processo de Alto Forno em uma Usina Siderúrgica de produção de Aço, com ênfase no aspecto de controle do processo "on-line" e em tempo real.

Os objetivos são os seguintes:

1) absorver a metodologia de desenvolvimento de SEs com o fito de dominar as técnicas e implantar a nova tecnologia em aplicações em automação, no controle de processos e na empresa em geral.

2) desenvolver um protótipo que sirva como demonstração do conceito e validação da tecnologia, e que permita uma fácil migração para um sistema definitivo. O protótipo incluirá as principais características necessárias ao tratamento do problema definitivo, tais como:

- ligação "on-line" com o processo;
- aquisição automática dos dados para inferência;
- monitoração do estado do sistema em tempo real;
- detecção de indicações de problemas existentes ou iminentes (tendências);
- recomendar ações corretivas;
- reportar o estado atual do forno;
- consultas automáticas e ininterruptas, alertando o operador somente quando necessário, através de alarmes;
- pré-tratamento dos dados do processo;
- otimização dinâmica das inferências;
- amostragem dos parâmetros em tempos próprios;

além de outras características normalmente já associadas a sistemas especialistas "off-line".

O protótipo visa capturar uma parte do conhecimento operacional sobre a estabilidade de marcha do forno, nos seus aspectos constituintes de estabilidade térmica, avarias químicas no produto ferro-gusa, retenção de escória, ritmo de cargas, características físicas das matérias primas e seu carregamento no forno, pressão do ar soprado, aspecto das ventaneiras, análise do gás de topo etc.. Tratará de problemas associados ao nível térmico do Forno, permeabilidade à passagem dos gases redutores e avarias químicas no produto.

Este conhecimento operacional, apesar de parcial, será porém representativo do problema real de operar o forno, para permitir a avaliação do protótipo objeto deste trabalho.

13. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

1.3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO SIDERÚRGICO,

O processo siderúrgico de fabricação do aço é o contexto no qual se desenvolve o presente trabalho. Assim, segue-se uma descrição sumária do fluxo natural dos principais processos e equipamentos de produção em uma Usina Siderúrgica, com ênfase na área da Metalurgia de Redução e nos Altos Fornos em particular.

1.3.1.1 Uma Usina Siderúrgica.

Para fins de controle da produção, uma Usina típica pode se considerar subdividida em áreas distintas, como abaixo:

ÁREAS	PROCESSOS OU EQUIPAMENTOS
METALURGIA DA REDUÇÃO	Pátios de matérias primas, Sinterizações
METALURGIA DO AÇO	Coqueria e Altos-Fornos.
LAMINAÇÃO A QUENTE	Aciaria, Lingotamento Contínuo e Convencional.
LAMINAÇÃO A FRIO	Fornos de Placas, Fornos Foços e Laminadores a Quente.
REVESTIDOS	Decapagem, Laminadores a Frio.
UTILIDADES	Zincagem, Recozimento, Estanhamento, Cromagem, Encruamento.
	Fornecimento de água, vapor e energia elétrica, Fábrica de Oxigênio, Usina de sub-produtos da Coqueria, etc.

O processo de fabricação do aço é um processo de transformação de materiais básicos encontrados na natureza. Tais materiais, como o Carvão, Fundentes e Minério de Ferro são as ditas matérias primas utilizadas no processo siderúrgico. A figura nº 1.1, na página seguinte, representa o aspecto geral da sequência ou fluxo natural de produção de ferro e aço, e serve como referência para a discussão a seguir.

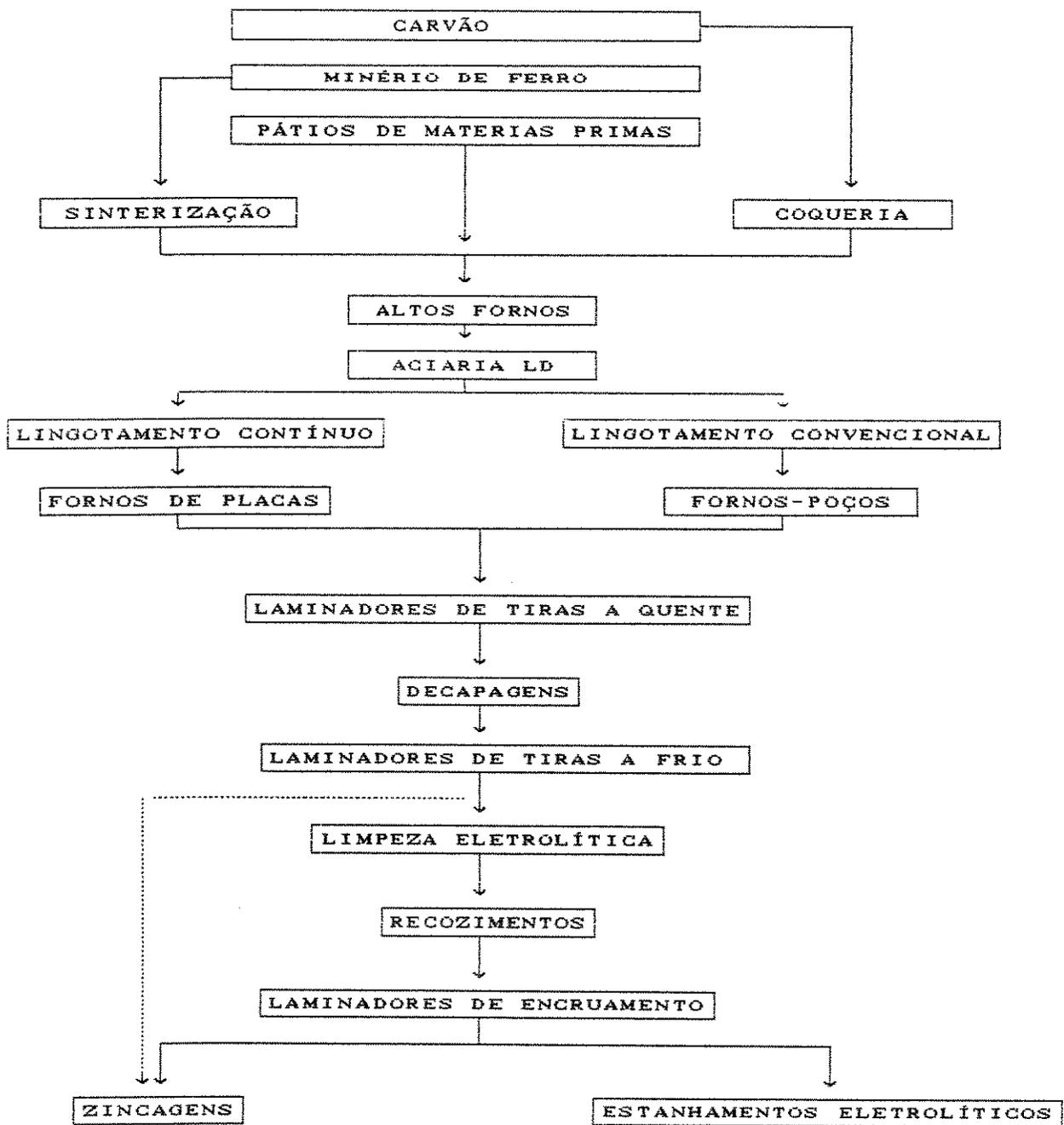


Figura 1.1: Sequência de Produção de Ferro e Aço.

Estas matérias primas são recebidas, convenientemente movimentadas através de esteiras ou correias transportadoras, e armazenadas em PÁTIOS DE MATÉRIAS PRIMAS, de onde são conduzidas para os equipamentos que as processam.

O minério de ferro deve ter uma granulometria específica para a utilização no processo siderúrgico. O minério abaixo desta granulometria é aproveitado sob forma de Sinter. O Sinter resulta da mistura de finos de minério de ferro e fundentes (calcáreo e dolomita), através do processo de SINTERIZAÇÃO.

O carvão mineral recebido deve ser cozido, transformando-se em coque, nos fornos da COQUERIA. Os fornos da Coqueria são aquecidos por combustão de gás do próprio coque, que flui através de canais existentes nas paredes de tijolos de sílica a temperaturas de cerca de 1300 graus centígrados. O carvão permanece de 15 a 17 horas no interior dos fornos. A fabricação do coque produz os seguintes subprodutos : Amônia anidra NH_3 , alcatrão , benzeno , naftaleno bruto , nafta solvente , óleo creosoto , óleo desinfetante , piches dos tipos A e B , piche para eletrodo , piche especial 110 , tolueno e xileno .

Finalmente, o coque, minério de ferro, sinter e fundentes, são processados nos ALTO-FORNOS para a obtenção de ferro-gusa, que é o ferro liquefeito a uma temperatura em torno de 1500 graus centígrados.

O ferro gusa é transportado por vagões especiais, ditos carros-torpedo, para a ACIARIA LD , visando a fabricação do aço propriamente dito. Nesta unidade , o ferro gusa se mistura com sucata e matérias primas adicionais (fluorita, cal dolomítica, manganês, etc.) de acordo com o tipo de aço programado. A Aciaria LD possui conversores onde essa mistura é transformada em aço pelo processo de oxidação de suas impurezas , através do sopro de oxigênio . O sopro dura aproximadamente 17 minutos , podendo atingir duas vezes a velocidade do som . Cada corrida leva aproximadamente 20 minutos e a temperatura aproximada de saída do aço é de 1600 graus centígrados .

A maior parte do produto segue para o LINGOTAMENTO CONTINUO DE PLACAS e o restante é vazado em lingoteiras no LINGOTAMENTO

CONVENCIONAL para posterior laminação.

Placas de aço são obtidas a partir dos lingotes através de LAMINADORES DESBASTADORES ou diretamente dos veios do lingotamento contínuo, e são eventualmente conduzidas à temperaturas apropriadas nos FORNOS-POÇOS ou nos FORNOS DE PLACAS.

Estas placas são introduzidas nos LAMINADORES DE TIRAS A QUENTE e sofrem uma conformação mecânica através de compressão por rolos montados em conjuntos rígidos chamados Cadeiras de Laminação. Após passar pelas Cadeiras Desbastadoras ou de Chapas Grossas, a peça de aço é introduzida no Trem de Acabamento, onde um conjunto de cadeiras de acabamento reduzem a espessura da chapa, formando uma longa tira de aço conhecida como Bobina a Quente, com espessuras típicas da ordem de 2 a 6 milímetros.

Nas linhas de DECAPAGEM a bobina de aço passa por um conjunto de tanques contendo uma solução ácida aquecida a vapor. Ali a oxidação superficial originária do processo a quente é eliminada.

As bobinas são desenroladas, soldadas topo a topo, decapadas, aparadas lateralmente, oleadas, reenroladas e enviadas aos LAMINADORES DE TIRAS A FRIO, onde sofrem novamente um processo de redução por conformação mecânica, desta vez a frio, atingindo espessuras mais finas, da ordem de 0,18 a 0,60 milímetros.

Após serem laminadas a frio as bobinas passam por um processo de desengraxamento superficial nas LINHAS DE LIMPEZA ELETROLÍTICA, onde são desenroladas e lavadas em solução alcalina, passando por um sistema de secagem a ar quente. Finalmente são reenroladas e enviadas aos FORNOS DE RECOZIMENTO EM CAIXA convencionais ou às modernas LINHAS DE RECOZIMENTO CONTÍNUO. O tratamento térmico do recozimento regenera a estrutura interna do aço às condições anteriores, através de recristalização, tornando o aço conformável para os clientes em seus processos posteriores de estampagem e dobramento.

Já laminadas, limpas e recozidas, as bobinas são processadas num LAMINADOR DE ENCRUAMENTO ou Dupla Redução, com o propósito de restaurar a dureza superficial do aço, reduzindo-se ainda um pouco sua espessura.

A partir deste ponto começa o processo de tratamento

superficial das bobinas. Em LINHAS DE ESTANHAMENTO ELETROLÍTICO são fabricadas as "folhas de flandres". As chapas finas de aço são banhadas com Estanho em tanques de eletrodeposição onde o aço recebe um revestimento de estanho metálico com grau de pureza em torno de 99.98 % . Podem também receber um filme de óxido de cromo, e sempre recebem um filme de óleo como proteção contra oxidação e para facilitar o manuseio.

Além do Estanhamento, outro processo de tratamento superficial do aço pode ser a Zincagem. As tiras de aço laminadas a frio circulam pelo interior das LINHAS DE ZINCAGEM CONTINUA, onde percorrendo uma distância de aproximadamente um quilômetro, são recozidas, revestidas de zinco, tratadas quimicamente e aplainadas por estiramento.

Alguns produtos finais típicos de uma usina com os processos e equipamentos descritos são : Placas, Chapas Grossas, Chapas a Quente, Chapas Finas a Quente, Bobinas a Quente Acabadas, Bobinas a Frio, Chapas Zincadas, Folhas e Bobinas de Flandres, Bobinas Zincadas, Trilhos e Acessórios, Perfis médios e pesados, Barras, Placas de apoio, Talas de junco, Dormentes, Vigas U, H e T, Cantoneiras de abas iguais e desiguais, Barras redondas, quadradas e chatas .

As folhas estanhadas ou de flandres, em razão de suas características mecânicas e superficiais, são utilizadas na confecção de latas para embalagens de produtos alimentícios e bebidas, conservando integralmente intactas as propriedades das substâncias enlatadas . As folhas Zincadas, Galvanizadas ou Cromadas são os produtos nobres, de maior rentabilidade para a Usina. Suas aplicações são várias, notadamente na construção civil, na indústria de veículos ,eletrodomésticos e em setores que exigem materiais de elevada resistência e apurado acabamento estético.

1.3.1.2 O Alto-forno.

Um Alto-forno é um reator de alta temperatura e pressão onde se carrega carga metálica e combustíveis, e se injeta ar quente, objetivando a produção de ferro-gusa.

O processo se desenvolve carregando-se no forno as matérias

primas provenientes principalmente da Sinterização e da Coqueria.

O carvão mineral recebido é estocado nos Pátios de Matérias Primas e levado em correias transportadoras até os silos das Baterias de Coque onde é cozido, transformando-se em coque dentro dos fornos da Coqueria. As Usinas empregam na fabricação de Coque Metalúrgico (reductor do minério de ferro) uma mistura de carvões com baixo e alto teores de matérias voláteis. Após o desenformamento, o coque resfriado é encaminhado à casa de estoque dos Altos Fornos.

O sinter resulta da mistura de finos de minério de ferro com uma granulometria específica e fundentes como calcáreo e dolomita. O emprego de minério aglomerado sob a forma de sinter é de grande importância no aumento da produtividade e na regularização da marcha dos Altos-Fornos.

O Coque, Minério de Ferro, Sinter e Fundentes são armazenados em silos na Casa de Estoque, e após serem peneirados e pesados, são conduzidos até o topo do forno por uma correia transportadora e distribuídos de forma uniforme no interior do forno.

O ar aquecido nos Regeneradores a temperaturas de até 1350 graus centígrados, é soprado na parte inferior do Alto Forno, dito cadinho, através de vários pontos chamados ventaneiras. A temperatura da chama nas ventaneiras pode atingir até 2200 graus centígrados. O calor provoca o derretimento do ferro e da escória. Em primeira instância, tem-se como resultado a geração de gases altamente redutores e altos níveis de energia. Em seguida os gases redutores produzidos reagem com a carga do forno provocando reações de redução e troca térmica. A partir daí, é definido um perfil na coluna de materiais do forno, de tal forma que na parte superior da coluna haverá material sólido, na zona intermediária materiais em estado de amolecimento e fusão e, na parte inferior, uma coluna de coque imersa em material líquido (gusa e escória).

Como resultado do processo, obtém-se o produto ferro-gusa e sub-produtos como escória e gás de alto-forno.

O gusa líquido é retirado do alto-forno através de quatro furos de gusa na ala de corridas, separado da escória nos canais principais por diferença de densidade, e carregado em

carros-torpedo, que são enviados à Aciaria para a produção do Aço.

Também os sub-produtos escória e gás de alto-forno sofrem processamentos específicos, objetivando posterior utilização. Por exemplo a escória, que é considerada uma impureza para o processo de fabricação do aço na Aciaria, após ser tratada em tanques de beneficiamento, é vendida para fábricas de cimento .

1.3.2 Automação e Controle de um Alto Forno.

Apesar de possuir uma automação limitada, é grande o número de funções típicas para monitoração e controle de um alto-forno e seus equipamentos auxiliares.

Além do corpo do forno, monitorado por sensores, termopares, tomadas de pressão, analisadores e instrumentos especiais tais como perfilômetros (perfil da carga) e sondas penetrantes (análise de gases) instalados no corpo do forno, possuem algum grau de automação os seguintes equipamentos auxiliares : o sistema de estocagem e carregamento das matérias primas, o sistema de limpeza de gás, os regeneradores, o sistema de refrigeração, o sistema de injeção de oxigenio e o sistema de injeção de gás natural.

A seguir apresenta-se um resumo das principais funções de um sistema de automação de altos fornos:

- a nível de um computador supervisorio, funções tais como:
 - cálculos tecnológicos para orientação do operador, tais como: rendimento térmico da cuba, taxa de gas natural/coque, modelos de predição de nível térmico, de estimativa da zona coesiva, etc.;
 - estimativas da carga quanto a : posição, perfil de distribuição no topo do forno, velocidade de descida e taxa de compactação, baseados nos dados do perfilômetro e modelos;
 - controle de empilhamento das temperaturas nos regeneradores a partir de leituras de diversas temperaturas do domo, da câmara de combustão, da chaminé, etc.;
 - controle de temperatura do cadinho e do corpo do forno;

- a nível de um minicomputador para o carregamento, funções

tais como:

- controle da matéria prima, a partir de análises química e física;
- controle da pesagem e carregamento, com a distribuição da carga pela armadura móvel, compensação de umidade e desvios das matérias primas, "set-up" do valor de descarga desejado, etc.;
- controle do gusa e escória pelo cálculo do leito de fusão, que é a mistura (mix) de matérias primas em função do produto desejado, e pelo cálculo do volume de gusa e escória acumulados no forno;

• a nível de controle digital direto, controladores lógico programáveis com funções executivas tais como:

- controle do padrão e da sequência de carregamento, controle do ajuste da armadura móvel, da equalização da pressão do topo, do volume de descarga da pesagem, etc.;
- controle sequencial da troca de estado dos regeneradores (combustão, sopro), e indicação do estado;

• ainda a nível de controle digital direto, um sistema digital de controle distribuído com funções executivas e de monitoração da instrumentação do forno tais como:

- controle do sopro e da combustão, controle da temperatura do gas queimado e do domo;
- controle da pressão do topo e da equalização da pressão entre os cones;
- controle de vazão de água de resfriamento;
- controle da vazão de oxigênio e gas natural;
- monitoração dos dados do processo;

Acrescente-se a estas, funções de telas gráficas, relatórios e painéis sinóticos para interface dos sistemas de automação com os operadores e gerentes. A figura 1.2 a seguir, apresenta uma arquitetura física típica:

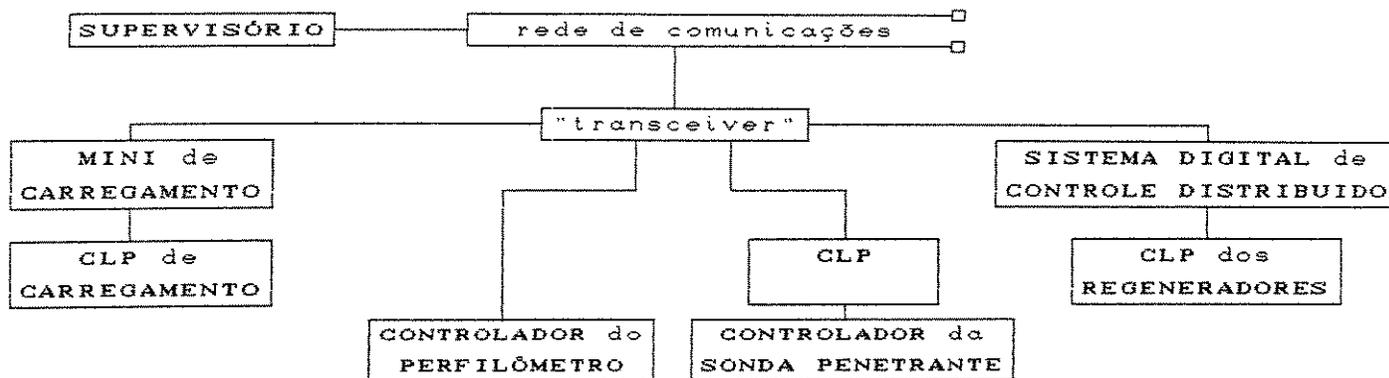


Figura 1.2 : Automação convencional de um Alto-Forno.

A motivação básica é procurar avaliar o potencial de aplicação de tecnologias de I.A. na construção de Sistemas Baseados em Conhecimento, ou Sistemas Especialistas, para o controle de processos siderúrgicos em tempo real. Procura-se analisar as respostas às seguintes questões:

- porque não continuar usando a tecnologia tradicional de controle direto e supervisorio? (teoria de controle clássica e moderna)
- que tipos de problemas saem do escopo do controle tradicional e entram no escopo da I.A.?
- quais as vantagens ou benefícios de tal tratamento?

1.4.1 PORQUE USAR SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO NO CONTROLE DE AFs

Vários são os problemas potenciais que podemos apontar como existentes hoje no controle do ambiente de produção, aos quais a tecnologia de I.A., mais especificamente o ramo de SEs, vem contribuindo significativamente para a solução. Isto se vê, principalmente, em situações onde o controle de processos convencional, por alguma razão, não fornece os resultados que o controle, o operador e o equipamento necessitam.

1.4.1.1 Sistemas convencionais versus Sistemas Especialistas.

O processo de produção do aço não tem sido ainda completamente automatizado; algumas partes ainda dependem de operação manual.

Estas partes representam um campo onde as características do sistema são muito complicadas ou muito ambíguas para serem expressas por equações matemáticas, e onde os sistemas a serem controlados podem ser operados mais eficientemente por hábeis e veteranos operadores do que por sistemas de controle.

Como exemplo de um processo ainda não completamente automatizado, podemos citar o caso de um Alto-forno. Um Alto-forno é

um processo ainda com automação limitada, principalmente porque é muito difícil a modelagem matemática do processo e sua formalização em termos da teoria de controle clássica ou moderna.

Isto acontece por diversas razões. O Alto-forno é um reator a alta temperatura e pressão. As propriedades do minério e coque são não-uniformes e a distribuição exata da carga (perfil) no interior do forno é desconhecida. É um processo contínuo em que reações envolvendo fases gasosas, líquidas e sólidas interagem complexamente entre si. São muitas as variáveis indicativas das condições internas do forno. Tudo isto faz com que seja impossível conhecer com precisão as reais condições internas do forno.

Na prática da operação diária, que requer controle "on-line" e em tempo real, e com a abordagem por teoria de controle difícil, a solução experimental tem características mais favoráveis que soluções teóricas. O conhecimento, a experiência e o "Know-how" dos operadores veteranos é empregado, e se revela mais eficaz do que modelos de formulação. Estes últimos são usados apenas como indicadores para auxílio à decisão e ação dos operadores.

Um SE pode ser empregado para capturar este conhecimento operacional empírico e implementá-lo num sistema computacional que, acoplado a um sistema de controle do processo em tempo real, pode ter um desempenho mais efetivo que qualquer modelo ou operador.

Na verdade, esta solução já representa o estado da arte no controle e guia operacional de Altos Fornos, a julgar pelo seu longo emprego em Altos Fornos na Siderurgia Japonesa, líder na automação do setor.

1.4.1.2 Benefícios Intangíveis

Em uma indústria, qualquer investimento é analisado em termos de aumento de produção, qualidade e redução de custos, ou seja, de produtividade. Podemos avaliar que há um impacto significativo em benefícios qualitativos ou vantagens no uso de SEs como parte do controle de processos industriais, como mostramos a seguir:

- Aumentos gerais de produtividade causados por razões tais como: a redução da carga cognitiva sobre os usuários, habilitando

aos operadores trabalhar com um volume muito maior de informações sem que a carga cognitiva sobre eles cresça, liberando-os portanto para cuidar de problemas excepcionais; pela geração de muitas opções criativas para o usuário em um curto período de tempo; pela qualidade na tomada de decisão, uma vez que o S.E reunirá o melhor do conhecimento especialista existente em vários setores, e pela consistência na tomada desta decisão.

- A captura da experiência perecível de especialistas no processo de fabricação do aço, que se retiram por doença, falecimento, aposentadoria, ou mudanças de área ou atribuições, é feita pela armazenagem e formação de uma Base de Conhecimentos que podem ser recuperados a qualquer instante para guiar os operadores.

- **Automação da Memória Técnica da Empresa:** a característica incremental da Base de Conhecimentos de um S.E, permite que a experiência de vários técnicos seja adicionada ao longo dos anos, criando assim um receptáculo para a manutenção da Memória Técnica da empresa.

- **Minimização do problema de "turn-over":** a existência deste receptáculo das experiências minimiza o choque técnico causado pelo "turn-over" dos engenheiros especialistas nas suas funções, (normalmente há uma migração natural para funções administrativas ou mais gerais a medida que a carreira progride).

- A padronização das recomendações do SE nas mesmas condições de problema, cria uma homogeneidade nas ações e no produto, entre as diversas turmas ou turnos de operação, o que é fundamental dentro da moderna filosofia de administração com Controle Total da Qualidade.

- A existência do mecanismo justificador ou explicador de "porque" tal ação foi recomendada ou "como" o SE chegou a tal conclusão, tem um caráter altamente educativo para os operadores que lidarem com tais recursos, principalmente os novatos, que serão treinados na "boa operação" por esse guia operacional.

- **Disseminação e disponibilidade do conhecimento do especialista:** uma usina siderúrgica trabalha 24 horas por dia estando os engenheiros especialistas ausentes 75% deste tempo (às noites e fins de semana). Estes recursos, escarços e de alto custo,

podem ser multiplicados e seu conhecimento estar disponível aos operadores em instantes remotos, quando a presença do especialista na usina pode tardar uma hora ou mais.

- **Benefício para o especialista:** o processo de aquisição de conhecimento traz um benefício inerente ao próprio especialista, que é o de levá-lo a formalizar e elucidar seu próprio conhecimento, através da explicitação de seu raciocínio frente aos problemas.

- **Melhoria no conhecimento operacional:** o próprio conhecimento sobre como melhor operar, é aperfeiçoado pela formalização lógica inerente ao processo de organização dos conhecimentos, tornando-o mais coerente, padronizado e profundo, aproveitando melhor eventuais conhecimentos teóricos correlatos. Por exemplo, no problema de Diagnóstico, a manutenção corretiva avança para o campo da Análise de Falhas ou descoberta das causas fundamentais causadoras do problema, aprofundando o conhecimento e indo além da manutenção corretiva na direção de uma manutenção preditiva.

- **Flexibilidade na Manutenção:** o desenvolvimento de sistemas de computação mais flexíveis de manter ou atualizar, com respostas mais eficientes à mudanças nas condições ambientais do processo, as quais se alteram continuamente por inovações tecnológicas, por mudanças nas matérias primas, por novas especificações do produto, etc. . Esta flexibilidade acontece tanto em melhorias ou aumento incremental nos programas (manutenção evolutiva), como na manutenção adaptativa a novos parâmetros operacionais.

- **Custo da manutenção:** no ciclo de vida de um projeto convencional, o custo do projeto, teste e implementação representa apenas cerca de 30 % do custo total, a posterior manutenção do sistema é o custo principal [Pressman/88 e Neto/88]. Esta manutenção pode ser feita em grande parte pelos próprios especialistas ou usuários da operação, liberando os custos de engenheiros de software normalmente alocados para a manutenção de sistemas convencionais.

- **Projeto mais rápido:** do ponto de vista da Engenharia de Software, o projeto torna-se mais fácil pela separação do controle e dos dados no mecanismo de inferência e na Base de Conhecimentos.

assim como cerca de 3 vezes mais rápido, segundo [Harmon/88], principalmente se usada uma ferramenta ou "shell" em lugar de uma linguagem como LISP ou PROLOG.

Retornando então às questões colocadas no início da seção, concluímos que existem várias vantagens e benefícios que justificam o uso de Sistemas Baseados em Conhecimento, em especial a expansão do escopo da Automação para campos de estrutura fraca ou modelagem difícil. Estes tipos de situação mencionados, a saber, a ambiguidade do objeto controlado e a impossibilidade de modelar ou formalizar matematicamente as características do problema, saem do escopo da teoria de controle de processos convencional e serão potencialmente melhor tratados pelo uso da tecnologia de I.A., onde a modelagem matemática é substituída ou complementada pelo conhecimento empírico do operador veterano.

1.4.2 IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS/SOLUÇÕES SEMELHANTES

A indústria do Aço tem efetivamente introduzido a Engenharia do Conhecimento como uma das tecnologias de controle de sistemas, com clara expansão do escopo da automação para campos onde as técnicas de desenvolvimento de software convencionais não são efetivas.

No Japão, que possui a indústria de aço com automação mais desenvolvida do mundo, todos os grandes conglomerados já utilizam sistemas especialistas em uma ou mais de suas usinas. A Nippon Steel, por exemplo, possuía mais de 70 SEs já em 1988, instalados ou em desenvolvimento [Ishii/88].

Na área de Altos Fornos, existem sistemas especialistas instalados em uma ou mais usinas das seguintes empresas: Nippon Steel, Nippon Kokan, Sumitomo Heavy Metals, Kobe Steel, e Kawasaki Steel segundo [Shibata/89], [Takekoshi/89], [NSC/88], [Tsunozaeki/87], e [Watanabe/89].

Especificamente, SEs já foram instalados na Nippon Kokan, no alto forno nº 5 da usina de Fukuyama [Tsunozaki/87], [Shibata/89] e [Takekoshi/89], e em altos fornos na usina de Keihin, inclusive um sistema baseado em casos ("case-based system") de guia operacional para distribuição de carga no forno [Kimura/90]; na Nippon Steel, nos altos fornos nº 3 e nº 4 da usina de Kimitsu [Amano/90] e [Watanabe/89]; além de referências adicionais a outras usinas em [NSC/88] e [Ishii/88].

15. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresenta-se um sumário da literatura disponível, tendo em vista o escopo deste trabalho.

Os artigos de [Tsunozaki/87], [Shibata/89], [Takekoshi/89] e [Kimura/90] descrevem a aplicação em diversas usinas da Nippon Kokan, de Sistemas Especialistas desenvolvidos para a operação em tempo real e "on-line" com o processo, com a função de supervisão operacional de vários de seus alto fornos, com os seguintes objetivos: a) a realização de um nível de controle altamente refinado nas funções de diagnóstico, as quais são extremamente complicadas e dependem do conhecimento do operador experiente, b) flexibilidade de resposta às frequentes demandas para reconstrução do sistema, e c) padronização e transferência da tecnologia de operação do forno.

O sistema foi subdividido em um sistema de predição de condições anormais no forno ("Abnormal Furnace Condition Prediction System"), com as funções de predição de ocorrência de deslizamentos da carga, engaiolamentos e alarmes aos operadores, e um sistema de monitoração e controle do nível térmico do forno ("Furnace Heat Monitoring and Control System"), que julga o nível térmico e suas transições no interior do forno e instrui os operadores sobre a ação operacional apropriada, ou envia instruções de controle aos atuadores.

Para lidar com o volume de dados oriundos de sensores diretamente ligados ao processo (cerca de 200 sensores) e as suas sequências temporais, o sistema é composto por um pré-processamento para análise destes dados, com as funções de coleta, cálculo, configuração e gravação dos dados para inferência na base de dados. A seguir, a dedução da condição do forno é feita com os dados recebidos do pré-processamento e por regras na base de conhecimento.

Na parte de inferência, o sistema usa uma ferramenta baseada na linguagem LISP, chamada EXSHELL, suportando diversos métodos de representação de conhecimento, como regras de produção, "frames" e modelos alternativos, como por exemplo, o "blackboard". O sistema leva em conta as incertezas associadas às regras usando Fatores de Certeza ("confidence factors") e funções de pertinência expandidas como na teoria de lógica nebulosa ("fuzzy sets"). A utilização de funções de pertinência trouxe vantagens como a redução substancial do número de regras e a possibilidade de adaptação estatística das funções de pertinência às características variáveis do forno à medida que evolui a campanha do forno (de 8 a 12 anos) com a consequente modificação dos parâmetros do forno, como por exemplo, o desgaste dos refratários. O sistema consiste em cerca de 400 regras de produção e 130 "frames". A base de conhecimento é dividida em várias unidades ("knowledge sources"), contendo cerca de 10 regras cada uma e relacionadas a funções tais como, entre outras, velocidade de descida da carga, temperatura e pressão no interior do forno, taxa de utilização de gas, as quais levam a uma unidade de julgamento sobre engaiolamento e deslizamento, etc.

O pré-processamento dos dados de sensores faz um tratamento ("smoothing") dos dados usando o método dos mínimos quadrados. A seguir compara inclinações, variâncias e integrais, com o objetivo de detetar características de mudanças nos valores dos sensores.

Várias telas mostram os resultados aos operadores, apresentando informações tais como hora, nível térmico absoluto e de transição, fatores de confiança dos resultados e tipo de operação recomendada.

A Nippon Kokan reporta como resultado inicial, um índice de acerto de cerca de 83 % , comparável ao de operadores veteranos que é cerca de 80 a 90 % . Também o SE contribuiu para estabilizar a condição do forno, através de uma considerável redução no desvio da temperatura do gusa prevista no vazamento, do silício e do enxofre no gusa.

Devido ao bom desempenho, o SE já foi transportado para outras unidades tais como os altos fornos nº 4 na usina de Fukuyama e o nº 1 na usina de Keihin, e planejam a sua disseminação por muitas outras.

Amano (90), Watanabe (89) e NSC (88) reportam aplicações de SEs na Nippon Steel. Comentam vantagens comparativas como operação estável com conseqüente estabilidade na qualidade e quantidade de produção, contra defeitos na operação convencional tais como falhas causadas por operadores que não percebem lentas e sutis mudanças de condições indicadas pelos sensores, diferentes julgamentos por diferentes operadores, limites na modelagem matemática e na sistematização de padrões de julgamento.

A racionalização dos propósitos da usina de Kimitsu foi a efetiva utilização dos conhecimentos de operadores excelentes e o estabelecimento de um sistema de suporte à operação flexível.

As funções do SE são:

- a sistematização da operação diária através de guia de ações para prevenir desestabilização do estado do forno, para reduzir a relação coque/tonelada de gusa ("coke-rate") e o silício no gusa, para usar equipamentos especiais para mudar o fluxo de gas, para prevenir variações de temperatura nos tijolos refratários, para lidar com chuva, etc.

- sistematização de operações instáveis como o julgamento das causas e posição de "engaiolamentos", procedimentos de correção e recuperação após a descida do material.

- sistematização do conhecimento sobre operações de parada e partida do forno, tais como o cálculo do leite de fusão;

- sistematização das ações que o operador deve tomar quando acontecem problemas com o equipamento durante a operação normal.

Na implementação foi utilizada uma ferramenta da Hitachi chamada EUREKA, a qual define informações como objetos e expressa conhecimento na forma de regras de produção.

Os resultados no alto-forno nº 3 de Kimitsu alcançam o índice de 98,3 % de avaliações corretas do SE e no alto-forno nº 4, o índice de 96,6 % .Também foi claramente demonstrado que o SE pode antecipar uma mudança na operação do forno, por exemplo, em até 5 horas no caso da permeabilidade ao fluxo de gases redutores.

1.6. BREVE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

Com o objetivo de validação dos conceitos e da estrutura dos conhecimentos envolvidos, foi projetado e construído um protótipo contendo as principais características necessárias a um sistema de controle e guia operacional para o processo de altos fornos, utilizando a tecnologia de sistemas baseados em conhecimento.

O sistema atende aos aspectos de ligação on-line com o processo, com a coleta automática dos dados para inferência, controle em tempo real compatível com as necessidades de resposta do processo sob controle, monitoração constante dos efeitos das ações de controle recomendadas e geração de novas ações de controle a intervalos variáveis e apropriados.

Dentro de uma análise de segmentação do problema, definiu-se o escopo do sistema em capturar o conhecimento operacional sobre a estabilidade do ritmo do forno, nos seus aspectos de nível térmico, permeabilidade ao fluxo dos gases de redução, e avarias químicas no produto ferro-gusa.

O sistema foi implementado com a ajuda de uma ferramenta baseada em um dialeto LISP, que suporta os paradigmas de representação de regras de produção, "frames" e procedimentos, utilizando fatores de confiança para o tratamento de incertezas. O conhecimento está representado em cerca de 250 regras distribuídas em 8 "frames", além de algumas meta-regras.

A arquitetura de hardware compreende uma estação de trabalho dedicada exclusivamente ao processamento das inferências, apoiado por um sistema supervisor para tratamento dos dados, recebidos do processo por aquisição direta ou através de sistemas de aquisição, tais como um Sistema Digital de Controle Distribuído, Controladores Lógico Programáveis e microcomputadores.

A figura nº 1.3 mostra a estrutura do ambiente no qual o SBC está integrado.

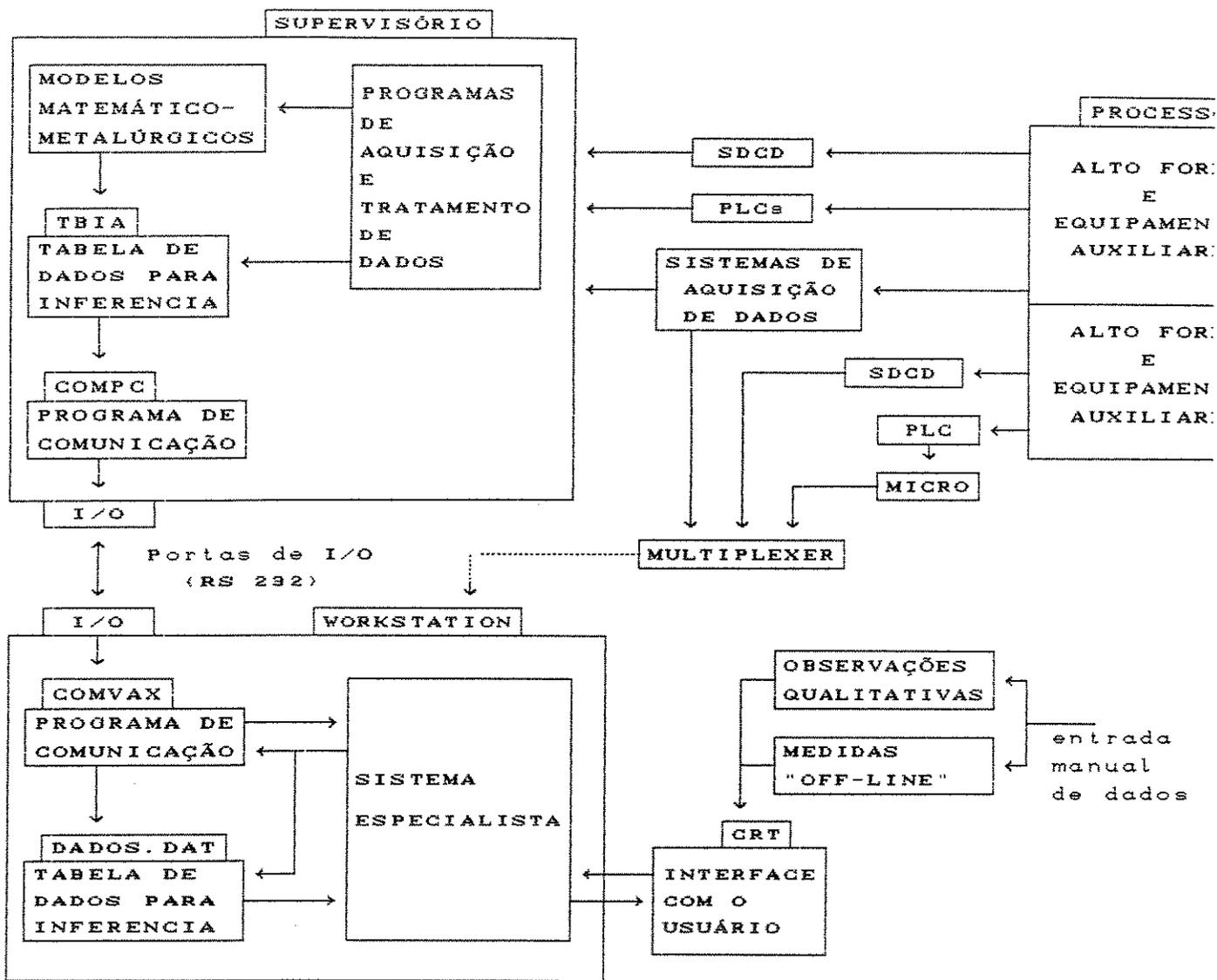


Figura 1.3: Estrutura do hardware e do software do sistema

O projeto do sistema como um todo inclui funções tais como: leitura dos dados de sensores, condicionamento dos sinais, validação dos dados ("data reconciliation"), filtragem e processamento ("smoothing") dos dados, pré-tratamento estatístico, fornecimento dos dados transformados em fatos preparados para as inferências, geração de hipóteses iniciais para o diagnóstico, formação do diagnóstico, definição do problema prioritário para tratamento.

recomendação de ação imediata, recomendações de ações nas causas fundamentais, "display" dos resultados, monitoração dos efeitos e recomendações de novas ações de acompanhamento.

A validação do desempenho do sistema foi feita por engenheiros de processo e por operadores da sala de controle do alto forno nº 2 da CSN, no contexto de avaliação da conveniência operacional e dos conceitos envolvidos dentro do conhecimento contido no sistema (nível térmico), e de aprovação para a expansão do protótipo em um sistema completo, o que foi obtido.

Uma metodologia particular foi desenvolvida e utilizada para o desenvolvimento do projeto. Ela reflete a experiência na fusão de vários métodos e técnicas conhecidos. Visa obter uma sequência de representações do geral para o particular, mas obedecendo ao processo natural de aquisição do conhecimento "middle-up-down", em uma heurística de refinamentos sucessivos a partir de um núcleo de conhecimentos. A utilidade destas abordagens para a aquisição e representação do conhecimento foram consideradas bastante efetivas para os nossos propósitos e são descritas em detalhes na seção nº 2.3 do capítulo 2. As características técnicas do sistema e sua implementação são descritas no capítulo 3.

Neste capítulo foi definido o escopo deste trabalho : absorver as técnicas de desenvolvimento de SBCs, propor uma metodologia para tal, desenvolver um projeto e implementar um protótipo para validação dos conceitos e da tecnologia, aplicado ao problema de controle e guia operacional do processo siderúrgico de altos-fornos, com ênfase nos aspectos de aquisição automática ("on-line") dos fatos para inferência e de controle do processo em tempo real.

O problema foi situado no seu ambiente, através da descrição de uma usina siderúrgica e de um alto-forno em particular.

As motivações para o trabalho foram apresentadas, fundamentadas por aplicações semelhantes em outras indústrias siderúrgicas.

Finalmente, uma breve descrição da solução aqui proposta foi apresentada.

O próximo capítulo tem como tema principal o desenvolvimento de SBCs.

CAPÍTULO II

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO

CONTEÚDO

<i>Seção</i>	<i>Página</i>
2.1. INTRODUÇÃO.....	2.1
2.2. VISÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO.....	2.2
2.2.1 Uma abstração do problema.....	2.2
2.2.2 A abordagem operacional.....	2.4
2.2.3 O processo de desenvolvimento.....	2.6
2.2.3.1 Prototipagem.....	2.6
2.2.3.2 A evolução dos protótipos.....	2.7
2.2.3.3 A eficiência do processo.....	2.8
2.2.4 O conhecimento.....	2.10
2.2.4.1 A natureza do conhecimento.....	2.10
2.2.4.2 Tipos de conhecimento.....	2.11
2.2.4.3 Características do conhecimento.....	2.12
2.2.4.4 Fontes de conhecimento.....	2.15
2.2.4.5 Formas de aquisição de conhecimento.....	2.16
2.2.5 Técnicas e métodos para aquisição de conhecimentos.....	2.16
2.2.5.1 Classificação de Técnicas e Métodos.....	2.17
2.2.5.2 Análise de Técnicas e Métodos.....	2.19
2.3. UMA METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO PARA SBCs.....	2.23
2.3.1 Introdução.....	2.23
2.3.2 Atividades gerenciais.....	2.23
2.3.2.1 Critérios de aplicabilidade da tecnologia.....	2.24
2.3.2.2 Análise de Projeto do protótipo.....	2.25
2.3.2.3 Critérios de validação.....	2.25
2.3.3 O processo de desenvolvimento.....	2.26
2.3.3.1 Considerações iniciais.....	2.26
2.3.3.1.1 Engenharia de software.....	2.26
2.3.3.1.2 Obtenção do conhecimento.....	2.27
2.3.3.1.3 Estratégia.....	2.28
2.3.3.2. 1ª Etapa: Orientação do Engº do Conhecimento... ..	2.29
2.3.3.3. 2ª Etapa: Identificação do Problema.....	2.34
2.3.3.4. 3ª Etapa: Análise das Tarefas.....	2.38
2.3.3.5. 4ª Etapa: Identificação dos Elementos.....	2.41
2.3.3.6. 5ª Etapa: Obtenção de Relações de Dependência..	2.45
2.3.3.7. 6ª Etapa: Análise dos Procedimentos.....	2.47
2.3.3.8. Validação e testes.....	2.48
2.3.4 comentários à metodologia.....	2.51
2.4. RESUMO.....	2.52

2.1. INTRODUÇÃO

Em uma visão cognitiva, o processo de criação de um Sistema Baseado em Conhecimento pode ser abstraído como sendo a aplicação de sucessivas transformações sobre uma representação inicial do conhecimento que o especialista possui, até a obtenção de uma representação isomórfica implementada na máquina.

No aspecto operacional, passa necessariamente pelas fases de obtenção do conhecimento, representação deste conhecimento e validação do que foi feito. O processo é cíclico e incremental, uma vez que o conhecimento vai sendo obtido por partes, até a versão final do sistema.

O significado e conteúdo destas fases e, de forma muito mais detalhada, alguns procedimentos, técnicas e métodos utilizados na operacionalização da fase de aquisição de conhecimentos, serão comentados.

Propõe-se uma metodologia de desenvolvimento integrando várias destas técnicas e métodos e cobrindo todas as fases do ciclo de vida do projeto de desenvolvimento de um SBC. A metodologia é efetivamente utilizada no desenvolvimento do projeto do sistema baseado em conhecimento para altos-fornos.

A seção 2.2 tece algumas considerações teóricas que nortearam o desenvolvimento da metodologia como técnica, descrita em detalhes na seção 2.3 .

2.2. VISÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

2.2.1 UMA ABSTRAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de extrair o conhecimento de um especialista e inserí-lo em uma máquina, pode ser abstraído como sendo o de, existindo uma primeira representação do conhecimento na mente do especialista, aplicar transformações sucessivas e obter uma outra representação computável. O número e a forma destas representações e outras intermediárias, e a maneira de obtê-las, constituirão as técnicas e métodos de solução do problema de construção de sistemas baseados em conhecimento.

O conceito de representação é então importante para esta abordagem :

- Laplanche (88) comenta, de um ponto de vista psicológico, que uma representação é o que forma o conteúdo concreto de um ato do pensamento, a reprodução de uma percepção anterior.
- Em dicionário, o sentido lato da palavra é exatamente uma reprodução daquilo que se pensa .

Como considerado aqui, representar um problema do mundo real é criar uma estrutura isomórfica, que guarde as propriedades relevantes ao domínio do problema.

Uma nova representação do problema decorre de uma transformação adequada para uma perspectiva que ressalta outras interpretações, em outra forma e em diferentes termos, preservando porém a mesma estrutura de informações do problema original, a qual pode ser reconhecida em um nível de abstração apropriado e recuperada.

Então, existe uma primeira representação do problema na mente do especialista, e deverá existir uma representação equivalente computável, a qual levará à própria implementação da solução do problema de construção do Sistema.

Uma sequência de representações é mostrada na figura a seguir, juntamente com os processos de transformação de uma representação em outra.

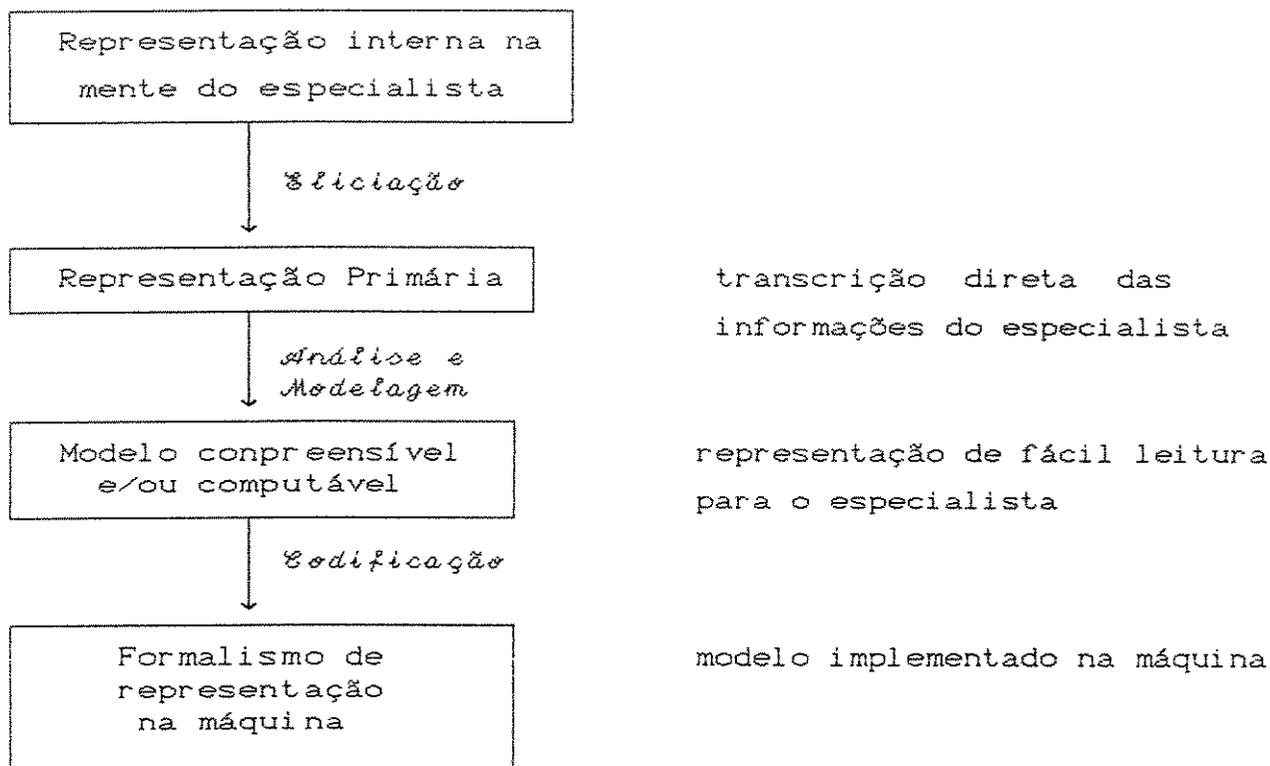


Figura 2.1 : Representações e transformações

A representação do conhecimento interno do especialista, sofre um processo de eliciação¹ e será transformada em uma representação primária, como um texto gravado ou datilografado, o qual deve ser analisado em termos de suas unidades semânticas e das relações entre elas, e ter sua estrutura modelada numa representação secundária, chamada aqui de modelo compreensível, porque precisa fazer sentido para o especialista e para o engenheiro do conhecimento (EC). Este modelo será a linguagem na qual eles se comunicarão. Além de compreensível este modelo deve ser computável, ou seja, permitir uma fácil transposição para algum formalismo de implementação. Isto é tarefa do engenheiro do conhecimento. O objetivo é codificar o conhecimento já representado, em alguma linguagem ou ferramenta, e implementá-lo em um hardware escolhido.

1. eliciação: ato ou efeito de eliciar, fazer sair, expulsar.

(Dicionário da Língua Portuguesa, de Antenor Nascentes).

Visto desta forma, quase toda a solução se prende ao problema de *representar o conhecimento*.

2.2.2 A ABORDAGEM OPERACIONAL

Para se obter o ciclo completo da solução operacional, acrescenta-se à *representação do conhecimento*, a extração do conhecimento existente na mente do especialista, conhecida como *aquisição do conhecimento*, e o processo de verificação da consistência interna entre as representações, chamado *validação*.

O processo pode ser ilustrado pela figura abaixo:

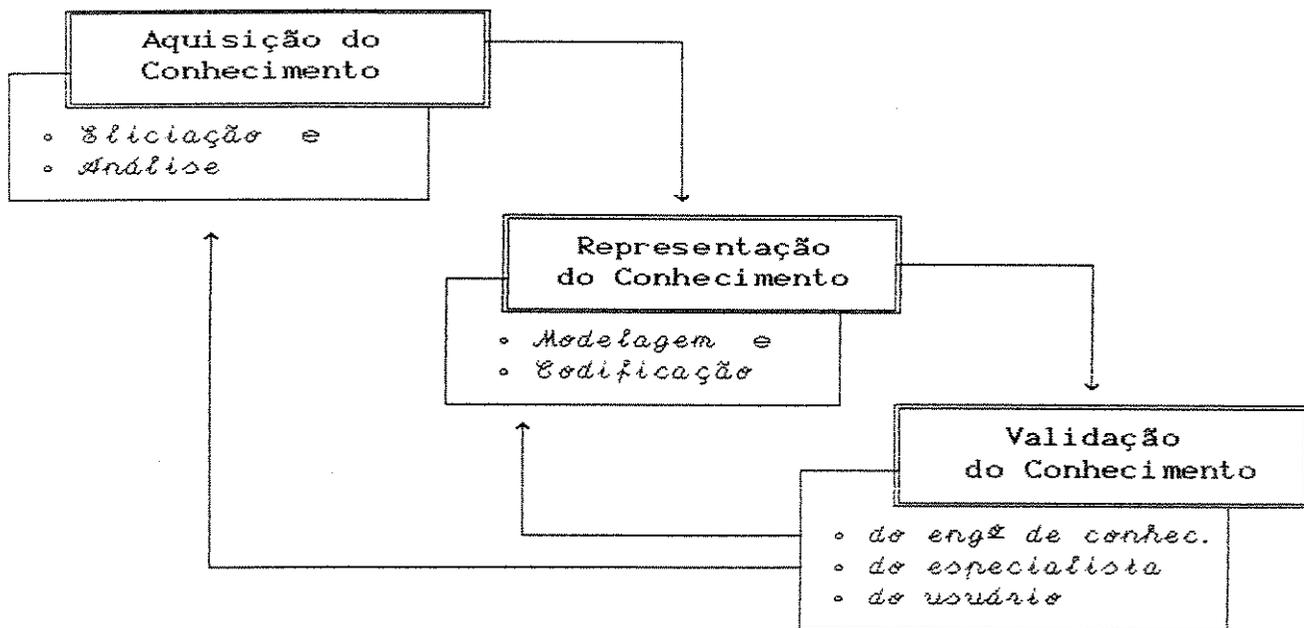


Figura 2.2 : O processo de desenvolvimento de SBC.

Em linhas gerais, é o seguinte o significado dos termos empregados:

Aquisição do conhecimento:

é a fase onde se obtém o conhecimento extraído do especialista. É tradicionalmente considerada como o "gargalo" no processo de construção de Sistemas Baseados em Conhecimento. É composta de

técnicas de eliciação e de análise do conhecimento obtido.

Eliciação do conhecimento: significa obter o conhecimento existente na mente do especialista, explicitando-o em algum tipo de representação ainda muito próxima da forma como foi expressa, em forma ainda não bem estruturada, vaga, imcompleta e, as vezes, inconsistente e contraditória.

Análise do conhecimento: é um processo de classificação e ordenação, identificando-se as *unidades semânticas* existentes no conhecimento já explicitado, tais como os elementos ou objetos, atributos, e valores, assim como as *relações* entre eles, procurando-se obter algumas estruturas do conhecimento, e os *processos de raciocínio* ou inferências empregados para fazer um julgamento, resolver um problema ou projetar uma solução. A análise de conhecimento sobre dados verbais é a transformação dos dados em uma estrutura que dê forma e suporte à *interpretação* das informações. Esta estrutura interpretativa pode variar de um simples esquema de classificação a um modelo forte e complicado [Olson/87, Hoppen/90, Breuker/87].

Representação do conhecimento:

é a criação de estruturas nas quais o conhecimento possa ser armazenado, em formas tais que permitam tanto ao homem compreender as relações entre as partes relevantes do conhecimento, quanto a um sistema computacional interpretar as relações e manipulá-las. É composta de modelagem e codificação.

Modelagem: trata-se de representar a estrutura do conhecimento já obtido, em todos os aspectos relevantes ao problema, numa forma compreensível ao homem e computável, isto é, que permita uma fácil transposição para o formalismo de implementação.

Codificação: é a implementação na máquina da representação computável, em um formalismo de representação do conhecimento tradicional e através de uma linguagem, ambiente ou ferramenta apropriados.

Validação:

é a fase onde se testa a consistência entre representações sucessivas, entre a solução e o problema. O engenheiro do conhecimento verifica se a implementação codificada na máquina é coerente com todos os aspectos representados no modelo computacional. O especialista verifica se a implementação é coerente com o conhecimento que ele possuía originalmente e se é completo. O usuário verificará se a implementação é uma solução para os diversos aspectos do problema real que o especialista se propôs a resolver. Validar o sistema é verificar se a representação interna do especialista é equivalente às representações intermediárias e à representação final codificada, que é a solução ao problema. É um teste que permeia todo o processo de criação de representações.

2.2.3 O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

A Aquisição de Conhecimento do Especialista se faz por partes, de forma incremental, em um processo gradativo de descoberta e eliciação, no qual novos conhecimentos vão se somando aos antigos, ampliando a forma e a estrutura do conhecido, compondo de forma gradual o sentido do Sistema de Conhecimento, inicialmente incompleto e desestruturado, até que a solução seja considerada satisfatória em termos de desempenho operacional.

Nesta aquisição gradual de conhecimentos, é natural que o processo se apoie em uma *Metodologia Iterativa ou Incremental*, que privilegie uma estrutura bastante flexível para a inclusão, modificação ou exclusão de conhecimento.

2.2.3.1 Prototipagem

Isto leva de forma muito natural ao paradigma bem conhecido de Prototipagem, o qual permite a criação de sucessivos modelos para o sistema a ser construído num processo de refinamentos sucessivos, que se adapta muito bem como uma metodologia de desenvolvimento de sistemas especialistas.

O processo é ilustrado na figura a seguir, considerando-se o desenvolvimento de um programa de software convencional. Feita a

definição de requisitos do sistema, um projeto rápido leva à construção de um protótipo, que é avaliado pelo cliente/usuário e usado para refinar os requisitos do programa a ser desenvolvido, sendo normalmente descartado nas fases seguintes de implementação do programa definitivo. O processo é cíclico e iterativo. [PRESSMAN/87, pg. 22]

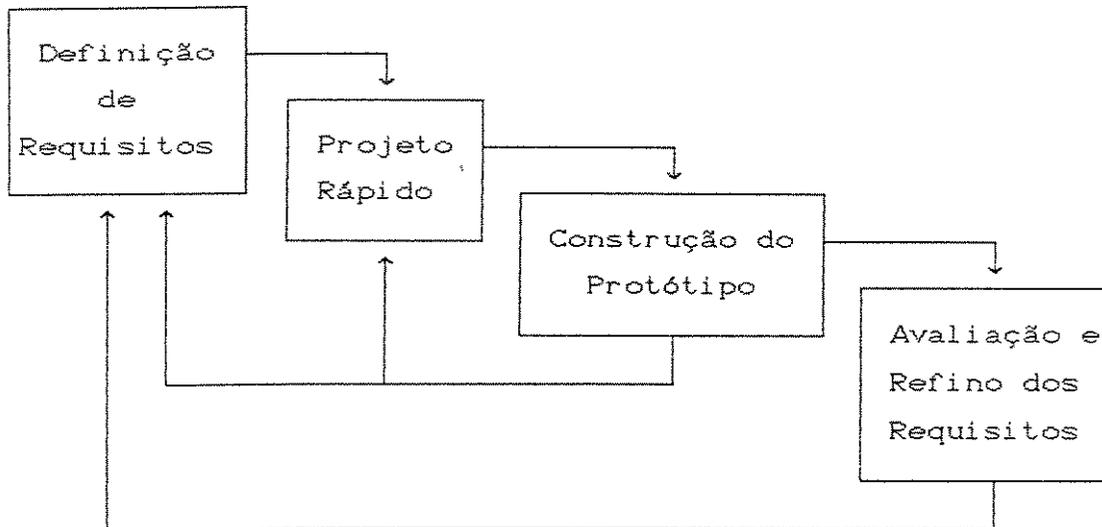


Figura 2.3 : Prototipagem

O processo de desenvolvimento incremental de Sistemas Especialistas pode ser modelado de forma análoga, utilizando a filosofia de protótipos e a evolução em ciclos. Neste caso, é de se esperar que o protótipo não seja descartado, mas evolua de forma cíclica e iterativa até o produto final. O processo temporal evolui em ciclos, onde os modelos obtidos na fase de Representação do Conhecimento são validados e incrementados por nova aquisição de conhecimentos.

2.2.3.2 A evolução dos protótipos

Após alguns ciclos o modelo pode ser "congelado" como o protótipo de demonstração da viabilidade do conceito (contendo, por exemplo, o conhecimento equivalente a cerca de 50 regras).

O objetivo do protótipo é fazer prova de conceitos, para isto se permitindo o uso de ferramentas ou "shells" que permitam ao programa ser gerado rapidamente, sem compromissos essenciais ao

produto final, como por exemplo, a qualidade do software, a eficiência das inferências, os aspectos de interação com o processo, etc.

Este protótipo pode ser utilizado como demonstração, para obter a aprovação do projeto e os recursos necessários, assegurando aos usuários que o Sistema Especialista pode se desempenhar de acordo com as expectativas e obtendo o apoio da Organização para o esforço e tempo requeridos para desenvolver o sistema maduro [HU/87,pg.41] . Em se dispendo de tempo, é desejável que as telas da interface homem-máquina desta fase sejam bem elaboradas, para causar impressão favorável ao usuário.

O conhecimento e as estruturas contidos neste protótipo de demonstração evoluirão de forma incremental na direção de um protótipo interno de laboratório, contendo a estrutura definitiva do conhecimento dos especialistas e um volume razoavelmente grande do conhecimento total, a fim de ser validado pelos usuários.

A evolução do desenvolvimento leva a um protótipo dito de campo, onde testes são conduzidos já no ambiente operacional, para o refino das inferências e fatores de confiança ou incerteza associados aos resultados, congelando-se então a solução definitiva em um protótipo dito de produção.

2.2.3.3 A eficiência do processo

Na fase de representação do conhecimento, as qualidades do modelo ser compreensível e computável podem ser conflitantes [HOPPEN/90]. Se o modelo de representação não reunir estas duas características, deve-se usar representações distintas, que privilegiem separadamente os aspectos de ser computável e ser compreensível.

A existência de um modelo intermediário, dito modelo compreensível, de mais fácil interpretação e leitura, é muito conveniente e traz vantagens como as seguintes:

- Este modelo será a linguagem de comunicação entre o engenheiro do conhecimento e o especialista. A comunicação entre o engº do conhecimento e o especialista deve ser feita em uma linguagem de fácil interpretação para ambos, nem muito próxima de

uma representação de máquina, de fácil leitura para o engenheiro do conhecimento e difícil para o especialista, nem tão próxima do modelo mental da solução existente na mente do especialista, inacessível diretamente. O especialista deve se sentir confortável com a interpretação do modelo compreensível;

- A validação do conhecimento eliciado pode ser feita pelo especialista, em uma primeira instância, pela comparação entre a sua representação original da solução e o modelo compreensível;

- Após alguns ciclos do processo, o especialista aprende a "falar" a linguagem do modelo compreensível, transformando diretamente o seu conhecimento nesta representação compreensível. A tendência natural é que a eliciação do conhecimento se faça diretamente no formalismo do modelo compreensível escolhido. Isto, na nossa experiência, aumenta dramaticamente a eficácia do processo de aquisição de conhecimentos;

- O modelo de representação do conhecimento empregado em um ciclo do processo de construção do SBC tende a se tornar um instrumento na fase de aquisição do conhecimento dos próximos ciclos, melhorando a eficiência do processo.

Outro grande fator de eficiência no processo é se esta representação compreensível puder também ser computável, ou seja, puder ser facilmente transformada em um formalismo de representação na máquina tal como, por exemplo, triplas objeto-atributo-valor e regras de produção.

Pode vir a acontecer que, a medida que o especialista se envolve interessadamente no processo de construção do sistema baseado em conhecimento, e fica definido que ele será responsável pela manutenção e atualização da base de conhecimentos, ele aprenda sobre os formalismos de representação na máquina que a linguagem ou ferramenta de implementação suportem. Isto ampliará a janela de comunicação com o engenheiro de conhecimento, da linguagem do modelo compreensível para a linguagem do modelo computável.

É então conveniente que o engenheiro do conhecimento encontre uma representação e um método dirigido que, contemplando todos os aspectos e informações necessárias à solução do problema, preencha as características do modelo compreensível proposto.

2.2.4 O CONHECIMENTO

2.2.4.1 A natureza do conhecimento

De acordo com a filosofia clássica tradicional, conhecimento significa a apropriação de algo pelo pensamento, quer por percepção, quer por definição, quer por análise, etc. .

Conhecimento tem sido definido como crenças que são geralmente aceitas como verdadeiras no domínio da aplicação [Oglethorpe et al/89].

À parte nosso interesse pragmático em Representar o Conhecimento, é interessante conhecer algumas considerações que Delgrande & Myloupoulos tecem sobre características do conhecimento.

A definição de Conhecimento envolve os conceitos de *crença justificada e crença verdadeira*.

Crença pode ser entendida como qualquer coisa que possa ser representada. Assim, dado um Sistema Baseado em Conhecimento (ou Agente) A, A tem crença na sentença P, simplesmente quando P aparece na Base de Conhecimento de A.

A crença justificada que não se sabe ser verdadeira é uma hipótese [Quine & Ullian/78]. A introdução de crenças justificadas em uma Base de Conhecimento é feita através de condições de derivabilidade ou inferência a partir de crenças anteriores, em formas clássicas tais como a inferência dedutiva, a inferência abdutiva e a indução.

É a verdade estabelecida de uma declaração ou uma sentença que faz uma hipótese se tornar *conhecimento*. Conhecimento então, pragmaticamente, consiste daquelas sentenças que são tomadas pelo Agente A como garantidamente verdadeiras. Isto sugere que um particular conjunto de declarações pode ou não ser considerado conhecimento, dependendo de um particular ponto de vista.

O valor verdade associado a declarações, (usualmente verdadeiro ou falso) é feito em termos de uma função semântica ou interpretação, a qual *modela* uma Base de Conhecimento se e somente se, todas as sentenças na Base de Conhecimentos vem a ser verdadeiras através da interpretação feita.

2.2.4.2 Tipos de conhecimento

Sistemas Especialistas não tratam problemas genéricos, de domínio não delimitado e que envolvam conhecimento de senso comum (bom senso) sobre o mundo. Há eficiência apenas no tratamento de problemas que requeiram conhecimentos especializados, em um domínio restrito. O conhecimento teórico sobre um tópico especializado, de caráter acadêmico e axiomático, pode ser muito pouco usado pelo especialista na solução de um problema. O conhecimento empírico, com o uso de heurísticas, caracterizam o tipo de conhecimento encontrado em um Sistema Especialista.

Entretanto, o conhecimento especializado teórico e axiomático é também importante na construção de Sistemas Especialistas. Livros e outros documentos formam a base teórica ou os princípios básicos que são os *conhecimentos de suporte* que habilitam a geração de justificativas e explicações não triviais, características desejáveis em um SE [Breuker/87].

Os dados que formam o conhecimento perito ou peritagem, são escassamente encontráveis em documentos, mas sim no conhecimento empírico possuído por um especialista veterano na solução de um problema especializado. Este conhecimento é permeado pelo uso de heurísticas obtidas através de grande experiência prática.

Parte deste conhecimento será plenamente consciente ao especialista, o qual terá possibilidade de articulá-lo diretamente, explicitando-o de forma clara, direta e objetiva.

Não será sempre o caso porém, que o especialista tenha acesso fácil ou consciente aos detalhes do seu próprio conhecimento e processos mentais. Este tipo de conhecimento é conhecido como tácito e pode ser dividido em implícito e inconsciente.

Parte do seu conhecimento especializado conterá suposições implícitas, que por lhe parecerem óbvias, são consideradas automaticamente no exercício da especialidade e não são explicitadas normalmente ao engenheiro do conhecimento. Este tipo de conhecimento é dito ser implícito.

Outra parte de seu conhecimento lhe é inconsciente; é usado de modo também automático, e não pode ser transportado facilmente do

inconsciente para o nível consciente. Neste caso, o especialista sabe o que fazer, percebe relações complexas e chega a conclusões mas sem saber exatamente como, e tem dificuldades em explicar porque e como o fez. Ele precisa, para ser eliciado, de *métodos indiretos*, que ajudem o especialista a explicitar tais conhecimentos. Tais métodos, como aliás muito de todo o processo de aquisição de conhecimentos, apoiam-se fortemente em ciências tais como a psicologia e a sociologia, nos seus aspectos de comportamento, comunicação e percepção [Hopper/90, Olson/87].

A maior parte do conhecimento contido nos SEs usuais é obtida por articulação direta e consciente do especialista, que revela o seu conhecimento simbólico - em oposição a conhecimento numérico - sobre os *objetos* do domínio do problema, as *relações* entre eles e os *procedimentos* associados à solução do problema. O conhecimento sobre os objetos e as relações entre eles é referenciado como conhecimento declarativo, e contém as estruturas estáticas do conhecimento. O conhecimento procedimental é associado ao controle dos mecanismos de inferência empregados para resolver partes do problema ou fazer um julgamento, e diz respeito ao comportamento dinâmico da solução. É a forma na qual o especialista usa o conhecimento declarativo para resolver um problema.

Pragmáticamente, do ponto de vista da representação e codificação de um SBC, podemos exemplificar o conhecimento declarativo como Regras inferindo o Valor ou a existência de um Atributo a partir do Valor ou existência de outro Atributo. O conhecimento procedimental é expresso em Regras de Ação de Controle, que inferem ações de controle a partir do Valor ou existência de certos Atributos. O conhecimento procedimental, como aqui definido, é um conhecimento cujo objeto é um outro tipo de conhecimento, (conhecimento de controle sobre o conhecimento declarativo) e pode ser também denominado de Metaconhecimento [Oglethorpe et al/89].

2.2.4.3 Características do conhecimento

À parte os conhecimentos declarativo e procedimental que toda aplicação necessariamente possuirá, existem outras características que um problema particular pode apresentar e

que devem ser representadas e tratadas pelo SBC, sob pena dele não poder simular a forma de inferência usada pelo especialista, ou executar a solução de forma satisfatória. Algumas destas características são inerentes à vida real e fazem parte, provavelmente, de qualquer Sistema Especialista, e incluem o seguinte:

2.2.4.3.1 Incerteza

Incerteza diz respeito ao grau de confiança que o especialista ou o usuário tem na verdade de um fato particular. Quer dizer, ele pode achar que um fato é verdadeiro sem estar absolutamente certo, o que é comum em problemas práticos.

Uma das questões é conhecida como acumulação de evidências, ou seja, como alterar a confiança em um resultado quando novos fatos e relações vem acrescentar novas evidências ao mesmo resultado. Abordagens para a solução incluem a teoria de probabilidades tradicional, a teoria de Dempster-Shafter, e métodos de manipulação de fatores de confiança, tal como o adotado no sistema EMYCIN.

Outra questão é conhecida como propagação de evidências. Em termos de uma inferência, como uma regra de produção, existe incerteza associada à verdade da declaração da premissa ou condição, e incerteza associada à própria inferência (ou regra) que deduzirá a consequência ou ação. Por exemplo, uma regra estabelece: SE (a temperatura do cadinho do Forno é alta), ENTÃO (há tendência do forno esquentar) . Um operador observa a temperatura do cadinho, *acha* que está alta e informa ao Sistema que "Sim", com uma confiança associada de 90 % . Esta é a confiança associada por ele à premissa. Já o especialista assinala um grau de confiança na regra que ele proprio criou: se a temperatura do cadinho é alta mesmo (com 100% de confiança), então devo deduzir com 65 % de confiança que o forno vai esquentar.

Em um sistema de fatores de confiança, como no EMYCIN, a incerteza na evidência da premissa (90%), é propagada para a conclusão, modulada pela incerteza da inferência (65%), assinalando um fator de confiança de $0.9 \times 0.65 = 0.58$ (ou 58 %) na certeza da conclusão.

2.2.4.3.2 Imprecisão

Imprecisão diz respeito ao conteúdo da declaração ser impreciso. Por exemplo, a declaração " A temperatura está alta " é imprecisa no sentido de que não sabemos exatamente quão alta ela é, embora possamos ter quase absoluta confiança de que ela está alta (pela informação do operador).

Uma forma de tratamento da imprecisão é através de Lógica Nebulosa ("fuzzy logic"). Distribuições de Probabilidade também podem representar imprecisão.

2.2.4.3.3 Inconsistência

A noção de inconsistência em uma base de conhecimentos, significa que o assinalamento de quaisquer valores de verdade às proposições do domínio levam sempre a uma incoerência lógica na verdade de alguma das proposições. Ou seja, não há uma interpretação ou função semântica que modele as proposições do domínio ou da base de conhecimentos, de forma tal que todas as sentenças venham a ser verdadeiras por esta interpretação.

Na prática, é de se esperar que existam inconsistências, principalmente em grandes bases de conhecimento, com grande número de informações.

2.2.4.3.4 Inexatidão

Uma base de conhecimento é inexata quando produz uma descrição do domínio com informações que se supõe serem verdadeiras quando de fato não são.

Na prática, por exemplo em um SBC para controle de processos, é perfeitamente possível, e mesmo provável, haver uma fonte externa com informação incorreta, tal como um sensor defeituoso.

2.2.4.3.5 Não-completeza

A lógica dos mecanismos de inferência faz com que, a falha em encontrar a informação necessária para a inferência em uma base de dados ou na base de conhecimentos, ao invés de ser considerada informação desconhecida, seja considerada

como informação negativa.

2.2.4.3.6 Relatividade

Agentes diferentes tem crenças diferentes, e possivelmente inconsistentes, sobre um domínio de discurso. O conhecimento é relativo a um agente.

2.2.4.3.7 Não-monotonicidade

Um sistema de inferência é classificado como não-monotônico quando uma nova informação causa uma velha conclusão ser revista. A maioria das inferências feitas em problemas do mundo real tem esta característica: considerando-se conhecer um conjunto de informações e relações de inferência, uma conclusão é obtida; aumentando-se o conhecimento dos fatos, com o mesmo conjunto de inferências uma nova conclusão pode ser conflitante e substituir a antiga [McDermott,85].

Ao contrário, bases de conhecimento onde uma conclusão se mantém não importa que novos fatos sejam adicionados são chamadas monotônicas. Além disso, fatos adicionais sempre levam a conhecimento adicional. A lógica de primeira ordem e outras lógicas convencionais são monotônicas. Infelizmente, como notou Minsky, monotonicidade não é uma propriedade do conhecimento de senso comum e do raciocínio feito com este conhecimento. Sistemas Baseados em Conhecimento construídos com a lógica formal clássica serão monotônicos e não representarão bem o conhecimento sobre problemas do mundo real.

Soluções propostas são a extensão da lógica de primeira ordem com operadores sentenciais de consistência [McDermott], a adição de fórmulas de circunscrição do domínio [McCarthy], ou a adição de regras "default" de inferência à lógica de primeira ordem.

2.2.4.4 Fontes de Conhecimento

Todo o problema de construção de Sistemas Baseados em Conhecimento gira em torno do conhecimento e de dados ou fatos para as inferências. As fontes de informação onde vão se buscar tais conhecimentos e dados são, via de regra, os especialistas, mas podem

incluir:

- conhecimento teórico sobre o domínio,
- documentação técnica,
- manuais de procedimentos, normas e padrões,
- histórico de problemas,
- diagramas, gráficos e mapas operacionais,
- usuários finais,
- dados em banco de dados,
- dados de sensores, etc.

2.2.4.5 Formas de aquisição de conhecimentos

No processo de construção de sistemas especialistas, a forma usual de aquisição de conhecimentos, é a transferência da peritagem na solução de um problema de uma pessoa especialista para o computador, normalmente através de entrevistas face a face com o engenheiro do conhecimento ou com a ajuda de um programa editor e interpretador inteligente, num ambiente de interface amigável [Hayes/83]. Outra forma de aquisição seria através de um programa de indução do conhecimento na solução do problema a partir de uma base de dados de exemplos [Boose/86].

2.2.5 TÉCNICAS E MÉTODOS DE ELICIAÇÃO DOS CONHECIMENTOS

O objetivo principal da Fase de Aquisição, no processo de construção de Sistemas Baseados em Conhecimento, é a obtenção do conhecimento relevante ao domínio do problema. Este conhecimento pode provir de diversas fontes e em diversas formas. Uma metodologia geral que contemple a aquisição de todas as formas e tipos de conhecimento e classes de problemas não está bem estabelecida; ao contrário, um grande número de métodos e técnicas tem sido aplicados para a aquisição de conhecimentos.

No processo de desenvolvimento, cada técnica se adapta a uma situação, e podem ser classificadas de acordo com alguns critérios, como veremos a seguir.

Descrições de algumas destas Técnicas e Métodos encontram-se na seção 2.3 deste capítulo, quando utilizados na Metodologia proposta.

2.2.5.1 Classificação de técnicas e métodos

No processo de aquisição de conhecimentos várias técnicas e métodos tem sido empregados em função de características do problema e da natureza do conhecimento envolvido.

Sob o nome de técnicas [Giorno et al/88] tem classificado um conjunto de procedimentos práticos que suportam o processo de aquisição, enquanto que por método, entende-se uma forma lógica, ordenada e estruturada de transpor as habilidades do especialista para uma base de conhecimento, a qual pode ser composta de uma ou mais técnicas.

Outra classificação [Olson/87] é a de técnicas ou métodos apropriados para a eliciação de conhecimentos conscientes (métodos diretos), ou conhecimentos tácitos, implícitos ou inconscientes (métodos indiretos).

Uma lista de técnicas e métodos classificadas pragmaticamente em função dos tipos de conhecimento necessários para a construção de um SBC, como comentado na seção 2.2.4.2 , é mostrada na Figura 2.4 na página seguinte:

	conhecimento <u>Conceitual</u>				
	conhecimento <u>Tácito</u>				
	conhecimento Declarativo sobre <u>Elementos</u>				
	conhecimento Declarativo sobre <u>Relações</u>				
	conhecimento <u>Procedimental</u>				
	P	R	E	T	C
entrevista informal	•				•
entrevista estruturada	•	•	•	•	•
perguntas focadas	•	•	•		•
questionários	•	•	•		•
Análise de Tarefas e Casos					
observação de tarefas familiares					
observação simples	•				•
análise de protocolo retrospectiva	•			•	
análise de protocolo simultânea (em tempo real)					
análise por interrupção	•				
análise de protocolo "fala-enquanto-faz"	•	•	•		
por simulação					
tarefas com informação restrita	•				
tarefas com processamento restrito					
com tempo limitado	•			•	
diagnóstico por telefone	•				•
estudo de casos					
casos típicos	•				
casos críticos	•				
casos pensados	•				
hipóteses terminais (HITE)		•	•		
lista de fatos com encadeamento a posteriori (LIFA)		•	•		
codificação por listas adaptada (Rocha)		•	•		
fluxos de inferência		•	•		
Técnicas de estruturação do domínio					
criação de grupos de tarefas				•	
separação de grupos de tarefas				•	
escalonamento multi-dimensional		•			•
grade de repertório		•			•
árvores ordenadas por lembrança		•			•
agrupamentos hierárquicos de Johnson		•			•
redes ponderadas		•			•
diagramas		•			
curvas fechadas		•			
fatores críticos de sucesso		•			
focos de atenção		•			
brainstorm	•	•	•	•	•
brainstorm adaptado	•	•	•	•	•
modelagem	•	•	•	•	•
Análise por "chunks"	•	•	•	•	•

Legenda: (●) significa uso principal e (•) uso secundário.

Figura 2.4 : classificação de técnicas e métodos

2.2.5.2 Análise de algumas Técnicas e Métodos

A seguir fazemos uma breve descrição do uso principal e usos secundários de algumas técnicas, em função do tipo de conhecimento que se quer obter, se conceitual, procedimental, declarativo, ou tácito; e em função do seu uso na metodologia para obter algum modelo, tabela etc. São indicadas para cada técnica, algumas referências, os pontos positivos, e os ônus ou desvantagens associadas.

Entrevista informal

É descrita em detalhes no item 2.3.3.2.3 e nas referências [Hoppen,90], [Olson,87], [Ayton,87], e [Giorno,89]. Consiste em uma interação direta entre o engenheiro do conhecimento (EC) e o especialista através de palavras. É usada ao início do processo de aquisição para obter informações conceituais e uma visão geral do problema, conhecimento básico sobre a aplicação e estabelecer um bom relacionamento com o especialista. Apresenta como desvantagem o fato de absorver muito tempo do EC e fornecer informações genéricas que precisam ser validadas a posteriori, mas é indispensável nos primeiros contatos com o especialista.

Entrevista Dirigida

[Giorno,89], [Hoppen,90], [Olson,87], [Ayton,87]. É uma entrevista planejada com antecedência e aplicada sistematicamente, de forma estruturada e focada em um tópico específico. Normalmente faz uso de outras técnicas tais como perguntas focadas, questionários, análise de casos, etc. É usada ao longo do processo de aquisição para obter conhecimento sobre os elementos, os atributos, os valores e os procedimentos.

Análise de Tarefas

Consiste no estudo dos procedimentos utilizados pelo especialista quando este executa tarefas relacionadas com o problema que o SBC pretende resolver. Sob este nome genérico agrupamos várias técnicas bem comentadas na literatura, e as classificamos em Análise

de Tarefas por Observação, por Simulação, e Estudo de Casos. São excelentes para a obtenção de Conhecimento Procedimental.

A Observação Simples da Tarefa, [Olson,87], [Giorno,89], consiste simplesmente em olhar o especialista em ação "on-the-job", tomar notas e apreender os procedimentos e o pensamento do especialista na hora em que acontecem. Indispensável para obter Conhecimento Conceitual básico sobre a aplicação. Como ônus, a presença do EC pode causar uma polarização indesejável no desempenho do especialista; também pode ser grande a pressão do tempo para o EC que toma notas e procura compreender a tarefa. A observação simples pode envolver uma participação mais ativa do EC, perguntando e confirmando seu entendimento com o especialista. Se chegar ao ponto de realmente interromper o fluxo do raciocínio do especialista, mergulhando no esclarecimento de um tópico no momento da ação, é chamada de Análise por Interrupção [Olson,87]. É útil para validar o conhecimento já codificado em um protótipo e para preencher uma falta de informação naquele tópico em especial.

Uma opção sempre presente é gravar em vídeo o desempenho do especialista. A Análise de Protocolo Retrospectiva [Hoppen,90], [Giorno,89], [Gonçalves,86], [Olson,87], [Ayton,87] é a análise *a posteriori* da fita de vídeo, junto com o especialista

A Análise de Protocolo Simultânea permite observar o que o especialista realmente faz em contraposição ao que ele diz que faz [Hoppen,90]. É boa para capturar e validar conhecimento procedimental.

Nas páginas seguintes, apresenta-se uma tabela com os pontos positivos e negativos de algumas técnicas:

TÉCNICA	PONTOS POSITIVOS	ÔNUS E DESVANTAGENS
Entrevista	<ul style="list-style-type: none"> *Excelente para obter informação conceitual e conhecimento básico sobre relações, elementos, valores e procedimentos. *Fácilmente aplicável. 	<ul style="list-style-type: none"> *Absorve muito tempo do EC *Baseia-se na memória do especialista.
Análises de Tarefas (em geral)	<ul style="list-style-type: none"> *Excelentes para obter conhecimento Procedimental. 	<ul style="list-style-type: none"> *Consumidoras de tempo. *Podem ser consideradas intrusivas pelo usuário e o especialista se gravadas em vídeo.
Observação Simples da Tarefa	<ul style="list-style-type: none"> *Indispensável para conhecer o ambiente da aplicação e relacionar o Conhecimento Conceitual com a realidade. *Muito boa para conhecer o ponto de vista do usuário *Confortável para o especialista. 	<ul style="list-style-type: none"> *A presença do EC pode alterar o desempenho do especialista.
Análise de Protocolo Retrospectiva	<ul style="list-style-type: none"> *Boa para eliciar Conhecimento Tácito. *Contorna o problema da presença perturbadora do EC. 	<ul style="list-style-type: none"> *Um pouco mais trabalhosa e expansiva. *O especialista pode ser sensível a ser analisado no vídeo.
Análise por Interrupção	<ul style="list-style-type: none"> *Apropriada para validar Conhecimento Procedimental já codificado em um protótipo. *Boa para "preencher um vazio" de conhecimento em um tópico particular de um sistema já feito. 	<ul style="list-style-type: none"> *Interrompe a execução da tarefa.
Análise de Protocolo Concorrente (think-out-loud)	<ul style="list-style-type: none"> *Permite obter informações mais precisas que nas entrevistas. • 	<ul style="list-style-type: none"> *Mais esforço na interpretação das informações. *Desconfortável para o especialista. *Não é conveniente para tarefas de longa duração. *Não se aplica a tarefas nas quais a verbalização não seja parte natural do processo de raciocínio.

Simulação
de Tarefa
com
Limitação nas
Informações

*Utilizável para preencher
cher vazios no Conheci-
mento Procedimental em
subdomínios específicos.

*Desconfortável para o es-
pecialista, que se sente
sob pressão.

Simulação
de Tarefa
com
Limitação no
Processamento

*Boa para adquirir Conhe-
cimento Tácito.

*Muito boa para obter o
texto do diálogo do sis-
tema com o usuário.

Estudo
de
Casos

*Produz conhecimento só-
lido e alguns elementos
que dificilmente seriam
explicitados.

*Boa para refinar o Conhe-
cimento Procedimental
complementando o conhec.
já adquirido.

*Um pouco cansativa.

2.3. UMA METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO PARA SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO

Nesta seção é descrita uma metodologia para desenvolvimento de Sistemas Baseados em Conhecimento, tal como utilizada neste trabalho, no desenvolvimento do SBC para guia operacional de Altos Fornos.

2.3.1 INTRODUÇÃO

A Aquisição de Conhecimentos para o desenvolvimento de SBCs é um campo novo, sem uma metodologia bem estabelecida. Portanto o engenheiro do conhecimento deve adaptar do repertório de métodos, técnicas e metodologias parciais conhecidas, aquelas que se ajustam a sua aplicação particular.

A metodologia particular aqui descrita, foi empregada para o desenvolvimento do Sistema Especialista para Guia Operacional do Alto Forno nº 2 da CSN, e reflete a experiência prática na fusão do uso de alguns métodos e metodologias aprovadas, tais como a metodologia KADS de Breuker e Wielinga [Breuker,87], [Wielinga,89], o método empregado por Rocha e Leão [Rocha,89] na aquisição de conhecimentos para diagnóstico médico, o método de desenvolvimento para o ESE da IBM UK [Oglethorpe,89], além de várias técnicas comuns na literatura.

São comentadas algumas atividades adicionais que precedem a engenharia de software do desenvolvimento.

2.3.2 ATIVIDADES GERENCIAIS

O desenvolvimento de um SBC, ao lado de aspectos de engenharia de software particulares, possui características gerenciais inerentes a qualquer projeto.

Assim, é conveniente o planejamento do projeto em aspectos tais como o estudo da adequabilidade do emprego de SBCs para a solução, as estimativas de custo, benefícios, recursos humanos, etc. para a

aprovação técnica e gerencial do projeto. No caso deste trabalho, são comentados alguns destes elementos.

2.3.2.1 Critérios de aplicabilidade da tecnologia de SBCs

A parte a experiência bem documentada na literatura do emprego de SBCs a certas aplicações, cujo sucesso por si só já justificaria o projeto, (como é o caso aliás do controle do processo de altos-fornos), existem certos sinais, critérios ou condições que identificam o campo de problemas nos quais pode-se esperar que a tecnologia de SBCs seja empregada com vantagens sobre a programação convencional.

A existência de alguns destes sinais reforça a hipótese de que o problema contenha componentes de programação não-convencional, com a presença potencial de um componente heurístico e que o nível de esforço necessário para implementá-lo será menor em um ambiente de SBCs do que em um com computação tradicional. O problema em apreço deve ser investigado nas suas características, em relação a alguns critérios [Stock/88], [Hu/87], que são difíceis de realizar com abordagens de computação tradicional, tais como a seguir:

a) *O problema é mal definido, ou melhor, é difícil ou impossível descrevê-lo em uma solução analítica em uma forma fechada, tal como uma coleção de fórmulas ou um modelo matemático-metalúrgico completo com as quais se possa, funcional e analiticamente, alcançar uma solução. Ou seja, o algoritmo de solução é pobre ou não há um centro racional sobre o qual se possa basear a solução. Também, havendo a necessidade de busca pela solução, (em oposição à existência de um algoritmo que leve diretamente a ela), à medida que houver mais e mais busca, menos bem definido será o problema de um ponto de vista analítico e matemático.*

b) *O sistema deve imitar ou emular certas qualidades normalmente associadas ao comportamento humano, tais como habilidade para aprender, ou explicar como e porque faz o que fez, ou haver auto-modificação do programa.*

c) *A solução eficiente do problema é baseada no conhecimento especialista, requerendo heurísticas próprias e decisões de*

juízo baseadas na experiência e onde se procure *capturar estas habilidades humanas*.

d) A observação de que o problema, ao lado de eventuais conteúdos de fórmulas e números, *é composto substancialmente de entidades, objetos, símbolos e relações* entre eles.

e) Embora haja um algoritmo para a solução, ele não leva com facilidade à aquisição dos dados orientados pela lógica do programa. Para tal seria necessário anteciper cada caminho, fazendo um "trace" por toda a aplicação. Se os dados pudessem anteciper a lógica, teríamos uma *computação orientada pelos dados* ("data-driven"), própria da tecnologia baseada em mecanismos de inferência.

f) O problema contenha uma componente não-determinística, ou probabilística, ou com incertezas associadas.

2.3.2.2 Análise de projeto do Protótipo de Viabilidade

Convencidos da propriedade do uso da tecnologia na solução, deve ser preparado um estudo de viabilidade do projeto, afim de se obter sua aprovação, ainda que a nível de um protótipo de viabilidade e demonstração. Este estudo deve conter informações tais como :

- escopo do projeto;
- descrição funcional;
- referências a casos semelhantes;
- riscos associados;
- recursos humanos e materiais;
- custos;
- benefícios esperados;
- retorno do investimento;
- cronograma físico e financeiro.

Um exemplo do documento Análise de Projeto, tal como preparado para o sistema aplicado ao controle do alto-forno, encontra-se em [Fernandes/89].

2.3.2.3 Critérios de validação

Também os critérios de validação para aferir se o sistema

atingiu os objetivos do projeto são importantes. No caso deste projeto, o banco de dados histórico existente possui informações já consolidadas a um nível secundário quanto aos conhecimentos fatuais necessários ao processo de inferências, donde uma simulação não seria possível. A validação do protótipo se fará pelos operadores usuários, segundo seus critérios próprios de aferir a conveniência da solução como guia operacional de auxílio ao diagnóstico da condição do forno e às ações de controle recomendadas. Um corpo técnico formado por engenheiros especialistas externos ao projeto, poderá também prover sua avaliação.

2.3.3 O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

Uma vez aprovado o Projeto, e os recursos humanos tais como o(s) especialista(s) tenham sido alocados, a etapa de construção do SBC pode ser iniciada.

2.3.3.1 Considerações iniciais

2.3.3.1.1 Engenharia de software

A moderna Engenharia de software recomenda a criação de um modelo de representação independente da forma de implementação. A metodologia de Paul Ward [Ward/86], por exemplo, própria para desenvolvimento de Sistemas para Controle de Processos em Tempo Real, recomenda a separação da essência do problema, numa descrição que seja válida independentemente da tecnologia de implementação da solução, construindo o Modelo Essencial. O modelo essencial é composto por um modelo do Ambiente da aplicação e por um modelo do Comportamento do processo.

No desenvolvimento de SBCs é amplamente recomendada a utilização da Metodologia de Prototipagem, devido principalmente à natureza incremental da aquisição dos conhecimentos, o que torna muito difícil conhecer o problema como um todo antes do trabalho de aquisição.

A metodologia adotada aqui segue a Prototipagem, que nos parece natural, porém com a obtenção em primeiro lugar de Modelos

Conceituais Gerais do domínio da aplicação, embora não completamente independente da forma de implementação prevista. Nisto seguimos as recomendações de Breuker, Oglethorpe e Ward. Estes modelos conceituais gerais serão: o Modelo de Interpretação, o Modelo de Procedimentos, e o Modelo de Entidades.

Assim, mantém-se uma solução de compromisso com o ideal do Modelo Essencial de Ward. O processo de codificação do protótipo só se inicia após uma parte substancial do problema se achar compreendida e modelada, e estes modelos gerais não são completamente independentes da linguagem, ferramenta ou ambiente de implementação previstos.

Vários ciclos de Aquisição, Análise e Modelagem são realizados para a obtenção destes Modelos Conceituais, antes que os conhecimentos obtidos sejam representados num Modelo de Implementação, Codificados (formando um Protótipo) e Validados, realizando assim um ciclo completo da metodologia de Prototipação.

Procura-se obter uma sequência de representações ideal, do geral para o particular ("top-down"), mas obedecendo ao processo natural de criação ("middle-up-down"), numa heurística de refinamentos sucessivos a partir de um núcleo de conhecimentos adquiridos.

O processo "top-down" é possível a partir da identificação de aspectos invariantes em função do domínio da aplicação [Breuker/87]. A estrutura de tarefas prototípicas como identificadas por Hayes-Roth et al (83), é utilizada no Modelo de Interpretação da estrutura dos conhecimentos.

2.3.3.1.2 Obtenção do conhecimento

A metodologia é orientada a metódicamente obter diferentes tipos de conhecimentos necessários à construção do SBC. Considera a Aquisição de tais tipos de conhecimentos como objetivos a serem alcançados. Os tipos de conhecimento envolvidos e necessários para a construção do SBC são classificados como Procedimental, Declarativo, Tácito (já definidos em 2.2.4.2) e Conceitual. Conhecimento conceitual é o conhecimento de contexto

sobre o ambiente da aplicação, não necessariamente relacionado com a aplicação específica.

Mais explicitamente, para construir um SBC é necessário possuir os seguintes conhecimentos no domínio da aplicação:

- as coisas, elementos, entidades ou objetos do domínio da aplicação;
- suas propriedades, atributos ou parâmetros associados;
- os valores destes parâmetros, bem como as faixas de variação destes valores, e as possíveis incertezas associadas;
- as relações de dependência causal entre estas entidades, seus atributos ou valores;
- as suposições implícitas de que a existência de certas entidades dependem da existência de outras, e os procedimentos que o especialista adota automaticamente;
- os procedimentos ou ações de controle sobre como usar as relações de dependência e as suposições implícitas.

2.3.3.1.3 Estratégia

De forma resumida, a metodologia passa pelos seguintes procedimentos:

- a) conhecer os objetivos da aplicação;
- b) identificar os procedimentos gerais p/ alcançar os objetivos;
- c) identificar os elementos do problema;
- d) obter as relações a partir do elemento-objetivo, construindo para traz uma árvore de dependência entre elementos;
- e) deduzir regras da árvore de dependências;
- f) adicionar a forma na qual as regras são usadas (meta-conhecimento).

As etapas e o tipo de conhecimento que elas visam adquirir e representar são as seguintes:

Etapas	Tipos de Conhecimento
1. Orientação do Eng ^o do Conhecimento 2. Identificação do Problema	Conceitual
3. Análise das Tarefas	Procedimental
4. Identificação dos Elementos 5. Relações de Dependência	Declarativo
6. Análise dos Procedimentos	Procedimental

2.3.3.2 1ª Etapa : Orientação do Eng^o do Conhecimento

O processo de construção de um SBC se inicia com a Aquisição de Conhecimentos, normalmente através de uma Eliciação ou extração de conhecimentos de um ou mais especialistas no domínio do problema. Esta etapa é o contato inicial do EC com a área do problema, com a aplicação e com o próprio especialista, e visa à sua orientação no ambiente da aplicação [Breuker/87], isto é, à obtenção de conhecimento geral sobre o ambiente e o processo da aplicação .

2.3.3.2.1 Objetivos

Os objetivos a serem atingidos são os seguintes:

- a) boa comunicação com o especialista;
- b) aquisição do vocabulário, terminologia ou jargão técnico do domínio da aplicação;
- c) obtenção de cultura no conhecimento geral sobre o domínio;
 - c1. conhecimento de suporte, teórico;
 - c2. familiarização com os principais conceitos do domínio.

2.3.3.2.2 Atividades, exemplos e produtos

Um resumo da etapa é mostrado na Figura 2.5 a seguir:

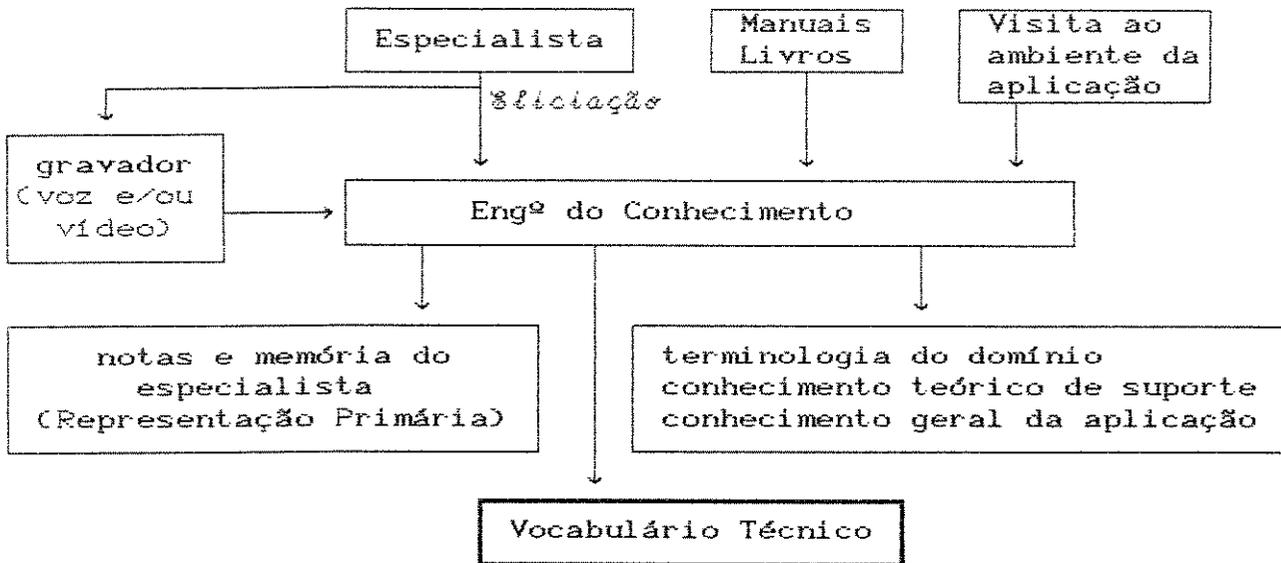


Figura 2.5 : Orientação do Engº do Conhecimento

A situação inicial do engenheiro do conhecimento é não conhecer sequer a extensão da própria ignorância sobre o domínio do problema. A primeira abordagem será sempre uma coleta de informações oportunística, um pouco "às cegas", tendo que considerar toda informação que aparece como possivelmente relevante. O que ele pode fazer é criar situações onde tais informações possam fluir.

A primeira e principal forma de interação entre o engenheiro de conhecimento e o especialista é através de palavras, e assim as entrevistas são a forma básica de aquisição de conhecimentos, permeando todo este processo.

- Recomenda-se que o engenheiro do conhecimento crie uma primeira de tais situações conduzindo uma entrevista informal com o especialista.

- O EC deve obter do especialista manuais de procedimentos de operação, ou documentação técnica que lhe possibilite um mergulho no conhecimento teórico do processo da aplicação, que ele irá estudando para obter a cultura, o conhecimento geral e a terminologia do domínio. Este conhecimento teórico será usado mais tarde como suporte às *Explicações* e *Justificativas* às inferências e resultados

alcançados pelo Sistema Especialista e às telas de ajuda ("Helps") às respostas dos usuários.

- O EC deve solicitar ao especialista uma palestra, aula ou "tutorial" sobre a aplicação e seu ambiente.

- O conhecimento do ambiente operacional da aplicação, da área, da fábrica ou do setor operacional, deve ser apreendido por mais leitura e por indispensáveis visitas ao local da aplicação. O especialista e o usuário devem ser observados executando as tarefas.

- A gravação em áudio das entrevistas iniciais é recomendada pela grande carga cognitiva que sofre a memória do EC com o acúmulo dos novos conhecimentos. Não deve ser perdida a oportunidade de memorizá-los em fita para posterior absorção, devido ao grande número de informações que o especialista normalmente se propõe a fornecer quando solicitado a falar sobre o seu trabalho e a sua especialidade. Será também constrangedor o EC voltar a perguntar sobre questões que o especialista já se esmerou em explicar.

- A cooperação do especialista deve ser conseguida e consolidada já nestas primeiras entrevistas. Os primeiros contatos são fundamentais.

- O EC deve explicar ao especialista o que ele espera obter da aquisição de conhecimentos; descrever o que é um SBC; demonstrar um SBC se possível; o que o SBC que se propõem a construir fará em benefício da aplicação e do especialista; como sistemas análogos (recolhidos na pesquisa para a análise da viabilidade do projeto) funcionaram em outras situações.

- O EC pode já iniciar um Vocabulário Técnico, a partir de suas notas pessoais e das gravações das entrevistas. O Vocabulário técnico é a descrição de conceitos particulares do ambiente da aplicação que refletem o jargão técnico dos especialistas na área, tal como o exemplo seguinte: *Aspecto das ventaneiras: observação visual qualitativa da gusa no cadinho feita pelos operadores através das ventaneiras com a ajuda de visores óticos. Deteta-se turbulências, intensidade de brilho, etc. , visando uma avaliação subjetiva do nível térmico do forno.*

Um exemplo de conhecimento geral ou cultura obtida sobre o domínio da aplicação é como descrito no capítulo 1, seção 1.3.1. A

descrição do processo siderúrgico é um exemplo de conhecimento eliciado para a orientação do EC no ambiente da aplicação a nível do contexto da Usina. Ao nível da aplicação, o EC pode se orientar com a descrição do processo de fabricação do gusa (item 1.3.1.2), das matérias primas, do Alto Forno, dos equipamentos auxiliares, do controle, da automação convencional de um forno, etc. .

Não há um produto formal desta etapa além das eventuais notas particulares do EC e talvez, o início do Vocabulário Técnico.

2.3.3.2.3 Técnicas

A técnica ou método mais apropriado para ser usado nesta etapa é a **Entrevista Informal**. A entrevista é a técnica básica de interação com o especialista, constantemente utilizada nesta e em outras etapas do processo. A **Gravação** é outra técnica. A **Observação Simples da Tarefa** é indispensável para consolidar a visão conceitual com a realidade operacional.

Entrevista Informal

A técnica de entrevista informal (conhecida também como entrevista aberta ou não estruturada) é usada como primeira abordagem ao especialista, logo ao início do processo de aquisição, nas duas ou três primeiras vezes em que se falam, com objetivos bem definidos, tais como:

- obter uma visão geral do problema,
- conhecer o jargão técnico da aplicação,
- conhecer os principais conceitos do domínio do problema,
- compreender a natureza e a complexidade do conhecimento envolvido,
- estabelecer um bom relacionamento com o especialista.

Este último objetivo é dos mais importantes nesta fase inicial e não deve ser menosprezado. É vital para o sucesso do projeto estabelecer um padrão de relacionamento ("rapport") com o especialista comunicativo e eficaz, baseado em confiança mútua, que se estenda pela duração do projeto, esclarecendo o seu papel e suas

dúvidas, obtendo condições de uma ampla e sincera cooperação e engajamento. O especialista é um recurso externo, sobre o qual o engenheiro do conhecimento não terá autoridade formal, via de regra. Um ambiente de trabalho franco e estimulante são o incentivo que deve ser dado para otimizar a qualidade do conhecimento que ele quiser fornecer, do qual dependerá a qualidade e a operacionalidade do SBC construído.

Giorno et al (88) consideram as entrevistas nem como técnicas nem como métodos, devido ao papel permanente e especial que desempenham no processo de construção de SBCs.

Hoppen e Matsura (90) estabelecem categorias de técnicas utilizadas nas entrevistas informais :

a) técnicas para estabelecer uma relação de confiança, tais como:

um "papo" introdutório como "quebra-gelo"; saber ouvir sem interromper o especialista; não impor ao especialista a sua própria compreensão do problema; considerar toda informação como possivelmente interessante; comportamento não verbal (como gestos, entonação de voz e posição do corpo) demonstrando interesse e atenção; encorajar o especialista com expressões afirmativas; exposição de sentimentos próprios (como nervosismo); não conduzir a entrevista se ela divergir, para ter oportunidade de conhecer aspectos multifacetados do problema; gastar tempo, sem se preocupar com a eficiência do processo, para fazer a relação amigável e conhecer a pessoa do especialista; ser explícito sobre o que vai ser feito com o conhecimento adquirido, colocando as "cartas na mesa"; em suma, tentar estabelecer um diálogo e uma relação franca e aberta de confiança mútua com o especialista.

b) técnicas para estabelecer o entendimento, tais como:

mostrar a expectativa clara do que se quer obter de cada entrevista, para que o especialista não fique "preso"; validar o entendimento do EC sobre as informações já obtidas; não ter receio de perguntar e parecer ignorante.

c) técnicas para expandir o raciocínio do especialista, tais como :

saber ouvir; não ficar embaraçado com o silêncio, dando

tempo para o especialista pensar; "brainstorm"; pensamento lateral; reflexão sobre palavras-chave para retomar um fluxo de informações aparentemente esgotado.

Algumas destas recomendações se aplicam também às entrevistas dirigidas.

Gravação em Áudio e Vídeo

O uso de equipamentos de áudio (gravadores) e vídeo (videocassetes) forma a memória das palavras e ações do especialista. O seu uso deve ser negociado com o especialista, esclarecendo-se a necessidade da gravação para a precisão, completeza e fixação das informações, e obter-se a sua autorização. O EC deve assegurar a confidencialidade das informações, dentro do relacionamento de confiança mútua que deve ser estabelecido. O equipamento não deve polarizar a atenção dos presentes, sendo colocado de uma forma discreta, com fita de tamanho suficiente à duração da sessão. É comum o especialista a princípio se sentir pouco confortável ou intimidado ao ver suas palavras ou ações gravadas, e é normal que ele logo se acostume e ignore o gravador.

A gravação em vídeo é normalmente utilizada como suporte a outras técnicas como a Análise de Protocolo, para obter conhecimento tácito ou implícito, ou para se observar o especialista em ação sem a polarização da presença do especialista. Em qualquer caso a câmera deve ser instalada fixa. A presença de ruídos eletromagnéticos em um ambiente industrial ou com microcomputadores pode comprometer a qualidade da fita.

2.3.3.3 2ª Etapa : Identificação do problema

Esta etapa contém mais Eliciação e alguma Análise dos conhecimentos adquiridos visando a descoberta de uma estrutura para os conceitos do domínio e a focalização dos esforços nos resultados que o sistema deve alcançar.

2.3.3.3.1 Objetivos

Os objetivos a serem atingidos são os

seguintes:

- a) identificação do(s) objetivo(s) principal(is) da aplicação;
- b) classificação dos processos usados na aplicação entre Tarefas Prototípicas tais como: Diagnóstico, Monitoração, etc.
- c) especificação de um Modelo de Interpretação.

2.3.3.3.2 Atividades, exemplos , produtos e técnicas

Um resumo das atividades da etapa é mostrado na figura a seguir :

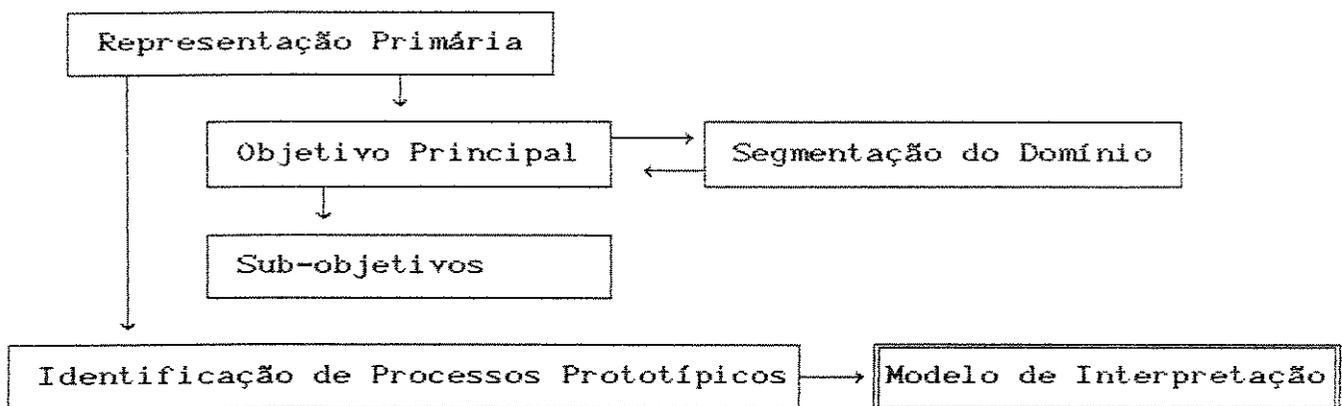


Figura 2.6 : Identificação do Problema

● **Objetivo Principal.** Produzir o objetivo principal da aplicação é a razão da construção do Sistema Especialista. Ele deve ser identificado e confirmado pelo especialista. No caso do Alto Forno, o objetivo da aplicação é: "recomendar ações corretivas para retornar o Forno à normalidade".

● **Segmentação do Domínio.** Este objetivo porém, já é um escopo reduzido dos primeiros objetivos explicitados pelo especialista. Tais objetivos incluíam: tratamento para paradas de emergência, retorno do forno a operação, procedimentos para parada programada (apagamento do forno) e acendimento do Forno ("blow-in"), manutenção de equipamentos auxiliares (como regeneradores), etc.

Esta segmentação do domínio será conveniente e necessária em muitas outras ocasiões. Ela segue a heurística básica de dividir a complexidade do problema para conquistar a solução. Deve ser feita

em absoluto acordo com o especialista.

- **Sub-Objetivos.** Uma análise do objetivo principal mostra que existe uma composição de objetivos. No caso: "identificar o problema com o forno" e depois "recomendar uma ação corretiva". O especialista mostra que esta ação corretiva, por sua vez, se subdivide em uma ação de emergência: "prescrever uma correção de emergencia", e em paralelo: "prescrever uma correção na(s) causa(s) fundamental(is)".

- **Processos Prototípicos.** Tais processos-padrão ou prototípicos são aqueles identificadas por Hayes-Roth et al (83), tais como: Diagnóstico, Monitoração, Planejamento, Projeto, Predição, Interpretação, etc. Identificamos a partir dos sub-objetivos, a quais processos-padrão eles estão associados: "identificar o problema com o forno" é um Diagnóstico, "recomendar uma ação corretiva" é uma Prescrição. Como se trata de um problema de controle de processos em tempo real e "on-line", os dados do processo para o Diagnóstico precisam ser Monitorados.

- **Modelo de Interpretação.** Um modelo de interpretação é um modelo genérico do processo de solução de um problema a partir de modelos de processos-padrão, que se compõem para formar a estrutura de conhecimento do domínio específico.

Como exemplo, no caso do Alto Forno, o modelo básico de interpretação obtido é mostrado na Figura 2.7 a seguir:

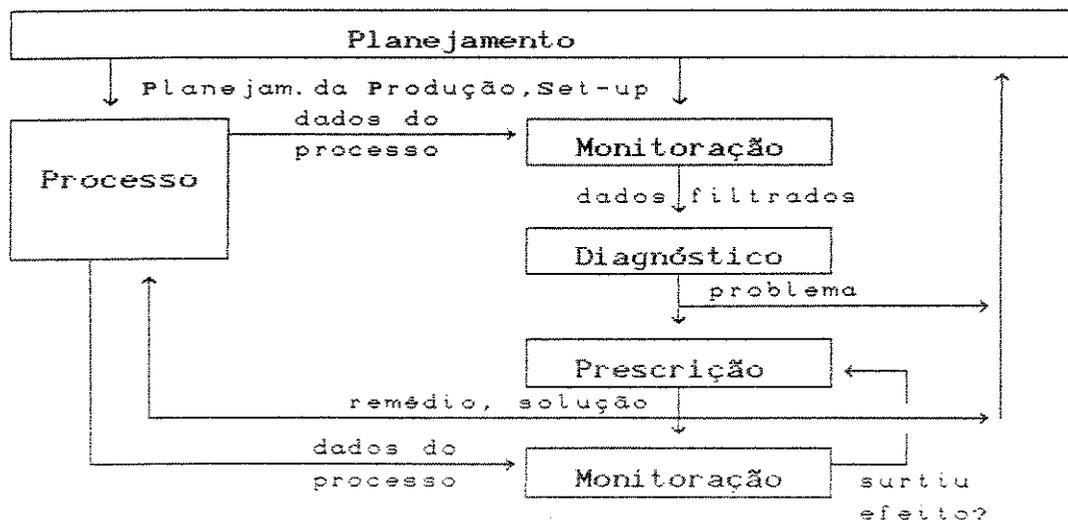


Figura 2.7 : Modelo de Interpretação Básico

O Modelo de Interpretação permite uma visão geral dos procedimentos envolvidos na aplicação, na direção de uma interpretação "top-down".

Em outras análises de Segmentação, as tarefas de Planejamento, como o cálculo do leito de fusão e a mistura de matérias primas, foram deixadas de fora da aplicação.

Os Objetivos e o Modelo de Interpretação final devem ser absolutamente validados com o especialista.

Os Sub-Objetivos, o Modelo de Interpretação e a Segmentação do domínio são processos interagentes, cada um auxiliando a compreensão e refinamento dos demais. O produto final é uma idéia conceitual dos procedimentos gerais da aplicação e da ordem ou relacionamento temporal entre eles.

Os seguintes documentos formais são gerados nesta etapa: a Lista de Objetivos e Sub-Objetivos da Aplicação e o Modelo básico de Interpretação do processo.

Algumas técnicas utilizáveis nesta etapa são as Entrevistas Dirigidas, as Perguntas Focadas, a Segmentação do domínio e a Modelagem.

2.3.3.4 3ª Etapa : Análise do processo

Esta etapa reúne elementos das fases de Eliciação, Análise e Modelagem. Ela visa obter a descrição da arquitetura básica do Sistema Especialista.

2.3.3.4.1 Objetivos

Os objetivos a serem atingidos são os seguintes:

- a) identificação dos Procedimentos;
- b) mapear Procedimentos em Tarefas.

2.3.3.4.2 Atividades, exemplos, produtos e técnicas

Um resumo das atividades da etapa é mostrado na Figura 2.8.a na página seguinte.

A partir do(s) objetivo(s) e do modelo de interpretação já

identificados, eventualmente refinados por análises de segmentação do problema, cria-se uma lista de procedimentos por refinamentos sucessivos, que vão se constituir em tarefas que o sistema deve desempenhar para processar a solução.

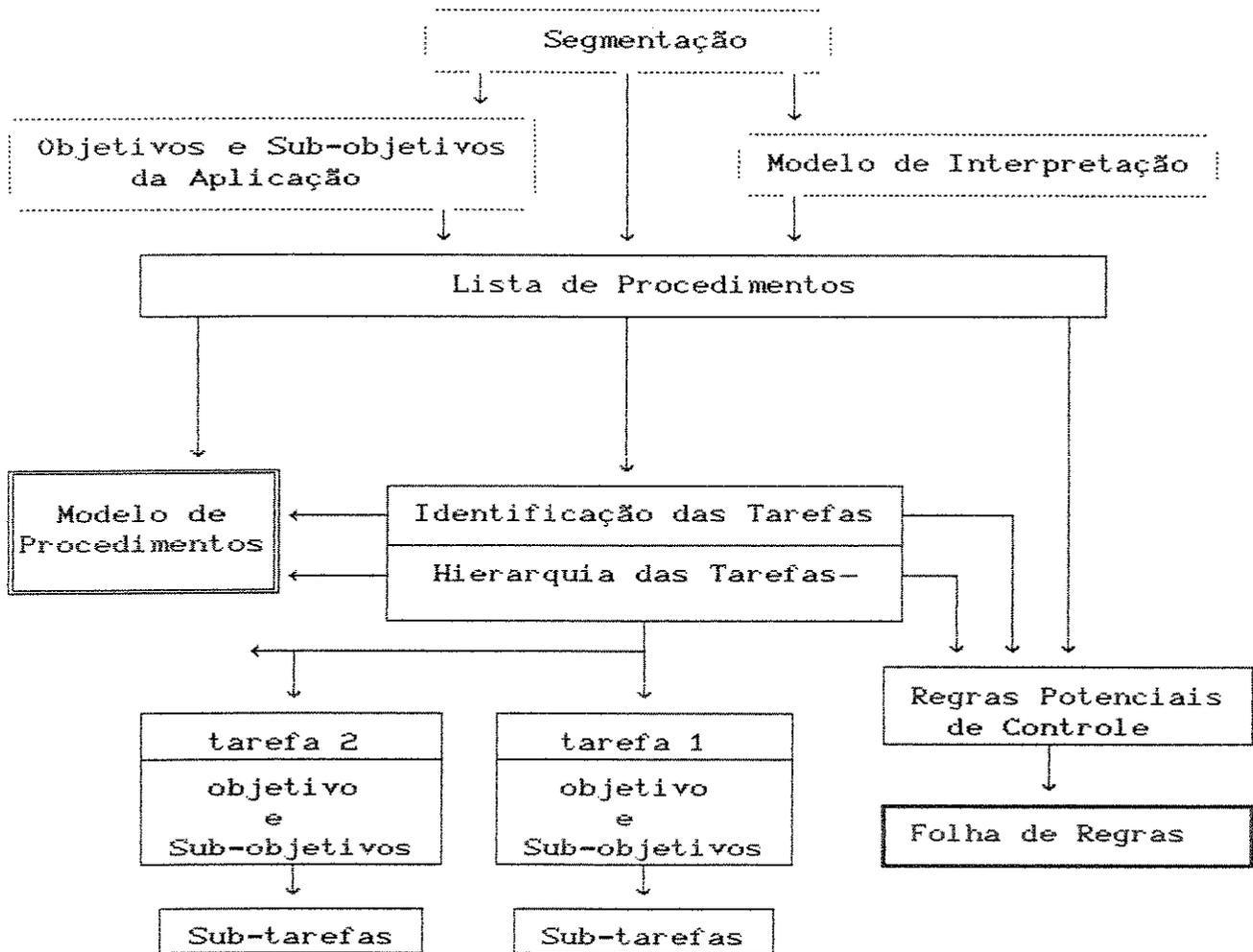


Figura 2.8.a : Análise das Tarefas.

Um exemplo retirado da nossa aplicação será esclarecedor: o sub-objetivo da Monitoração é a aquisição de fatos para alimentar as inferências. Estes fatos são oriundos de dados de sensores diretamente ligados ao processo, processados e preparados para as inferências. Uma lista de procedimentos já um pouco refinada em uma hierarquia de tarefas seria:

- obtenção dos dados brutos do processo;

- condicionamento dos dados para processamento de engenharia;
- validação dos dados;
- pré-tratamento estatístico dos dados históricos;
- fornecimento dos fatos para inferência.

A tarefa validação dos dados, por exemplo, se expandirá em sub-tarefas tais como validação algorítmica, validação heurística, redundância de dados, substituição de valores, etc. , como se verá em maiores detalhes no capítulo de implementação, na seção 3.7.3 .

O conjunto de todas as sub-tarefas hierarquizadas temporalmente, formam um modelo de procedimentos que orientará as etapas subsequentes. Fases na evolução deste modelo relacionadas aos exemplos acima, são mostradas nas figuras 2.8.b e 2.8.c a seguir:

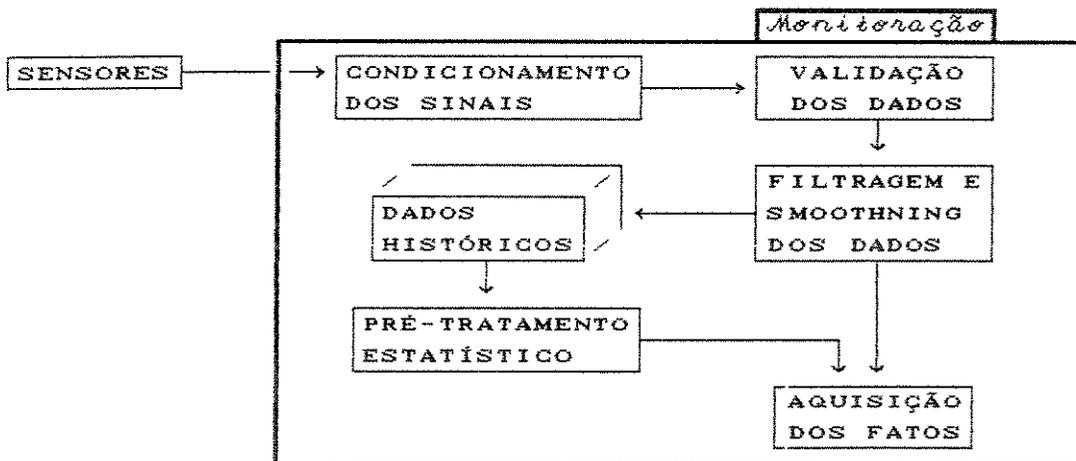
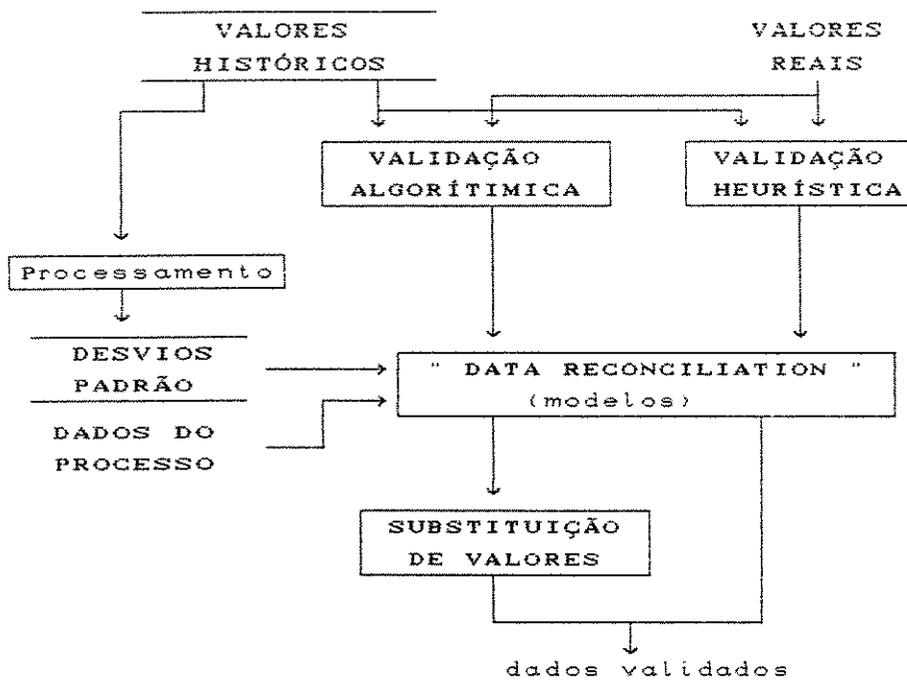


Figura 2.8.b : Tarefas no modelo de procedimentos.



Figuras 2.8.c : Tarefas no modelo de procedimentos.

Durante esta análise sobre procedimentos do processo, é provável que o especialista comente a respeito de regras sobre procedimentos, as quais devem ser armazenadas em uma folha de regras potenciais de controle para uso no lugar e momento apropriados.

Um exemplo de regra potencial de controle é : *Se for detetado um problema de forno-quente ou forno-frio e também um problema de permeabilidade , tratar primeiro o problema de nível térmico até a normalização, e só então atacar a permeabilidade. Naquela altura, é até possível que o problema de permeabilidade já tenha desaparecido por consequência do tratamento anterior.*

Os produtos obtidos nesta fase são o modelo de procedimentos detalhado em sub-tarefas e a folha de regras potenciais de controle.

Algumas técnicas utilizáveis nesta etapa são a Observação de Tarefas e a Análise da Transcrição (análise de "chunks" de conhecimento)

2.3.3.5 4ª Etapa : Identificação dos Elementos

Esta etapa visa à identificação dos construtos com os quais o conhecimento declarativo será formado.

2.3.3.5.1 Objetivos

Os objetivos a serem atingidos são os seguintes:

- a) Identificação dos elementos principais do processo;
 - a1. classificação dos elementos em Entidades (classes de Objetos), Atributos e Valores;
 - a2. identificação das faixas de valores, e incertezas associadas;
- b) Estruturação das Classes de Objetos;

2.3.3.5.2 Atividades e exemplos

Um resumo das atividades da etapa é mostrado em referência à Figura 2.9.a na página seguinte.

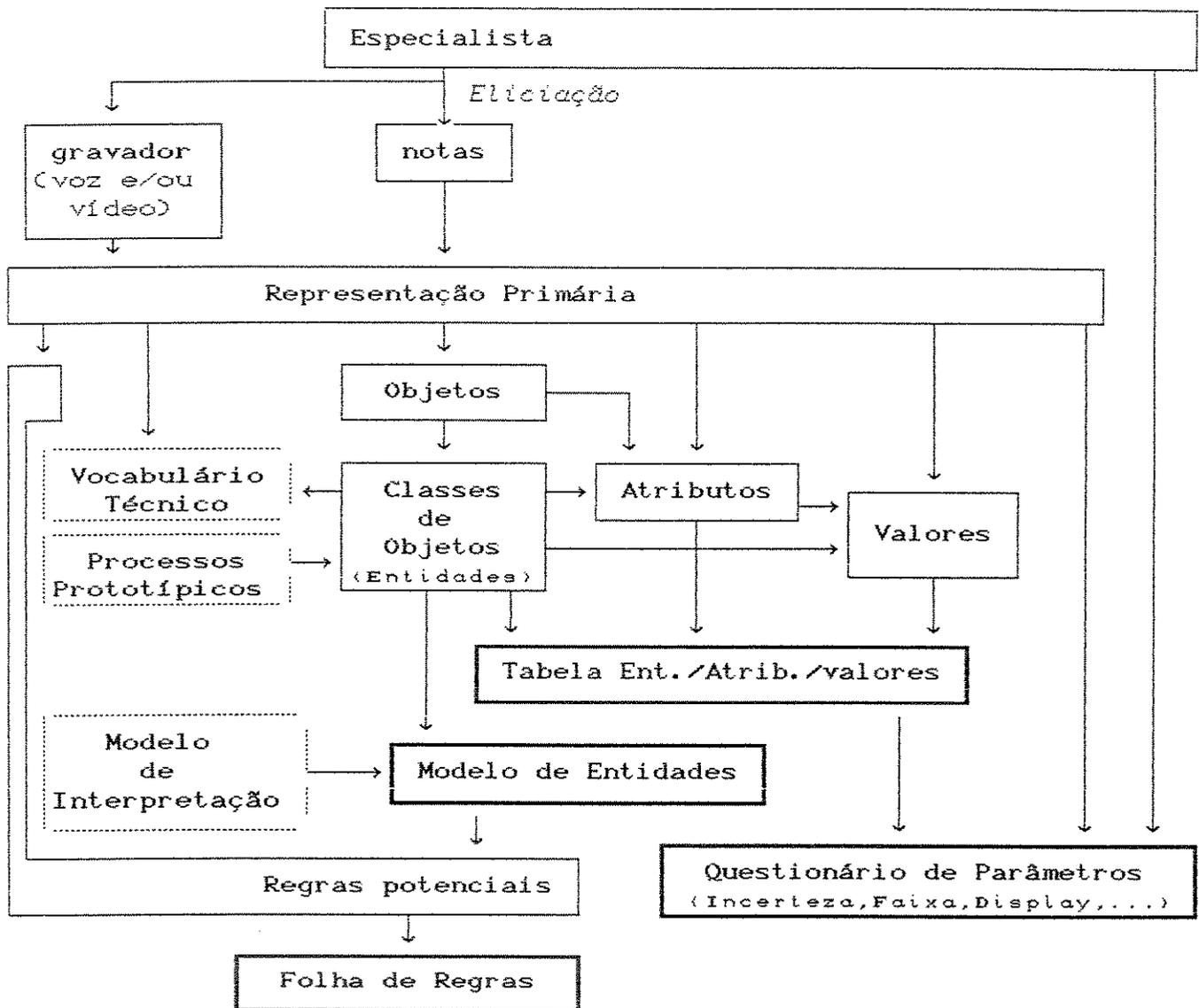


Figura 2.9.a : Identificação dos Elementos

A partir da representação primária eliciada do especialista, e através de uma análise, os conceitos relevantes para a aplicação começam a ser identificados.

Certos elementos são considerados pertencer a uma classe generalizada de conceitos ou entidades. Por exemplo, elementos tais como a temperatura do gusa, o teor de silício no gusa, o coeficiente de permeabilidade, a pressão de sopro, são agrupados sob o conceito *sintomas*. A partir destas classes, e com ajuda do modelo de

interpretação, forma-se um modelo simples de entidades tal como na figura abaixo:

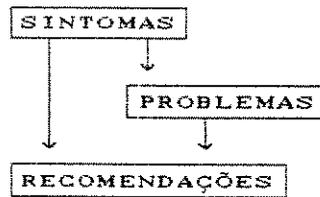


Figura 2.9.b : Exemplo de Modelo de Entidades.

O modelo de entidades irá auxiliar conceitualmente a identificação dos relacionamentos entre os atributos na etapa seguinte.

A cada elemento ou objeto, associam-se os seus atributos e os seus valores, compondo-se uma tabela de elementos/atributos/valores, expandida a seguir para um questionário de parâmetros, contendo, além destas, informações como faixas ("ranges") dos valores possíveis, incertezas associadas ao parâmetro, informações especiais, etc., tal como no exemplo da figura 2.9.c na página seguinte. Este exemplo de questionário é específico a um tipo de parâmetro e à ferramenta de implementação utilizada.

Durante esta análise, como na etapa anterior, é provável que o especialista comente a respeito de regras sobre relacionamentos entre elementos ou atributos, as quais devem ser armazenadas em uma folha de regras potenciais sobre o conhecimento declarativo, para uso no lugar e momento apropriados. Um exemplo : *Se a temperatura do gusa do último vazamento for alta e o aspecto das ventaneiras apresenta grande intensidade de brilho, posso desconfiar que o forno está quente e injetar vapor.* Naturalmente, esta regra será refinada e validada no momento e no contexto apropriado.

QUESTIONÁRIO PADRÃO PARA AQUISIÇÃO DE PARÂMETROS

preparado por: *Amado* data: 7/03/1990
 validado por: data: / /199

NOME DO PARÂMETRO: *temperatura do gusa*

DESCRIÇÃO: *avaliação qualitativa da temperatura do gusa do último vazamento da última corrida, em qualquer furo.*

NOME CURTO: *temp_do_gusa*

AQUISIÇÃO DIRETA DO PROCESSO? SIM NÃO

PROMPT (pergunta na tela): *não*

VALORES:

UNIDADE: *graus centigrados*

TIPO: SIM/NÃO VALOR ÚNICO MULTI-VALORADO ASK-ALL OUTRO

DESCRIÇÃO DO TIPO OUTRO:

FAIXA PERMISSÍVEL (range): *1450 ± C até 1550 ± C*

0 valor pode ser INCERTO? SIM NÃO

FAIXA DE VALORES

Fator de Confiança	ALTO	NORMAL	BAIXO
100 %	> 1520		< 1470
80 %	1516 ~ 1520		1470 ~ 1474
60 %	1512 ~ 1516		1474 ~ 1478
40 %	1508 ~ 1512		1478 ~ 1480
20 %			

Há procedimentos associados ao parâmetro? SIM NÃO

(use o verso da folha)

Outros comentários:

*Este valor será deduzido da temperatura real do gusa.
 Ver o questionário para o parâmetro temp_real_gusa.*

Figura 2.9.c : Exemplo de questionário de parâmetros.

Os produtos desta etapa são a tabela de objetos/atributos/valor, o questionário de parâmetros, a folha de regras declarativas, e o modelo de entidades, já exemplificados.

Algumas técnicas utilizáveis nesta etapa são a Análise de "chunks", Entrevistas Dirigidas, Questionários, Perguntas Focadas, e Criação de Grupos.

2.3.3.6 5ª Etapa : Obtenção de Relações de Dependencia

2.3.3.6.1 Objetivos

O objetivo a ser atingido é a identificação dos relacionamentos entre os atributos e os valores.

2.3.3.6.2 Atividades, exemplos, produtos e técnicas

Um resumo das atividades da etapa é mostrado na figura 2.10 a seguir :

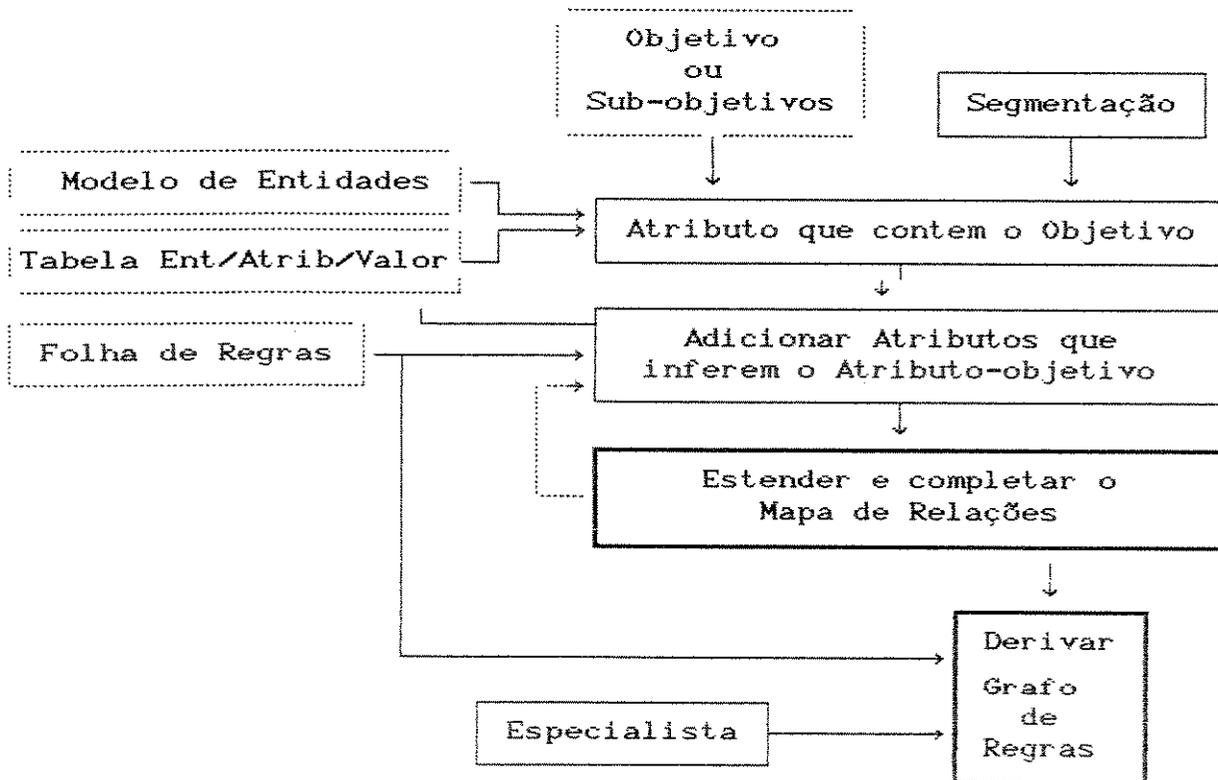


Figura 2.10 : Relações do Conhecimento Declarativo

O objetivo de obter as relações do conhecimento declarativo é alcançado, identificando-se o atributo que contem o sub-objetivo da aplicação, com a ajuda do modelo de entidades, e procurando-se relacionar este atributo com outros, com os quais o especialista identifica haver relações de dependência causal.

Este processo de escolha e relacionamento é orientado pelo modelo de entidades, aproveita as regras potenciais já comentadas pelo especialista, é expandido formando um mapa de relações, e finalmente é refinado em um grafo de regras definitivo, que incluirá as incertezas do processo de relacionamento entre os atributos. Alguns grafos de regras são exemplificados na Figura 3.10 à página 3.29 .

O produto desta fase é o grafo de regras, diretamente representável em regras de produção.

Técnicas como Hipóteses Terminais ou Codificação por Listas podem ser utilizadas, mas preferimos utilizar um método direto proposta por [Rocha et al/88], com algumas modificações adaptadas ao caso do alto-forno, resumidamente descritas a seguir.

O método se inicia orientado pelo modelo de entidades, formando-se uma lista exaustiva de todos os sintomas que os operadores investigam de modo geral para analisar as condições operacionais do forno. Estes sintomas são os dados ou sinais oriundos do processo, já processados ou não, tais como resultados de análises químicas de laboratório, indicações de instrumentos, painéis de comando, cartas de controle, telas de vídeo, alarmes, etc.

Estes sintomas são relacionados em cartões, um em cada, para permitir seu fácil manuseio.

Também uma lista de problemas potenciais é eliciada com o especialista, tais como nível térmico elevado, baixa permeabilidade, silício no gusa fora da faixa, etc.

A seguir escolhe-se cada um destes problemas e pede-se que o especialista escolha entre os cartões, aqueles sintomas que no seu entender guardam alguma relação com o problema em consideração. Os cartões com os sintomas selecionados são então relacionados por ordem de importância em relação à pertinência com o problema.

Esta relação ordenada de sintomas é lançada em um papel como os nós terminais de um grafo que será construído a partir de agrupamentos destes sintomas. As relações entre o problema e estes sintomas já ordenados são refinadas, pedindo-se que o especialista faça agrupamentos destes nós terminais em nós de mais alta ordem, da forma em que ele acha que estes sinais devem ser combinados para reforçar a evidência do diagnóstico do problema, representando os grupos ("clusters") de conhecimento declarativo de diagnóstico.

Conhecimento Procedimental pode ser obtido eliciando-se a sequência temporal em que estes nós são agregados durante o processo de tomada de decisão.

Finalmente, após a construção de tais grafos, o especialista é solicitado a associar um fator de confiança entre 0 e 100 (uma porcentagem) a cada nó de ordem superior, representando este número a confiança em que a existência combinada daqueles sintomas agrupados, implica na existência do problema.

A passagem destes grafos para regras de produção é trivial.

2.3.3.7 6ª Etapa : Análise dos Procedimentos

Esta etapa visa definir e refinar as estruturas de controle e os resultados do sistema a nível da implementação. Trabalha com o conhecimento procedimental utilizado pelo especialista e com os recursos de implementação da linguagem ou ferramenta utilizada.

2.3.3.7.1 Objetivos.

Os objetivos a serem atingidos são os seguintes:

- a) Definir o tipo de inferência mais apropriado para cada sub-tarefa ("backward, forward chaining") e a sequência temporal de execução das sub-tarefas;
- b) Definir as prioridades das ações de controle e a ordem temporal de execução das regras;
- c) Definir os resultados e as Telas ("displays") para os usuários, assim como a forma de acesso aos dados.

2.3.3.7.2 Atividades, exemplos, produtos e técnicas

Um resumo das atividades da etapa é mostrado na figura a seguir :

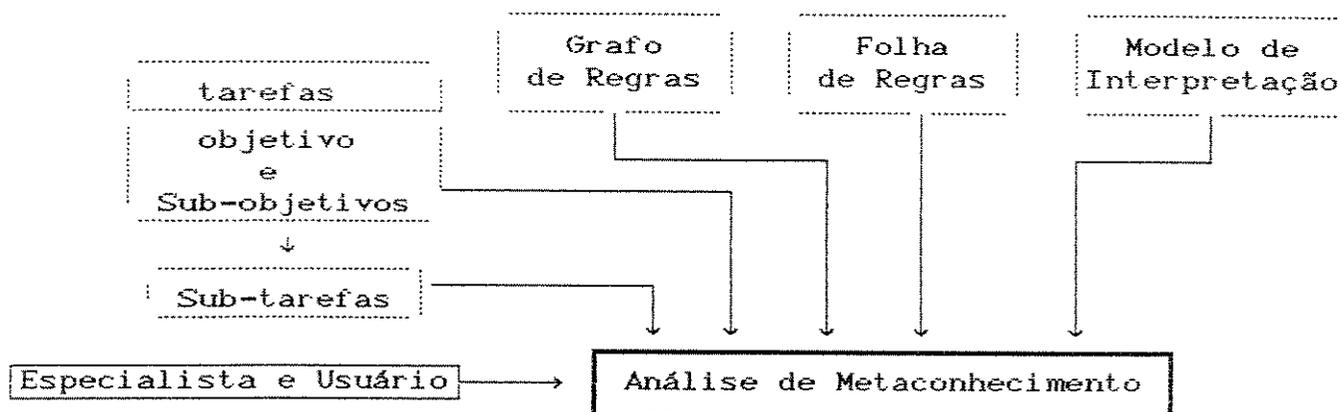


Figura 2.11 : Análise de Procedimentos

A partir principalmente do modelo de interpretação e do modelo de procedimentos, a estrutura de controle do SE é montada, utilizando-se os recursos da linguagem de implementação tais como meta-regras, agrupamento de regras em "frames", instanciações dinâmicas de "frames", características de controle como priorização de objetivos ("goals") no encadeamento de inferências para trás ("backward chaining"), priorização de regras, etc. , para montar a sequência temporal de execução do conhecimento declarativo. É decidida a distribuição destas funções dentro das possibilidades da linguagem de implementação.

Neste processo, aproveitam-se regras potenciais de controle eventualmente já eliciadas e registradas na folha de regras.

Algumas técnicas utilizáveis nesta etapa são as Entrevistas Dirigidas e a Análise de Casos.

2.3.3.8 Validação e Testes

O processo incremental de construção prototipada de um SBC evolui em ciclos. Cada ciclo passa pelas fases de Aquisição, Representação e Validação do conhecimento.

O conhecimento adquirido e implementado no protótipo vai crescendo a cada ciclo, até que, muitos ciclos mais tarde, o

protótipo é validado pelo Usuário e é considerado operacional. É normal se produzir 20 ou 50 versões do protótipo antes do SBC atingir o nível operacional [Oglethorpe et al/89]. O protótipo de viabilidade e demonstração do conceito pode ser congelado após cerca de 10 versões (20 versões, no caso desta implementação).

Na figura 2.12 na página seguinte, expande-se o ciclo operacional básico de construção de SBCs, composto das fases de Aquisição, Representação e Validação dos conhecimentos, tal como executado na experiência prática deste trabalho.

O ciclo expandido mostra as sub-fases de Eliciação, Análise, Modelagem, Codificação, os produtos de cada sub-fase e vários Momentos de Validação dos conhecimentos já obtidos. Estes Momentos de Validação são classificados como:

- *Verificação de consistência interna* feita pelo EC no sentido de comparar se o modelo construído a partir da aquisição de conhecimentos, corresponde na verdade às informações eliciadas originalmente do especialista; e depois, se o protótipo construído corresponde ao modelo.

- *Verificação de consistência* feita pelo especialista se aquele mesmo modelo compreensível preparado pelo EC corresponde às suas idéias originais.

- *Refinamento do Sistema*, onde problemas ou casos a resolver, trazidos pelo especialista, são submetidos às regras e aos procedimentos adquiridos;

- *Exame do Sistema*, onde o especialista examina e critica as regras, os procedimentos e a estrutura de controle do protótipo;

- *Validação Externa do Sistema*, onde são apresentados os casos resolvidos pelo especialista, os modelos compreensíveis e o protótipo do sistema para outros especialistas externos;

- *Validação pelo Usuário*, onde o usuário é convidado a interagir com o sistema e avaliar sua operacionalidade, seu desempenho e a amigabilidade da interface homem-máquina.

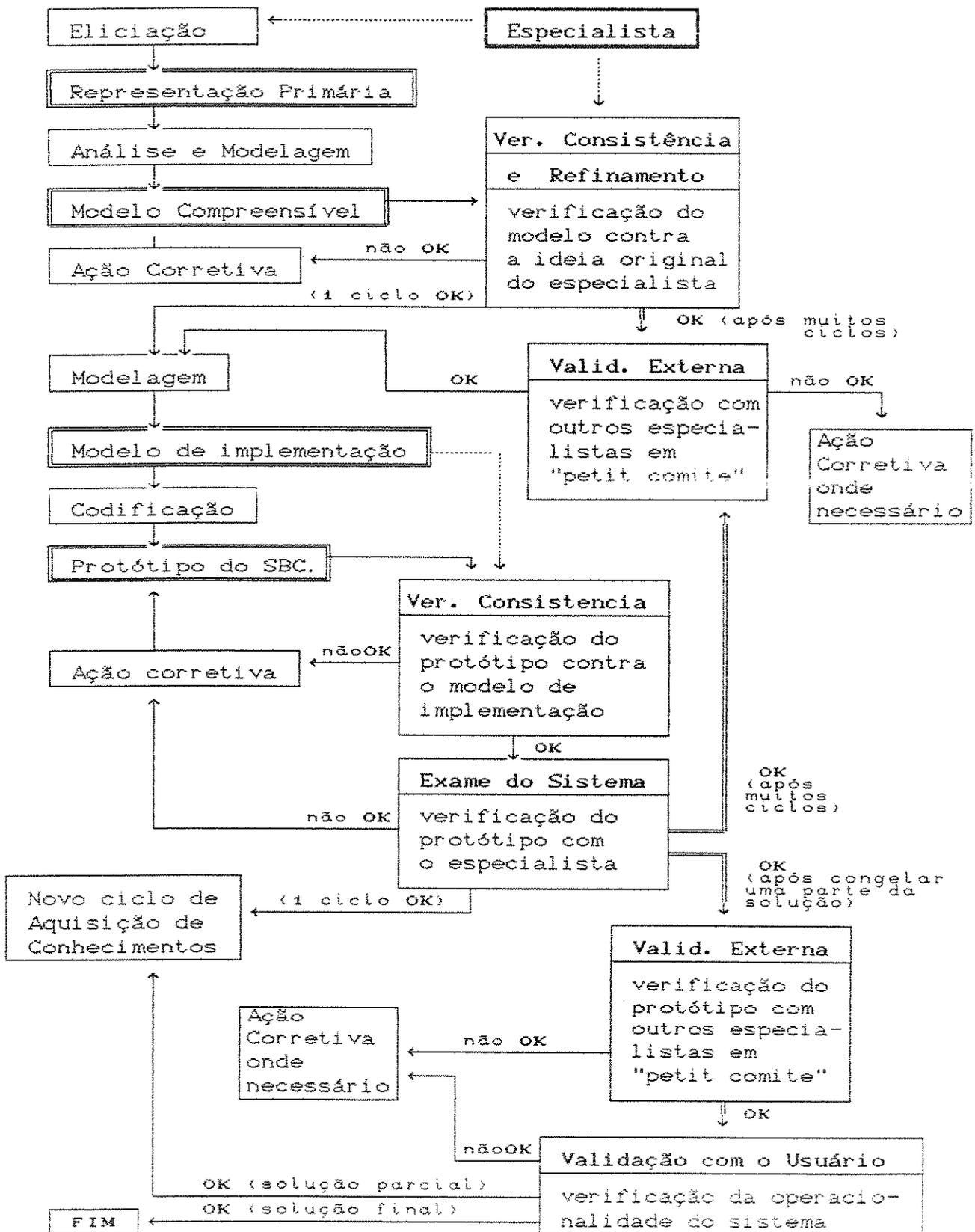


Figura 2.12 : Validação do Sistema

Em geral, este tipo de validação com o Usuário é conhecida no jargão industrial como os testes a frio no campo; depois da verificação da operacionalidade do sistema, vem os testes a quente no campo, o refino das inferências e fatores de certeza, o treinamento do usuário e do especialista-usuário, a documentação, o plano de manutenção, a preparação do projeto definitivo ou modelo de produção [Waterman/86,pg.140].

É interessante considerar que o ciclo operacional expandido é aplicável a diversas fases do sistema obtido [Hu/87]: um *protótipo de demonstração* do conceito aos usuários, contendo uma boa interface homem-máquina e um número mínimo de regras; um *protótipo interno*, com a estrutura da aplicação e uma parte substancial do conhecimento total, decidida em uma análise de segmentação do problema e com uma parte representativa das características finais da solução (cerca de 250 regras); um *protótipo de campo* contendo praticamente todos os segmentos de uma versão praticamente completa do SE mas ainda sem preocupações de interface homem-máquina amigável; e finalmente um *protótipo de produção*, que seria um SE completo e operacional.

2.3.4 COMENTÁRIOS À METODOLOGIA

Reiteramos alguns comentários feitos no item 2.3.3.1.1 a respeito da engenharia de "software". A metodologia desenvolvida, visa em um primeiro momento uma modelagem conceitual da aplicação e seu ambiente, que represente a essência do problema, favorecendo uma visão "top-down" generalizada. Orienta-se, neste momento, por modelos de representação independentes da forma de implementação, como é o caso do modelo de interpretação orientado por tarefas prototípicas, o modelo de procedimentos, que é uma extensão daquele, e o modelo de entidades.

A metodologia como um todo, porém, não é independente dos paradigmas de representação, ou por extensão, da linguagem ou ferramenta utilizada, mas ao contrário, foi desenvolvida pragmaticamente visando uma aplicação específica. O conhecimento declarativo, por exemplo, tem uma representação no grafo de regras que é naturalmente orientada a regras de produção.

Um modelo cognitivo do processo de aquisição, representação e validação dos conhecimentos, foi apresentado como um processo de representações sucessivas. A abordagem operacional por prototipagem rápida foi especialmente colocada, assim como a conveniência de um modelo intermediário de comunicação entre o especialista e o engenheiro de conhecimento. Tipos e características do conhecimento inerentes à vida real foram apresentadas.

No aspecto de aquisição do conhecimento, várias técnicas foram classificadas quanto à propriedade de uso na eliciação de certos tipos de conhecimento.

Finalmente, uma metodologia de desenvolvimento de SBCs foi proposta, cobrindo todo o ciclo do projeto e implementação, utilizando algumas técnicas diretas e modelos conceituais, testada e exemplificada com ajuda do projeto do alto-forno.

O capítulo seguinte é dedicado à implementação do sistema especialista para controle supervisorio de um alto-forno, desenvolvido de acordo com a metodologia proposta.

CAPÍTULO III

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

CONTEÚDO

<i>Seção</i>	<i>Página</i>
3.1. INTRODUÇÃO.....	3.1
3.2. OBJETIVOS E SEGMENTAÇÃO.....	3.4
3.3. CARACTERÍSTICAS PARA TEMPO REAL.....	3.5
3.2.1 Tempo real.....	3.5
3.2.2 Sistemas Baseados em Conhec. "off-line" X "on-line"...	3.7
3.4. ARQUITETURA DE IMPLEMENTAÇÃO : HARDWARE.....	3.9
3.5. ESTRUTURA DO SOFTWARE DE APOIO AO SE	3.11
3.6. REPRESENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS.....	3.13
3.6.1 Representação de conhecimentos.....	3.13
3.6.2 Etapas dos procedimentos.....	3.14
3.7. AQUISIÇÃO DOS FATOS PARA INFERÊNCIA.....	3.17
3.7.1 Obtenção dos dados brutos do processo.....	3.17
3.7.2 Condicionamento dos dados.....	3.17
3.7.3 Validação dos dados.....	3.17
3.7.4 Pré-tratamento estatístico dos dados históricos.....	3.20
3.7.5 Aquisição dos fatos.....	3.23
3.8. ESTRUTURA DA BASE DE CONHECIMENTOS.....	3.24
3.8.1 Estrutura geral.....	3.24
3.8.2 Diagnóstico.....	3.25
3.8.3 Recomendações.....	3.32
3.8.4 Telas de resultados.....	3.34
3.8.5 Acompanhamento.....	3.35
3.8.6 Comentários gerais.....	3.37
3.8.6.1 Eficiência das inferências.....	3.37
3.8.6.2 Funções semânticas e incertezas.....	3.37
3.8.6.3 Manutenção e Documentação.....	3.38
3.9. DESEMPENHO DO SISTEMA.....	3.40
3.10. RESUMO.....	3.43

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o resultado do projeto e implementação do protótipo de um Sistema Baseado em Conhecimento para controle supervisorio do processo de um Alto Forno em tempo real.

São explicitadas as características concebidas para o projeto e, dentre estas, aquelas adotadas na implementação do protótipo de validação com destaque para aspectos de tempo real. São também detalhadas a arquitetura de implementação de hardware, a estrutura de software dos sistemas de apoio externos ao SBC, e a estrutura interna da Base de Conhecimentos, entre outros itens.

Como já colocado, o objetivo é tanto realizar o projeto de um Sistema Baseado em Conhecimento para Controle e Guia Operacional em Tempo Real, "on-line" com o processo de fabricação de ferro-gusa em um Alto Forno, como construir um protótipo de validação que inclua partes representativas das características previstas no projeto.

O protótipo de validação será testado no campo, após a reforma e entrada em operação do Alto Forno nº 2 da CSN, e sofrerá avaliação por parte dos usuários finais, engenheiros especialistas e técnicos operadores da sala de controle, permitindo assim estabelecer a prova final do conceito e a viabilidade do emprego da tecnologia de I.A. no setor. A oportunidade da reforma do Alto Forno nº 2, e a utilização de um novo computador supervisorio, facilitou o trabalho de integração do SE com o sistema de automação existente.

A característica mais importante da solução é que o SE interage com o processo de forma "on-line", recebendo os dados (fatos para inferência) de sensores diretamente ligados ao Forno, e gerando recomendações aos operadores de forma contínua e no tempo real exigido pelo processo.

Outras características contidas no projeto são, em síntese, assinaladas a seguir :

- Monitoração do "status" do processo, pelo recebimento de dados de sensores diretamente ligados ao Forno e a equipamentos auxiliares, através de outros computadores e equipamentos de aquisição de dados;
- geração de Recomendações conselhos ou prescrições aos operadores para ações de emergência e ações nas causas prováveis de origem dos problemas;
- Acompanhamento dos efeitos das ações tomadas pelos operadores de acordo com as recomendações do sistema, prescrevendo novas ações de acordo com a evolução do problema;
- validação dos dados dos sensores ("data reconciliation") ;
- tratamento dos dados, normalização e eliminação de ruídos e oscilações nos dados de certos sensores ("smoothness") ;
- análise estatística de tendências e médias de certos parâmetros do Forno ;
- integração com os modelos teóricos existentes;
- cuidados de projeto quanto a manutenção futura do sistema;
- tratamento da estrutura do conhecimento ao nível semântico dos especialistas;
- consideração dos seguintes fatores na arquitetura da Base de Conhecimentos :
 - organização de acordo com as hierarquias naturais do conhecimento;
 - organização modular ("clusters") do conhecimento;
 - facilidades de manutenção tais como: agrupamento de regras em grupos, documentação descritiva do significado de regras e parâmetros ao nível semântico apropriado, "set-up" de parâmetros variáveis em um único local, etc.;
 - consideração do grau de incerteza no conhecimento, propagação da incerteza nas relações e combinação de evidências;
 - preocupação com requisitos de desempenho na execução do programa, como a eficiência das inferências e a liberação de ocupação de memória por "clusters" fora da

- cadeia de inferência do problema diagnosticado;
- facilidades de ajuda ao usuário (telas de "Help") sensíveis ao contexto, além dos tradicionais mecanismos de explicação e justificativa ("How" e "Why").

O projeto foi desenvolvido de acordo com a metodologia proposta no capítulo 2.

Em anexo, encontram-se exemplos de implementação em LISP de algumas regras e procedimentos adotados na codificação do sistema. Estes exemplos são comentados neste capítulo.

3.2. OBJETIVOS E SEGMENTAÇÃO

Dentro da metodologia proposta para o desenvolvimento do projeto, uma das primeiras etapas é a definição dos objetivos do sistema como um sub-conjunto dos objetivos primários, reduzidos através de uma análise de segmentação, trazendo o problema para um domínio específico, restrito o suficiente para que possa ser tratado por um SBC com sucesso.

Os primeiros objetivos incluíram, além dos objetivos finais : a sistematização do conhecimento sobre operações diárias, sobre situações instáveis (enguiçamentos, arriamentos, chaminés, etc.), sobre operações de parada programada, sobre medidas a serem tomadas no caso de defeitos em equipamentos auxiliares (regeneradores, sistemas de refrigeração, injeção de oxigênio, gás natural, estocagem e carregamento).

Tais objetivos foram segmentados e reduzidos aos seguintes objetivos operacionais: sistematizar o conhecimento operacional mais significativo sobre a análise do nível térmico do forno, considerando a permeabilidade à passagem dos gases redutores pelo interior do forno, e a qualidade do produto no aspecto de análise química do ferro-gusa.

3.3. CARACTERÍSTICAS PARA TEMPO REAL

O Sistema Baseado em Conhecimento projetado, deve operar em um ambiente dinâmico, o que demanda características especiais como as comentadas a seguir.

3.3.1 TEMPO REAL

O projeto de SBC idealizado apresenta a característica dominante de estar em constante operação, em oposição a ser usado em consultas esporádicas quando e se necessário. É projetado para fornecer aconselhamento contínuo e portanto requer capacidades dinâmicas de inferência. Deve operar em um ambiente de tempo-crítico, fornecendo seus resultados em um tempo compatível com as constantes de tempo do processo sob controle, ou seja, no tempo real do processo.

Um SBC para controle de processo em tempo real deve possuir um número de características tais como [Quinn/90] :

- A habilidade de interfacear com o processo sem comprometer o desempenho do sistema;
- A capacidade de obter os fatos para alimentar as inferências de forma automática;
- A capacidade de tomar decisões em um tempo crítico (tempo real);
- A necessidade de estar em constante operação.

Do ponto de vista operacional, o SBC deveria possuir, à semelhança de sistemas convencionais para controle de processos em tempo real, características tais como:

- ter seu fluxo de controle orientado por eventos externos ao sistema, oriundos do processo sob controle;
- estar integrado com um mecanismo de controle de interrupções.

- a nível de hardware se possível;
- dar tratamento temporal aos eventos, associando o instante de acontecimento ("time-tags") aos eventos;
- dar tratamento temporal às ações de controle disparadas pelo acontecimento de eventos, escalonando-as como apropriado ("scheduling"), e priorizando-as se necessário;

Tais características não são previstas nas linguagens, "shells" ou ferramentas normalmente disponíveis para a implementação de SBCs, mas recebem tratamento e solução adequados para o caso deste trabalho.

3.3.2 SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO : "OFF-LINE" x "ON-LINE"

Um SE convencional é uma ferramenta de consulta que pode interagir com os usuários, e derivar conclusões baseadas em informações específicas de entrada (fatos para inferência), fornecidas apenas pelos usuários.

Do ponto de vista de controle de processos, a aquisição de dados pode tomar uma de duas formas: dados alimentados manualmente, caso em que o sistema seria dito estar "off-line" com o processo, ou dados automaticamente adquiridos pelo sistema diretamente do processo sob controle, sem a interferência dos usuários, caso em que o sistema é dito estar "on-line" com o processo sob controle.

3.3.2.1 SBC "off-line" com o processo

Um SBC "off-line" pode ser aplicado a interações com o processo mas apenas através das ações do operador, que fecharia a malha de controle. Como na Figura 3.1, o operador alimentaria o SBC com os dados requisitados pela consulta, buscando-os em instrumentos, painéis e outros indicadores do "status" do processo, receberia do SBC as recomendações finais e executaria as ações de controle recomendadas agindo em manetes, botoeiras e outros atuadores no processo.

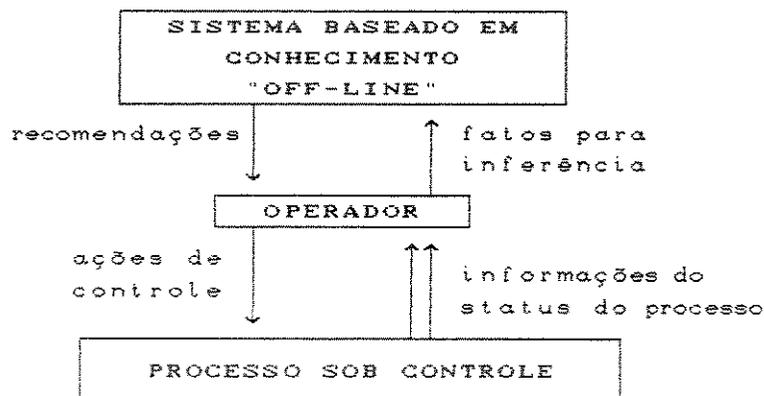


Figura 3.1 : SBC "off-line"

3.3.2.2 SBC "on-line" com o processo

A aplicação de um SBC para controlar um processo requer que o SBC automaticamente adquira os dados de que necessita, produza as suas conclusões e as aplique no controle do processo. Este sistema integra o processo com o SBC, fechando a malha de controle sem a intervenção do operador.

Na prática operacional do mundo real, o operador deve intervir no sistema, para monitorar o desempenho do SBC, eventualmente tomar uma ação de controle mesmo que não recomendada pelo SBC, ou fornecer informações que não estão disponíveis para amostragem automática pelo SBC. Em casos reais, eventualmente não existirão sensores disponíveis para todas as informações requeridas pelo SBC, ou porque não existe a tecnologia ou porque sua instalação é muito cara; o mesmo podendo acontecer em relação a certos atuadores.

O modelo real evolui para um ambiente de controle assistido pelo operador, como na Figura 3.2 a seguir.

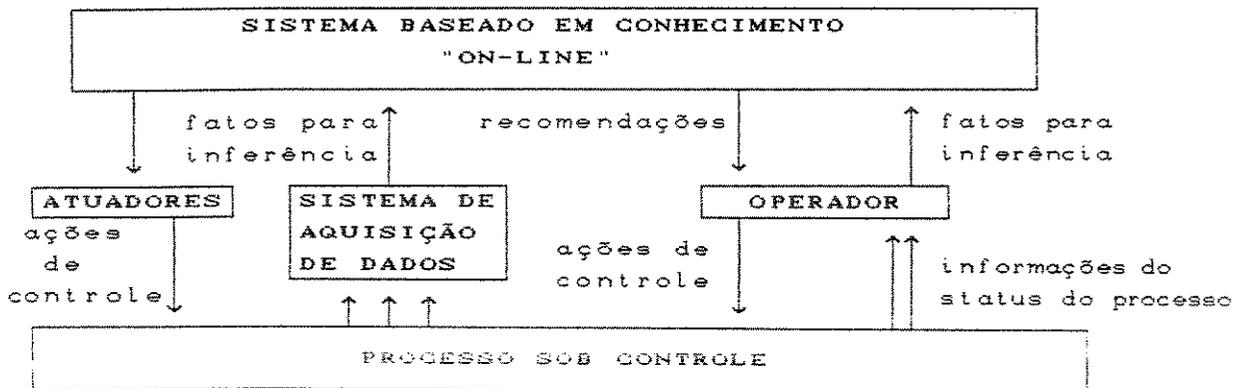


Figura 3.2 : SBC "on-line" com o processo

3.4. ARQUITETURA DE IMPLEMENTAÇÃO : HARDWARE

A filosofia de implementação de hardware adotada é a de preservar um processador exclusivamente para o processamento das inferências, hospedando apenas o SE. Outro computador será usado para a aquisição de dados "on-line" com o processo, e para o tratamento destes dados preparando-os para a inferência, no tempo real exigido pelo processo. Este computador, no caso concreto de nossa implementação, é um computador VAX 750 utilizado a nível supervisorio no sistema de controle dos Altos Fornos da CSN.

Por facilidades operacionais, o computador utilizado como estação de trabalho ("work-station") para o SE é um microcomputador da classe IBM PC-AT, e a configuração geral é a seguinte:

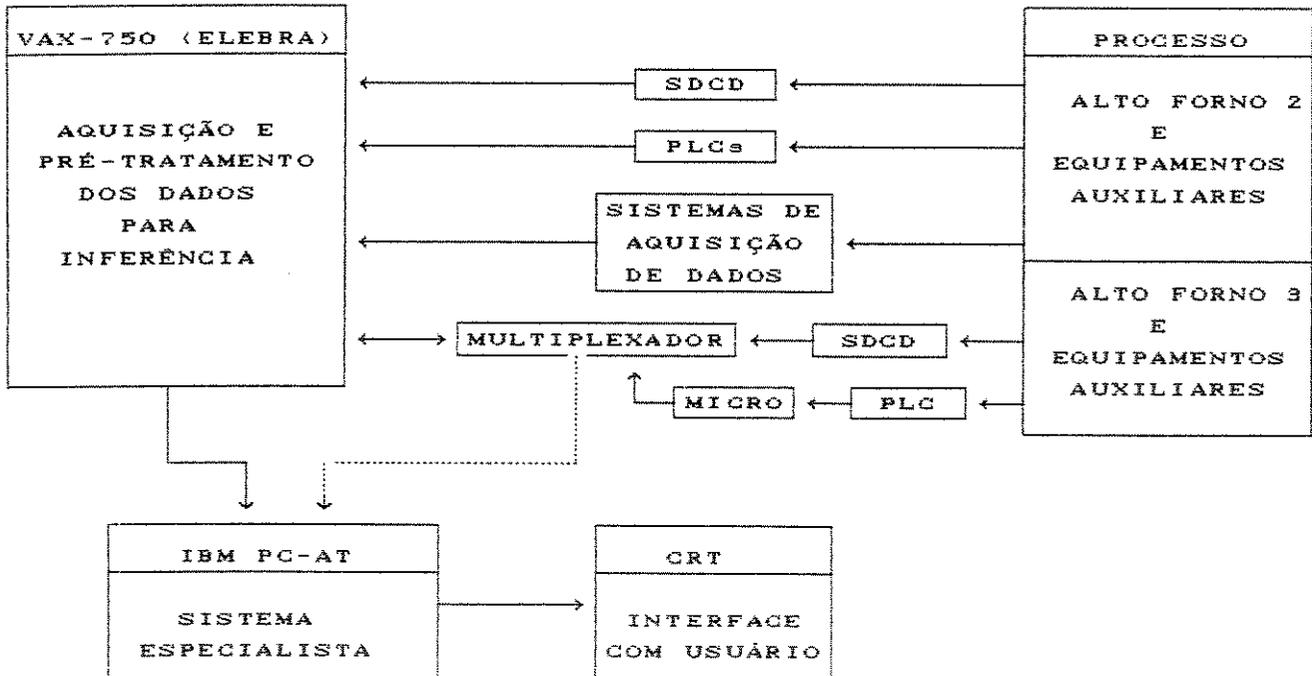


Figura 3.3 : Arquitetura básica de hardware.

O fluxo de dados no sistema aproveita as facilidades já instaladas no sistema atual de controle dos Fornos. Dados são recolhidos no computador supervisorio (VAX 750), diretamente de sensores instalados no campo, ou através de Controladores Lógico Programáveis (CLPs), ou através do Sistema Digital de Controle Distribuido (CECIL-YOKOGAWA), ou ainda através de outros sistemas de aquisição de dados.

Dentro do computador supervisorio foi criado um programa e modificados outros já existentes para adquirir e tratar os dados relevantes ao conhecimento e transmiti-los ao microcomputador dedicado ao SE.

A transmissão dos dados é feita via interface RS-232 e no caso do Alto forno nº 3, através de um "modem" e multiplexador, que concentra os dados do SDCD e de outros equipamentos dedicados ao Forno. Foi preparada a ligação opcional do SE com o multiplexador, para o recebimento de dados operacionais do Forno nº 3. O SE pode portanto trabalhar em ambos os Fornos, com pequenas modificações em faixas e valores, mas aproveitando quase toda a estrutura de controle e do conhecimento declarativo.

3.5. ESTRUTURA DO SOFTWARE DE APOIO AO S.E.

Chamamos de estrutura de software externa ao Sistema Especialista, aos programas de apoio ao SE propriamente dito. Este software de apoio é descrito com referência à Figura 3.4 a seguir:

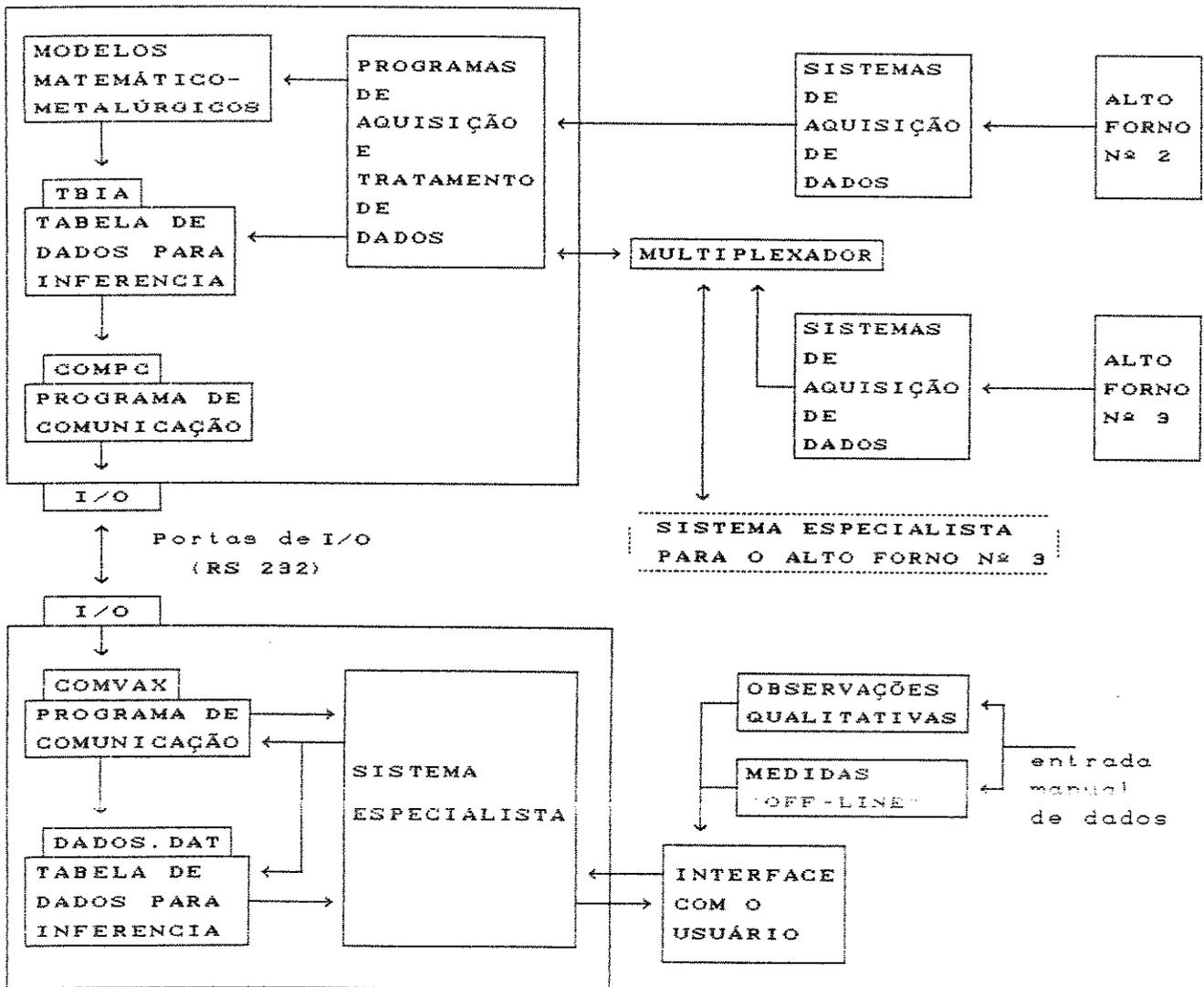


Figura 3.4 : Estrutura de "software" de apoio

As funções de tratamento e aquisição "on-line" dos dados oriundos de sensores do processo, os quais virão a se transformar nos fatos para alimentar as inferências do SE propriamente dito, são realizadas com ajuda de programas desenvolvidos especialmente para este fim e residentes no computador supervisorio VAX 750 e na própria estação de trabalho onde o SE reside.

Diversos programas já existentes no sistema de supervisão foram adaptados para coletar os dados relevantes ao procedimento de inferência do SE . Alguns destes dados já seriam utilizados no Sistema de Supervisão do projeto do Alto Forno nº 2 e outros foram recolhidos e tratados especialmente para servir ao SE . Os dados relevantes foram tratados por normalizações ou adaptação a faixas de valores apropriadas, lidos a intervalos temporais adequados, e reunidos em um arquivo de dados (tabela TBIA), onde podem ser acessados pelo programa de comunicação do VAX com o PC.

O programa de comunicação (COMPC), é executado sob solicitação do outro programa de comunicação residente no PC (COMVAX.COM), e tem a função de coletar os dados já preparados na tabela TBIA e transmiti-los ao PC. O programa COMVAX.COM recolhe estes dados e os deposita em um arquivo (DADOS.DAT) para a leitura pelo SE . O controle para o início do processo de comunicação é todo exercido pelo proprio SE, que aciona o programa COMVAX a intervalos apropriados à necessidade de aquisição de fatos novos ao processo de inferência em função do "status" do diagnóstico. Os programas de comunicação incluem mensagens de erro e críticas ao processo de transmissão para segurança do processo de inferência. O programa COMPC foi desenvolvido em FORTRAN, por ser a linguagem adotada para todo o desenvolvimento do VAX, e o programa COMVAX em PASCAL.

3.6. REPRESENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS

Apresenta-se nesta seção o estilo da representação dos conhecimentos, e as etapas de Identificação do Problema e Análise do Processo segundo a metodologia de projeto adotada.

3.6.1 REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO

Paradigmas de representação: o Sistema utiliza diversos paradigmas para representar o conhecimento. O conhecimento declarativo sobre os elementos do problema é organizado em triplas objeto-atributo-valor; o conhecimento declarativo sobre as relações entre os elementos é organizado em regras de produção, assim como o conhecimento procedimental. "Clusters" de conhecimentos pertinentes são agrupados hierárquicamente em uma estrutura de "frames". Além disso, a incerteza que acompanha certos valores são tratadas por fatores de confiança e combinação de evidências ao estilo do EMYCIN [Harmon/88].

Linguagem de implementação: como se trata de um protótipo, pode-se privilegiar a fase de desenvolvimento em favor da eficiência das inferências e portanto escolhemos um ambiente de programação com algumas facilidades de edição e crítica. A linguagem utilizada para a implementação é o LISP, embutido em um "shell" que apresenta algumas características em relação à parte gráfica e ao tratamento de problemas associados ao aspecto de tempo real.

Restrições ao projeto: a efetiva implementação integral de todos os requisitos previstos no projeto, demandaria um esforço consideravelmente grande. Algumas funções que deveriam naturalmente ser processadas no computador supervisor, foram transferidas para o microcomputador IBM PC-AT pela sua maior disponibilidade. Estas funções foram também reduzidas em extensão, para se fazer prova do conceito e de operacionalidade, visto se tratar de um protótipo, ainda que com características de campo. Devido também ao volume de conhecimento, fatos e regras de produção ser muito menor (250) que em um sistema definitivo (estimamos cerca de 2000 regras), o impacto

na eficiência e rapidez das inferências não é tão grave. Parte do processamento do computador de apoio pode ser transferido para o microcomputador dedicado às inferências. Também a constante de tempo dos segmentos do problema tratado pelo SE (nível térmico, permeabilidade, avaria química no gusa), é de ordem superior (minutos) ao tempo gasto por um ciclo típico de consulta do SE (segundos).

3.6.2 ETAPAS DOS PROCEDIMENTOS

De acordo com a metodologia proposta, na Etapa nº 2 de Identificação do Problema, o primeiro modelo de interpretação obtido foi segmentado e refinado no modelo de interpretação mostrado na Figura 3.5.a a seguir, o qual dá uma visão "top-down" da macro-estrutura dos procedimentos envolvidos na solução do problema.

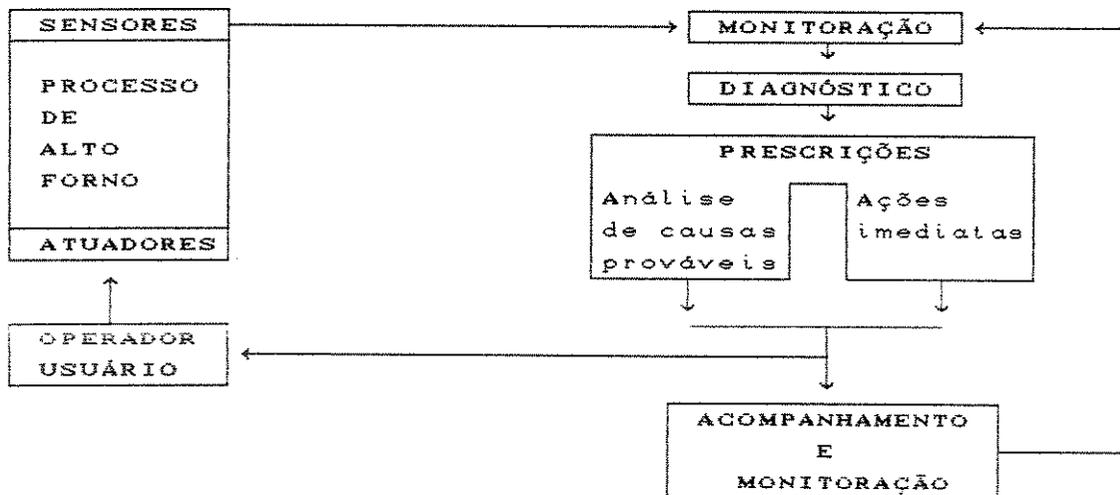


Figura 3.5.a : Estrutura dos Procedimentos (Modelo de Interpretação)

Na Etapa nº 3 de Análise do Processo tais procedimentos são mapeados em Tarefas ou etapas que devem ser cumpridas pelo SE como a seguir:

1. Obtenção dos dados brutos do processo;
2. Condicionamento dos dados para inferência;
3. Validação dos dados;
4. Pré-tratamento estatístico dos dados históricos;
5. Aquisição dos fatos;
6. Geração de hipótese inicial de problema;
7. Formação de diagnóstico;
8. Definição do problema prioritário;
9. Formação da recomendação apropriada;
10. "display" das recomendações;
11. Monitoração dos resultados;
12. Recomendação de novas ações de acompanhamento;

Estas tarefas são hierarquisadas e decompostas em sub-tarefas para atingir os sub-objetivos.

As tarefas de 1 a 4 são projetadas para serem executadas fora do micro dedicado às inferências, exatamente para não comprometer a eficiência (rapidez do processamento). As tarefas de 6 a 12 compreendem o conhecimento estruturado e executado dentro do próprio SE. A tarefa nº 5 utiliza ambos, o SE e o sistema de apoio.

As tarefas previstas no projeto são comentadas nas próximas seções, bem como as suas características de implementação.

A Figura 3.5.b na página seguinte clarifica o relacionamento das Tarefas com o Modelo de Interpretação.

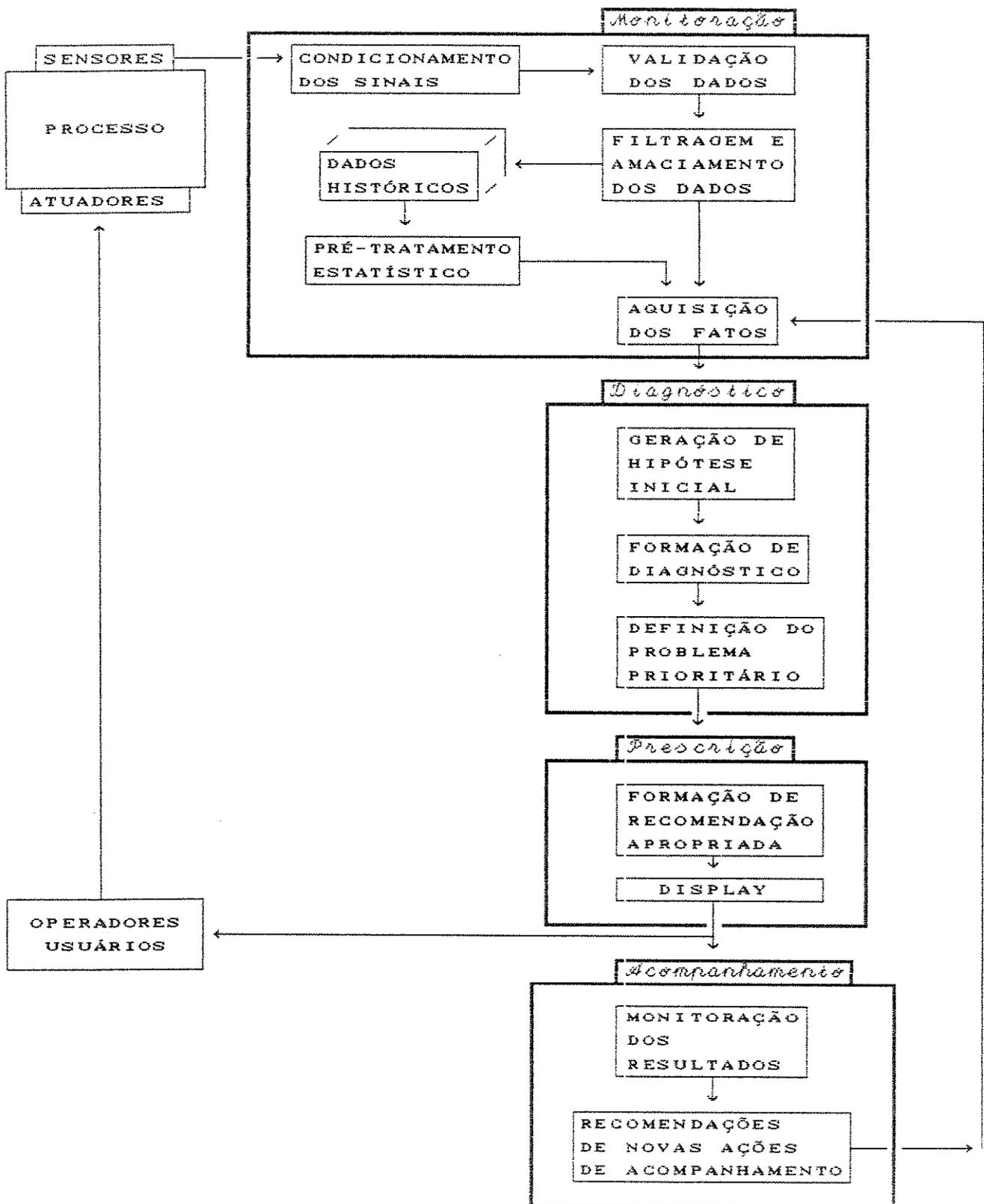


Figura 3.5.b : Tarefas ou etapas dos procedimentos.

3.7. AQUISIÇÃO DOS FATOS PARA INFERÊNCIA

Esta seção discorre sobre o projeto e as implementações contidas nas 5 primeiras Tarefas, as quais são procedimentos para a aquisição de dados diretamente do processo com o objetivo final de fornecer os fatos ou sintomas preparados para a inferência ao SE

3.7.1 OBTENÇÃO DOS DADOS BRUTOS DO PROCESSO

A partir de sensores ligados diretamente ao Alto Forno e equipamentos auxiliares, os dados relevantes são obtidos através de equipamentos de aquisição de dados já existentes ou instalados na oportunidade da reforma do Alto Forno. Não foram instalados novos sensores especialmente para uso do SE, mas aproveitadas as informações previstas no projeto de reforma do Forno.

3.7.2 CONDICIONAMENTO DOS DADOS

Esta tarefa também é executada no computador supervisor, e consiste na normalização dos dados brutos, trazendo-os para as faixas e unidades de Engenharia apropriadas.

3.7.3 VALIDAÇÃO DOS DADOS

3.7.3.1 Projeto

Um SE para controle de processos que usa dados medidos por sensores como fonte de informação, deve considerar a incerteza na correspondência destes valores medidos pelo instrumento e a realidade do processo. Como fontes de incertezas, há a possibilidade óbvia de malfuncionamento do instrumento, bem como a existência de ruído eletrônico, "drifts" no instrumento por temperatura, erros de calibração, imprecisões inerentes à qualidade do instrumento ou mesmo um valor perdido pelo sistema de aquisição dos dados. Um dos objetivos da validação dos dados é separar falhas nos sensores e

instrumentos, de significativos e reais desvios do processo.

As validações podem ser executadas por técnicas ou métodos como os descritos a seguir, segundo [Kim/90] e [Borsje/90] :

3.7.3.1.1 Validação Algorítmica

Consiste em submeter os dados à certas verificações tais como:

- verificação de faixas;
- análises de consistência de tendências;
- comparação com valores esperados por cálculo e coeficientes de regressão;
- cálculo da incerteza associada;
- cálculo da propagação da incerteza.

3.7.3.1.2 Reconciliação de dados ("Data Reconciliation")

A reconciliação de dados é feita por redundância de dados. Um dado medido pode ser considerado redundante se houver mais de uma forma de obter o seu valor. A redundância pode surgir de instrumentação adicional de reserva ("back-up") e balanços no processo, como balanços termodinâmicos, de energia, de massa, de calor, de fluxo, etc. Os modelos matemático-metalúrgicos existentes, que modelam parcialmente o funcionamento do forno, podem fornecer vários destes balanços.

3.7.3.1.3 Validação Heurística

A validação heurística é mais um método de verificação de dados através da associação de leituras de sensores em relações de dependência, em formas que não podem ser feitas pela validação algorítmica. Normalmente utilizam-se modelos do fluxo do processo com baixo nível de sofisticação, como simples relações de entrada e saída, ou relações de causa e efeito bem conhecidas e utilizadas heurísticamente pelos operadores.

Por exemplo, a prática operacional de um Alto Forno mostra aos especialistas que há uma relação entre a temperatura do gusa e o nível de silício na análise química do gusa: é altamente improvável que a temperatura esteja alta e o silício com baixo teor.

Um exemplo de validação Algorítmica é que, devido à inércia

térmica do Forno, não pode haver uma mudança brusca na derivada ou taxa de variação da curva formada pelos valores históricos da temperatura real do gusa. Este conhecimento geraria um modelo ou regra do tipo: *Se a diferença entre o último valor medido e o valor projetado pela tendência calculada com os dados históricos por uma regressão linear simples for maior do que 10 graus, Então considerar o valor de temperatura do gusa suspeito e proceder a outras duas medidas, tirar a média e repetir o teste.*

3.7.3.1.4 Substituição de valores

Eventualmente pode ser necessário trocar dados suspeitos ou faltantes por valores estimados, para que o SE continue funcionando automaticamente no modo "on-line". Um conceito aplicável é a solubilidade [Borsje/90], definida como a habilidade de deduzir o valor de uma medida do processo com valor desconhecido a partir de dados remanescentes, o que é importante quando a reconciliação de dados é usada para estimar valores perdidos dentro do sistema, conhecidos os valores reconciliados das variáveis medidas. A forma mais simples é utilizar valores "default", se possível.

3.7.3.1.5 Ações

Quando se deteta uma leitura suspeita, podem ser tomadas ações tais como aumentar a frequência das medidas e fazer a média, o que reduziria o erro randômico ou confirmaria o erro sistemático. Para dados com comportamento estranho, a Manutenção de Área poderia ser acionada. Os operadores devem ser alertados sobre parâmetros com valores estimados e como isto afetou as conclusões.

3.7.3.1.5 Sistema de Validação

Esquemáticamente um sistema de validação poderia ter a aparência da Figura 3.6 a seguir:

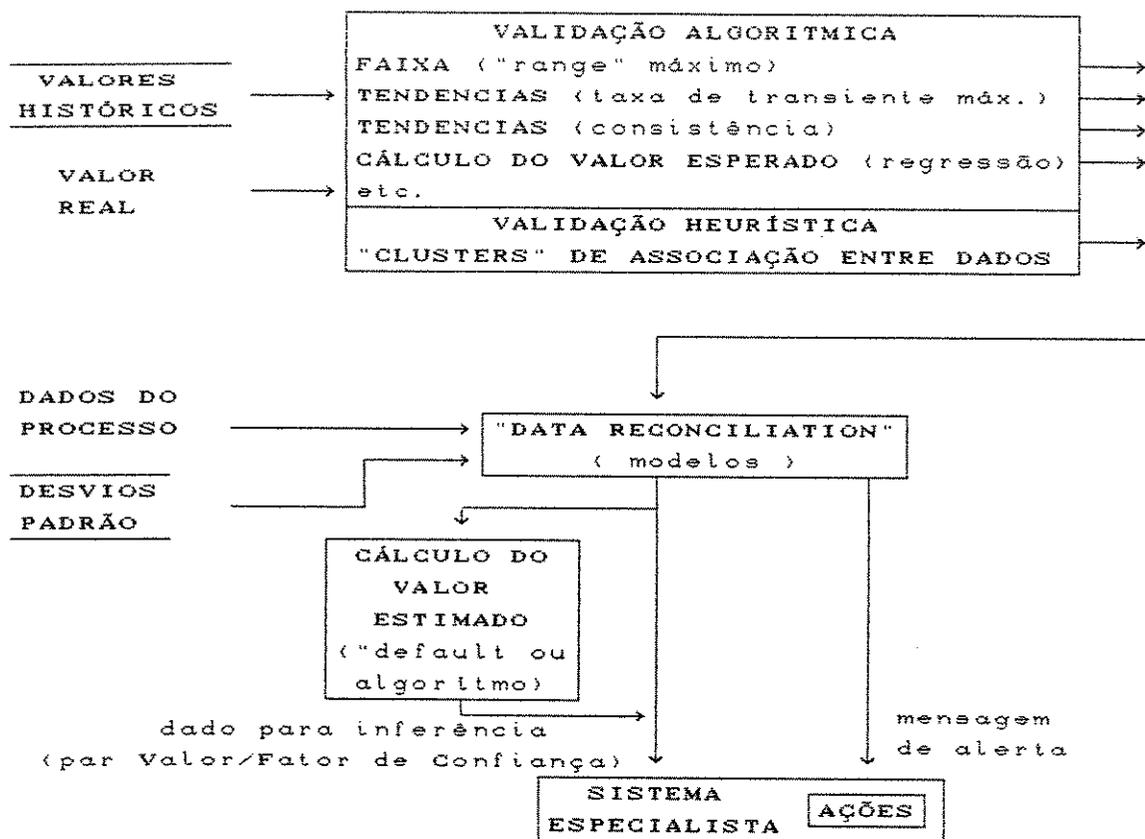


Figura 3.6 : Sistema de Validação dos dados

3.7.3.2 Implementação

Apesar de previsto no projeto, a implementação desta função no computador supervisorio demandaria um grande esforço de programação, devido à inexistencia de rotinas matemáticas e à propria disponibilidade de uso do computador. Entretanto, dentro do proprio SE foi implementada uma validação algorítmica de crítica de limites nas faixas possíveis para certos valores, feita com os fatos (sintomas) já preparados para as inferências.

3.7.4 PRÉ-TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS HISTÓRICOS.

3.7.4.1 Projeto

O pré- tratamento estatístico de dados históricos consiste no processamento de séries temporais, fazendo uma análise estatística

de médias, tendências, taxas de variação, integrais em relação a médias, variâncias, etc. Trata-se de se obter índices que retratem mudanças sutis nos parâmetros de controle do forno eventualmente imperceptíveis aos operadores. Consiste também na filtragem de dados oscilantes, como a altura da carga ou a temperatura do gas de topo, dando a eles um significado para a interpretação pelo sistema, o que é feito mentalmente pelos operadores enquanto olham os gráficos das cartas temporais nas telas de CRTs dos computadores de processo.

3.7.4.2 Implementação

O tratamento estatístico dos dados históricos não foi implementado no volume previsto no projeto quanto à parte residente no computador supervisor. Por facilidade operacional, foi implementado dentro do microcomputador IBM PC, num volume suficiente para fazer prova do conceito.

Por exemplo, o dado "temperatura real do gusa da última corrida" é obtido e colocado à disposição do SE para inferência, mas antes sofre um pré-tratamento segundo a Figura 3.7, obtendo-se a temperatura média do gusa e a tendência de crescimento da temperatura.

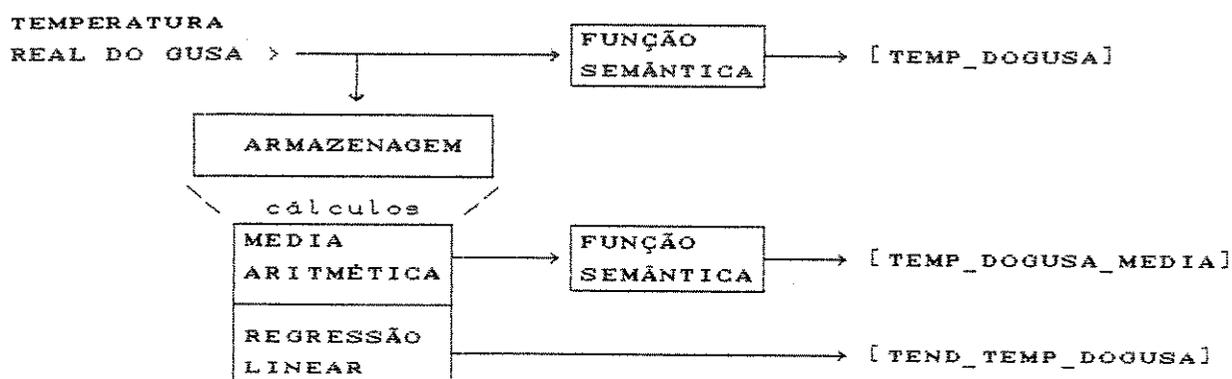


Figura 3.7 : Pré-tratamento estatístico dos dados

A implementação deste pré-tratamento estatístico é realizada através de funções "built-in" em regras como nos exemplos a seguir (ver codificação correspondente em LISP no anexo).

Regra nº 74:

SE o valor da temperatura real do gusa é conhecido,
ENTÃO armazene o último valor no rótulo MEMO_TEMP_GUSA, o qual é uma lista FIFO que guarda os 3 últimos valores.

Esta é uma regra antecedente, própria para encadeamento para frente, isto é, dispara se e quando sua premissa for verdadeira.

Uma vez de posse dos valores históricos, pode-se obter e trabalhar com a média aritmética e a taxa de variação através de outras regras como:

Regra nº 229:

SE a taxa de variação ("rate") obtida pela análise de tendência com uma regressão linear é maior que 1,
ENTÃO há uma tendendência de variação na temperatura do gusa.

Regra nº 230:

SE a temperatura do gusa é conhecida,
ENTÃO faça a temperatura média ser ALTA, NORMAL ou BAIXA, em função de testes de intervalos de pertinência sobre a média dos últimos valores armazenados no rótulo MEMO_TEMP_GUSA.

A função semântica será comentada mais adiante na seção 3.8.6.2, mas seu objetivo é trazer o valor do dado bruto colhido no processo, no caso do exemplo um número, para o nível semântico em que o especialista trabalha, isto é, temperatura *alta*, *normal* ou *baixa*, com um certo fator de confiança associado.

3.7.5 AQUISIÇÃO DOS FATOS.

Os dados já preparados para inferência (os fatos), são solicitados pelo SE , transmitidos do computador auxiliar, depositados no arquivo DADOS.DAT e recolhidos pelo SE como sintomas dos problemas potenciais a serem diagnosticados, da forma como já explicado no item 3.5 (estrutura do software de apoio).

O SE inicia e controla o processo através de uma função de importação dos dados contidos na tabela DADOS.DAT, utilizando algumas propriedades ("slots") da "frame" FORNO explicadas mais detalhadamente no item 3.8.2.2 (aquisição de dados para inferência).

A varredura para a aquisição dos dados é feita cíclicamente a intervalos regulares de n minutos, de acordo com as constantes de tempo associadas a cada parâmetro relevante e de acordo com as necessidades do diagnóstico em curso no SE, tal como a necessidade de evidências adicionais.

3.8. ESTRUTURA DA BASE DE CONHECIMENTOS

Esta seção é dedicada ao projeto e implementação do SE propriamente dito, em aspectos como a organização do conhecimento, controle das inferências e geração de recomendações. Em relação à metodologia utilizada, cobre as Tarefas 6 a 12 da Análise do Processo, a Identificação dos Elementos, a obtenção das Relações de Dependência e a Análise dos Procedimentos.

3.8.1 ESTRUTURA GERAL

A linguagem utilizada admite o paradigma de representar em contextos ou grupos de Regras - aqui chamadas "Frames" - a estrutura geral da Base de Conhecimentos. A estrutura do sistema foi projetada dividindo-se o problema em objetos ("Frames") relacionados com a divisão natural do sistema físico do Forno, com os Problemas eliciados e as Tarefas projetadas. Os "frames" foram então organizados proceduralmente como na Figura 3.8 abaixo, de acordo com o Modelo de Interpretação.

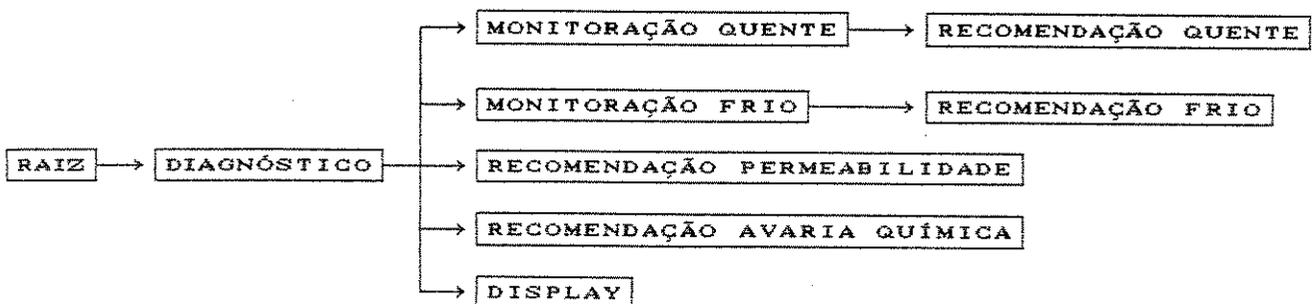


Figura 3.8 : Macro estrutura de "Frames".

O "frame" raiz, chamada de *Sistema Geral*, executa as seguintes funções principais:

- controle geral da consulta;
- "set-up" de valores e condições iniciais;
- instanciação da frame de Diagnóstico.

Uma regra associada é como abaixo:

Regra nº 174:

SE o parâmetro consulta é desconhecido,
ENTÃO está definido que o valor de "consulta" é " operação do forno", E armazene o valor 20 segundos no rótulo "ciclo", E armazene o valor 18 no rótulo "limite inferior da umidade de sopro", E armazene o valor 50 no rótulo "limite superior da umidade de sopro",... E faça todas as opções de tela sem efeito, E instancie a "frame" FORNO para diagnóstico da situação do forno

O controle geral da consulta é o seguinte: o "frame" Raiz é instanciado apenas uma vez e o "subframe" Diagnóstico é programado ("scheduled") para ser instanciado a intervalos regulares de cerca de cinco minutos, período escolhido de acordo com as constantes de tempo do Processo. Todo o sistema funciona como uma consulta única e permanente, dinamicamente controlada por si mesma , de acordo com a evolução também dinâmica do Processo.

3.8.2 DIAGNÓSTICO

O "frame" de diagnóstico, chamado de *Forno*, executa as seguintes funções principais:

- ativação do programa de aquisição dos dados do processo;
- leitura dos dados preparados para inferência;
- crítica a erros de transmissão;
- geração de hipóteses iniciais;
- otimização da eficiência das inferências;
- diagnóstico propriamente dito;
- definição do problema prioritário para tratamento;
- controle das recomendações e telas de resultado.

Alem destas, executa também algumas funções que pelo projeto, deveriam ser implementadas no computador de apoio, mas que por facilidades operacionais foram aqui implementadas :

- pré-tratamento estatístico;
- validação de faixas permissíveis para os parâmetros;

3.8.2.1 Estrutura interna

O Frame Forno possui uma estrutura interna para controle da ordem das inferências, clarificada para fins de manutenção através do agrupamento de regras correlatas, como na Figura 3.9 abaixo.

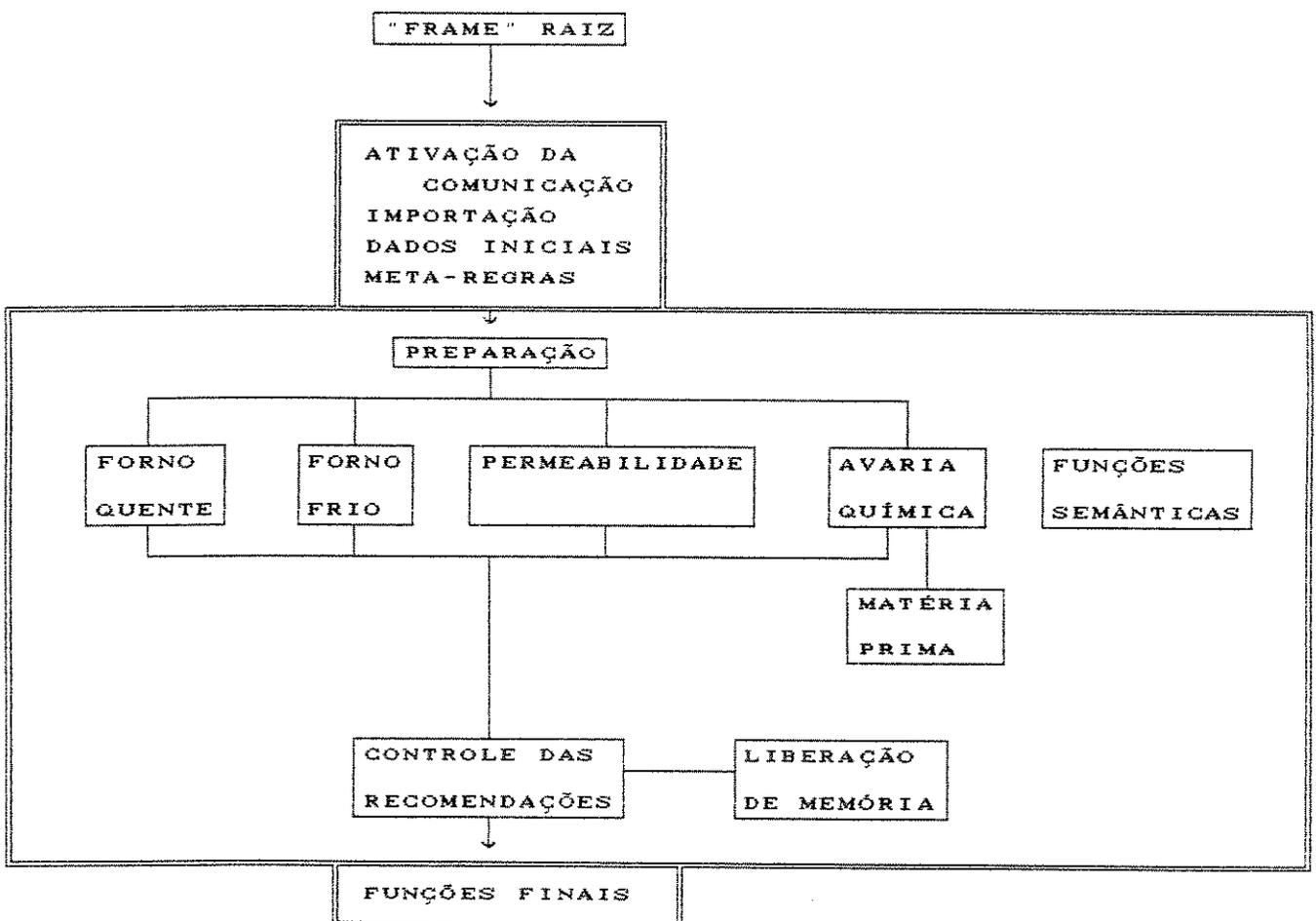


Figura 3.9 : Grupos de Regras no "frame" de Diagnóstico

3.8.2.2 Aquisição dos dados para inferência

As funções de ativação do programa de aquisição dos dados do processo e de leitura dos dados preparados para inferência, são implementadas com a ajuda de duas propriedades que decidem se o "frame" deve ser instanciado pela aplicação de um teste. Se o teste especificado como premissa é verdadeiro, o "frame" é instanciado. A implementação destas propriedades é feita como a seguir, incluindo a codificação em LISP.

SE existe uma premissa para o valor da propriedade investigada primeiro quando da instanciação do "frame", ENTÃO executar as ações contidas na premissa, que são a ativação do programa de comunicação com o computador supervisor VAX, a importação dos dados contidos no arquivo DADOS.DAT, e a associação destes valores ordenadamente com os parâmetros que representam os fatos para as inferências do sistema, tais como : erro de transmissão, temperatura real do gusa, pressão do sopro, aspecto das ventaneiras, rendimento do gas, umidade do sopro, temperatura do sopro, vazão do gas, etc.

```
PROMPT :: PREMISE
PREMISE :: ( $AND
            (DOS-CALL "COMVAX.COM")
            (IMPORT (QUOTE
                    (DOS-FILE-IN "C:\DADOS.DAT"
                      TRANSMISSAO TEMP_GUSA PRES_SOPRO
                      VENTANEIRA REND_GAS UMID_SOPRO
                      TEMP_SOPRO VAZAO_GAS ...)))
```

Através de uma função tipo "DOS-CALL" , executada logo ao início do "frame" de Diagnóstico, é ativado o programa de comunicação do PC com o computador supervisor (COMVAX.COM) que coloca os dados à disposição do SE no arquivo DADOS.DAT . Logo a seguir a função IMPORT importa os dados para uso do SE nas inferências. A seguir uma meta-regra testa se houve erro na transmissão, através do valor do parâmetro TRANSMISSÃO, determinado ser o valor ERRO pelo programa de comunicação COMVAX.COM, no caso de

seguinte.

representado através de gráficos como na Figura 3.10 na página compreensível ao especialista e ao engenheiro do conhecimento, investigados. Estes "clusters" de conhecimento compoem um modelo "clusters" de conhecimento sobre problemas possíveis são processo de encadeamento para trás ("backward-chaining"), os ("trace") pelo valor de parâmetros-objetivo ("goals"). Em um O diagnóstico propriamente dito é executado através da busca

3.8.2.4 Diagnóstico

problema de permeabilidade.

frio" e "forno quente" nulas, ou seja, investigate primeiro o ENTÃO faça as prioridades de busca dos parâmetros-objetivo "forno maior ou igual a 1480, e a pressão de sopra é alta, SE a temperatura real do gusa é menor que 1508 graus centígrados e Regra de controle nº 008:

nula.

ENTÃO faça a prioridade de busca do parâmetro-objetivo "forno frio" centígrados, SE a temperatura real do gusa é maior ou igual a 1508 graus Regra de controle nº 001:

gusa e da pressão do sopra:

muito importantes para o processo, como é o caso da temperatura do problemas iniciais, o que é possível a partir do valor de parâmetros A seguir outras meta-regras procuram gerar hipóteses de

3.8.2.3 Geração de hipóteses

usuário.

mensagem de manutenção acompanhada de alarme na tela do operador ENTÃO tentar novamente por três vezes e não conseguindo, mostrar uma SE o valor do parâmetro "transmissão" é igual a "erro" Regra de controle nº 009:

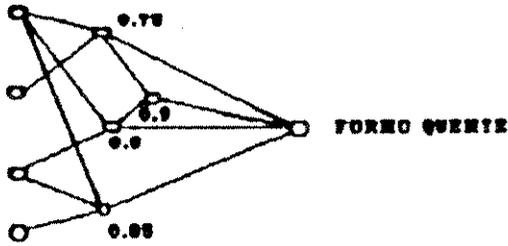
problemas na aquisição de dados.

TEMPERATURA DO GUSA
(maior que 1820 graus)

ASPECTO DAS VENTANEIRAS
(grande intensidade
de brilho)

SILICIO NO GUSA
(alto teor)

ENXOFRE NO GUSA
(baixo teor)



TEMPERATURA DO GUSA
(menor que 1470 graus)

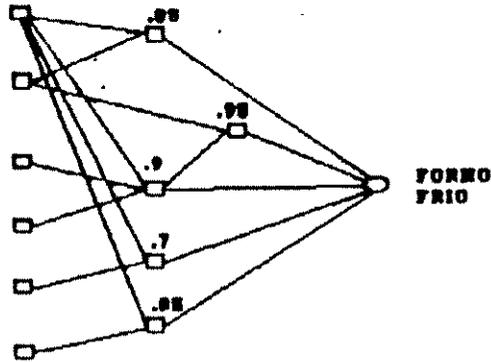
ASPECTO DAS VENTANEIRAS
(pequena intensidade
de brilho)

SILICIO NO GUSA
(teor baixo)

ENXOFRE NO GUSA
(teor alto)

RETEENCAO DE ESCORIA
(sim)

RITMO DE CARGAS
(maior que o normal)



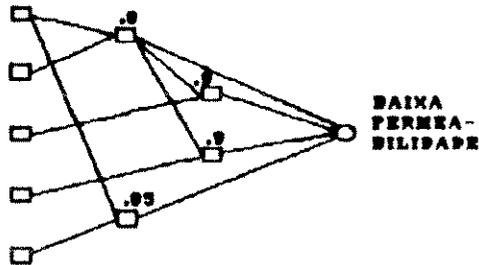
PRESSAO DE SOPRO
(alta)

COEF. DE PERMEABILIDADE
(alto)

MATERIA PRIMA
(sem problema)

TEMPERATURA DO GUSA
(maior que 1820)

RETEENCAO DE ESCORIA
(sim)



VELOCIDADE DE PENEIRAMENTO
DO SINTER
(maior que 160 ton/hora)

VELOCIDADE DE PENEIRAMENTO
DO COQUE
(maior que 180 ton/hora)

TAMANHO MEDIO DO SINTER
(< 18mm ou > 24mm)

TAMANHO MEDIO DO COQUE
(< 40mm ou > 54mm)

FINOS DE SINTER < 3mm
(mais que 5X)

FINOS DE COQUE < 25 mm
(mais que 5X)

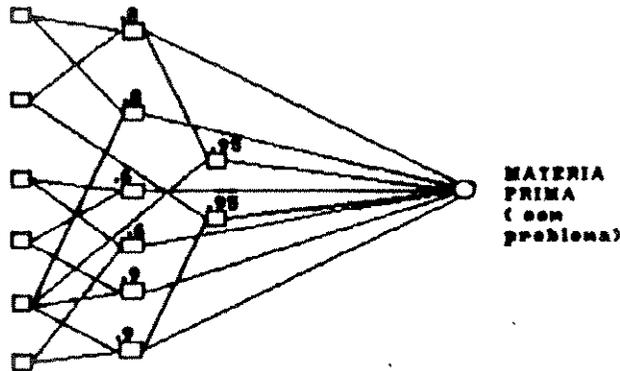


Figura 3.10 : Grafos ("clusters") de Conhecimento

Estes grafos relacionam os sintomas do processo aos problemas eliciados junto ao especialista, segundo o Modelo de Entidades.

Os sintomas recolhidos do processo, são recebidos pelo SE como dados, os quais, do ponto de vista das inferências, são os fatos que alimentarão as evidências comprovadoras do valor dos parâmetros-objetivo, que representam as hipóteses de nível térmico alto ou baixo (forno quente ou frio), baixa permeabilidade à passagem dos gases redutores, e avaria química no gusa.

Estes problemas foram os escolhidos, entre outros, por uma Análise de Segmentação do Problema, para implementar um Protótipo de Validação representativo da realidade operacional do processo.

As regras de produção são o formalismo de representação a nível da implementação, das relações de dependência entre os sintomas e os problemas. A combinação de tais evidências se dá através de conectivos lógicos E e OU, de acordo com regras lógicas sugeridas pelos grafos, e implementadas em regras de produção simples, como por exemplo:

Regra nº 43:

SE a temperatura do gusa é alta E o aspecto das ventaneiras é de grande intensidade de brilho,

ENTÃO o forno está "quente" com um fator de confiança de 85%

As funções semânticas serão comentadas na seção 3.8.6.2 .

Apenas se a medida de certeza do problema estiver acima de um valor limiar (treshold) estabelecido pelo especialista, a evidência da existência do problema será considerada para fins de diagnóstico.

3.8.2.5 Definição do problema prioritário

Assim, todas as hipóteses iniciais (parâmetros-objetivo) permitidas pelas meta-regras de geração de hipóteses iniciais, seriam investigadas (traced). Há porem um conhecimento a mais, cedido pelo especialista, sobre a definição do problema prioritário para tratamento. Por exemplo, se foi diagnosticado o problema de Forno Quente, não interessa se haverá problema de avaria química ou de permeabilidade porque o problema de Forno Quente deve ser tratado

e resolvido antes de se atacar os outros porventura existentes. Então, para otimizar a eficiência das inferências evitando uma busca desnecessária, parâmetros-objetivo são desconsiderados. A implementação disto se vê na regra de controle a seguir:

Regra nº 233 :

SE a valor de confiança associado ao diagnóstico de forno quente é maior que 20%,

ENTÃO armazene na variável "estado térmico anterior" o valor "forno era quente", E faça o valor da variável "diagnóstico quente" igual a "sim", E armazene a hora atual do diagnóstico no parâmetro "quente", E faça as prioridades de busca dos parâmetros-objetivo "permeabilidade" e "avaria química no gusa" nulas.

3.8.2.6 Controle das recomendações

Após a busca pela verificação de todos os problemas possíveis, busca eventualmente abreviada pelas regras de controle, os problemas existentes são identificados e outros "frames" são instanciados para monitorar e recomendar ações de correção. Por exemplo:

Regra nº 58 :

SE o último diagnóstico encontrado foi "forno quente",
ENTÃO instanciar o "frame" "acomp_quente" para acompanhamento do problema

3.8.2.7 Liberação de memória de trabalho

A medida que as consultas progridem por um certo tempo, sendo repetidas um número indefinido de vezes, a linguagem LISP pode ocupar um espaço de memória cada vez maior. A linguagem LISP tem o inconveniente de ocupar grandes espaços de memória com o tratamento de listas. Quando se aproxima o limite de memória disponível, LISP suspenderá temporariamente a consulta até que ela possa liberar memória suficiente para continuar, em um processo conhecido como "garbage collection".

Isto naturalmente é indesejável em um sistema de controle em tempo real e pode ser minimizado com um gerenciamento da memória,

removendo-se os "frames" que não são parte da cadeia de inferências ou não são mais necessários para a consulta em curso. Por exemplo:

regra nº 16 :

SE não é o caso do diagnóstico encontrado ser "forno quente",
ENTÃO remover as possíveis instâncias do "frame" "acomp_quente" da memória

Outro exemplo é o uso da propriedade (FINAL-FUNCTIONS) que dispara ao terminar as instanciações internas ao "frame" de diagnóstico, com a ação de eliminá-la da memória de trabalho, após instanciar o "frame" dedicado a mostrar na tela as recomendações do sistema. A codificação é como abaixo :

SE terminou o processamento interno ao "frame" de diagnóstico,
ENTÃO instanciar o "frame" que mostra na tela as recomendações finais para o operador, E elimine da memória o frame atual

```
FINAL-FUNCTIONS :: ( DO-ALL
                    (CONSIDER-FRAME DISPLAY)
                    (DELETE-DYN-FRAME FRAME))
```

3.8.3 RECOMENDAÇÕES

Para cada problema detetado na fase de Diagnóstico, devem existir dois tipos de ação de controle:

- a) uma ação imediata em variáveis de controle do Forno, para uma volta rápida à condições próximas das normais, e
- b) uma ou várias ações nas reais causas do problema, normalmente de descoberta e resultado mais demorado.

Utilizando uma metáfora do diagnóstico em medicina, a ação imediata pode ser entendida como uma ação terapêutica de emergência, para minimizar efeitos danosos e restabelecer uma certa normalidade no paciente, tal como aplicar uma aspirina para reduzir a febre. A ação em causas mais fundamentais, tal como desinfetar, fechar o ferimento, e fazer o curativo, atuam na etiologia do problema.

Por exemplo, para o diagnóstico de nível térmico elevado (Forno Quente), deve haver uma ação imediata de emergência, porque é danoso para o processo e para o produto que o Forno permaneça "quente", e em paralelo deve haver a descoberta e correção das possíveis causas fundamentais do problema, para a eliminação da origem do problema e para restabelecer as condições potenciais de normalidade no nível térmico. A ação apenas na causa-origem levaria muitas horas para causar efeito, ao passo que ações imediatas em certos parâmetros de controle, podem ter ação muito mais rápida.

Este conhecimento foi eliciado como segue e implementado em regras de produção :

Se o diagnóstico é "Forno Quente",

então tomar as seguintes ações:

se é possível injetar umidade no ar soprado,

injetar 3 gramas por normal metro cúbico e esperar 30 minutos pelo efeito;

em paralelo, investigar as possíveis causas reais do problema,

se não é possível, mas é possível diminuir a temperatura do sopro,

diminuir a temperatura em 20 graus centígrados e esperar 30 minutos pelo efeito;

em paralelo ...etc.

Regra nº 212 :

SE o valor da Umidade do Sopro está abaixo do valor limite de 32 g/Nm³ menos 3 g/Nm³,

ENTÃO pode-se injetar vapor no ar soprado.

Regra nº 110 :

SE é possível injetar vapor no forno,

ENTÃO pode-se recomendar aumentar a umidade do sopro.

Regra nº 158 :

SE pode recomendar aumentar a umidade do sopro,
ENTÃO imprimir na tela a recomendação de ação imediata, E aumentar a
umidade do sopro, E esperar 30 minutos.

Regra nº 222 :

SE o diagnóstico é "Forno Quente",
ENTÃO pode-se recomendar ação nas causas prováveis.

Regra nº 204 :

SE pode recomendar ação nas causas prováveis,
ENTÃO imprimir na tela a recomendação de análise de causas
prováveis.

3.8.4 TELAS DE RESULTADO

Uma tela com recomendações típicas é mostrada a seguir. Um diagnóstico de "Forno Quente", em uma situação em que não seja possível aumentar a umidade nem reduzir a temperatura do ar soprado, mas seja possível diminuir a vazão de gás natural, apareceria em uma tela de recomendações para o operador usuário como na Figura 3.11 na página seguinte:

DIAGNOSTICADOR DA SITUAÇÃO DO FORNO

Frame FORNO scheduled for 16:32:16 started at 16:33:42

Ha' uma avaliacao de avaria termica (FORNO QUENTE)
fator de confianca de : 75 %, as 16:39:25 horas
Diagnostico anterior : 26 %, as 16:35:58 horas)

- * NORMALIZAR A CONDIÇÃO TERMICA DO FORNO (FORNO QUENTE)
- * O LIMITE MÁXIMO DE COLOCAR VAPOR FOI ATINGIDO !
- * O LIMITE MÍNIMO DE RETIRAR TEMPERATURA FOI ATINGIDO !
- * O FORNO CONTINUA QUENTE !
- * Ação imediata: DIMINUIR A VAZÃO DE GAS NATURAL EM 500 M3/HORA E ESPERAR MAIS 30 minutos.

* Análise de causas prováveis: VERIFIQUE SE HA' ERRO NOS SEGUINTEs PARAMETROS:

1. PESAGEM DO COQUE
2. PESAGEM DE SINTER
3. CORREÇÃO NA UMIDADE DO COQUE
4. ANÁLISE QUÍMICA DA MATÉRIA PRIMA

Aperte a tecla RETURN/ENTER para continuar.

Figura 3.11 : Tela de recomendações para "Forno Quente".

3.8.5 ACOMPANHAMENTO

Alguns "frames" reúnem as funções de acompanhar se as ações recomendadas em outros ciclos da consulta surtiram efeito. O conhecimento operacional indica que a recomendação apropriada ao estado atual depende do estado anterior, como por exemplo é mostrado na parte de ação da regra 158 (na página anterior), onde é recomendado esperar 30 minutos pelos efeitos da ação sugerida para

sanar o problema de "Forno Quente". O sistema deve então monitorar a passagem deste período de tempo, sabendo que o estado anterior era "Forno Quente". A cada 5 minutos uma varredura nos parâmetros do Forno é feita, e ao fim dos 30 minutos uma nova recomendação acontece, se a ação não surtiu efeito ou se o mesmo problema permanece.

A estrutura do procedimento é simples:

```

SE o diagnóstico é "Forno Quente",
    ENTÃO instanciar a "frame" ACOMP_QUENTE.
SE já se passaram 5,10,15,20, ou 25 minutos,
    imprimir uma mensagem de espera pelo efeito e verificação
    das causas prováveis,
SE não, (30 min.),
    instanciar a "frame" R_MON_QUENTE para nova recomendação.
    
```

A implementação inclui algumas regras no "frame" de acompanhamento ACOMP_QUENTE, utilizando rótulos ("labels") e variáveis para guardar o "status" do diagnóstico anterior e das recomendações feitas, em uma estrutura ilustrada pela Figura 3.12 e pela regra nº 210 a seguir:

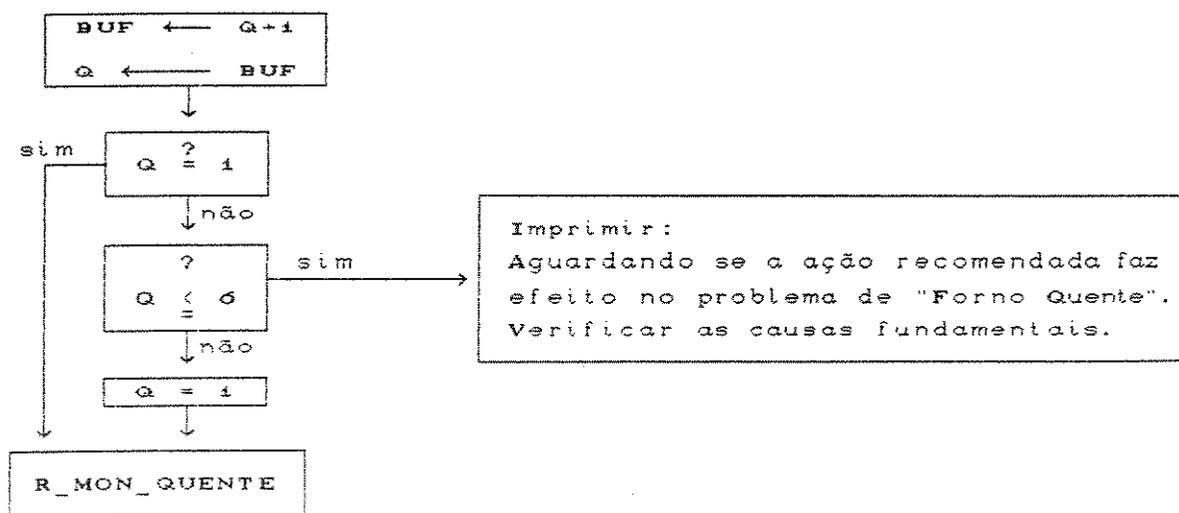


Figura 3.12 : Estrutura do "frame" de Acompanhamento

Regra nº 210 :

SE já se passaram menos de 30 minutos,

ENTÃO informe ao operador que o sistema aguarda pelo efeito da ação,
E que ele deve verificar as ações corretivas nas causas fundamentais.

3.8.6 COMENTÁRIOS GERAIS

3.8.6.1 Eficiência das Inferências

O SE, se fizesse a aquisição de seus dados diretamente do usuário, através de uma série de perguntas, deveria ter a parte de diagnóstico implementada em um sistema orientado pelo objetivo ("goal-driven"), com um sistema de encadeamento de inferências para trás. Isto facilitaria a geração de perguntas para a aquisição unicamente dos dados relevantes à consulta, otimizando portanto as inferências.

Em um SE em que os dados são coletados automaticamente do processo, é mais eficiente o método de inferência dirigido pelos dados ("data-driven"), já que todos os sintomas estarão disponíveis no momento da coleta dos dados do processo, e gerarão os problemas com inferências encadeadas para frente ("forward-chaining").

3.8.6.2 Funções Semânticas e Tratamento das Incertezas

Procurou-se preservar o nível semântico em que o conhecimento operacional existe. Por exemplo, o diagnóstico operacional trabalha com o conceito "temperatura no cadinho alta", mas o valor recebido do sensor de área é um número. Assim o fator de confiança no conceito nebuloso "alta", é simulado através de uma função de pertinência que guarda alguma semelhança com o tratamento da lógica nebulosa ("fuzzy logic").

Por exemplo, a função de pertinência associa o número recebido como o valor da temperatura do gusa, a um fator de confiança no valor "alta" ou "baixa" para o atributo "temperatura do gusa", o que pode ser visto na Figura 3.13.

Quase todos os sintomas para as inferências passam por uma função deste tipo.

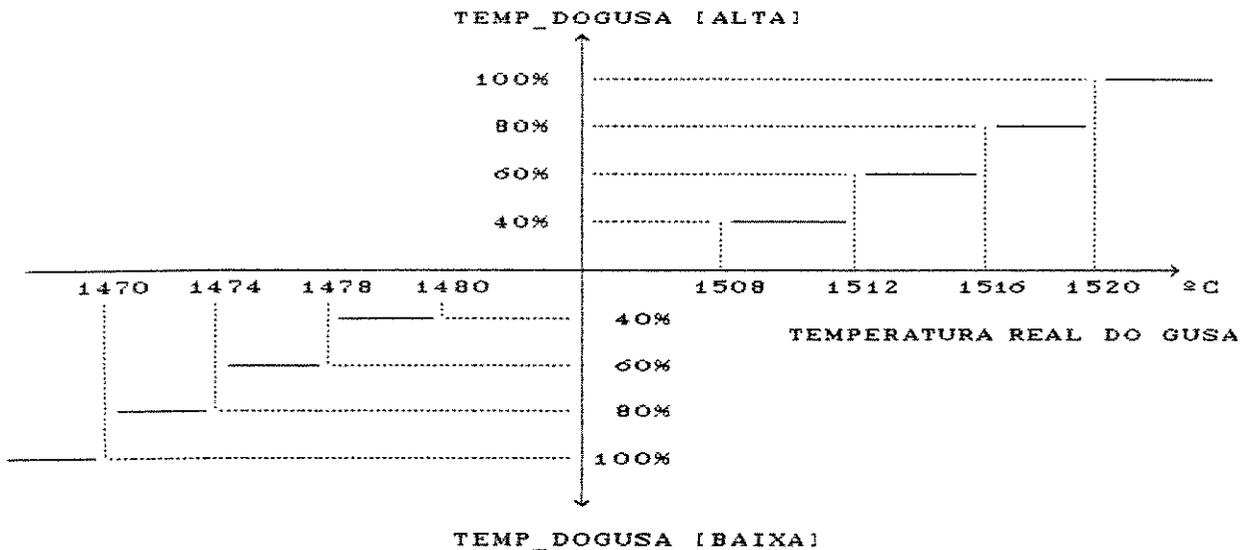


Figura 3.13 : Função Semântica

3.8.6.3 Manutenção e Documentação

Um dos importantes benefícios do uso de S.Es. em relação ao uso de Sistemas convencionais é que a posterior manutenção do Sistema pode ser feita, em grande parte, pelo próprio pessoal de área, sejam especialistas, técnicos ou engenheiros do processo. Para ajudar a que isto aconteça, deve-se tomar cuidados especiais com a documentação do SE.

Alguns destes cuidados incluem:

- a separação das regras em "frames" que acompanham a estrutura do Modelo de Interpretação, como a parte de Diagnóstico, Prescrição, etc.;
- dentro dos "frames", a separação das regras em grupos de conhecimento correlato, como por exemplo o grupo de diagnóstico de

forno frio (6 regras), de avaria química (5), de liberação de memória (4), etc.;

- o uso de descrição do objetivo geral da regra como uma das propriedades associadas à regra. Por exemplo, a regra nº 267 do SE implementado possui uma propriedade "DESCRIPTION" como a seguir:

DESCRIPTION :: armazena o valor do fator de confiança e a hora do diagnóstico de forno frio

- a tradução automática dos símbolos dos parâmetros ou atributos e seus valores e a composição destas traduções na estrutura das regras, como por exemplo na regra nº 122:

SE 1) avaliação do teor de silício no gusa É baixo, OU
2) avaliação do teor de silício no gusa É alto,
ENTÃO É DEFINIDO (100%) QUE há avaria química no gusa.

- preservar o nível semântico em que o conhecimento foi eliciado, sem que as etapas intermediárias sejam eliminadas;

Também alguns cuidados podem ser tomados, segundo [Jacob/90], visando explicitamente à posterior manutenção da consistência do sistema quando de alguma modificação:

- separar as regras de controle das regras contendo o conhecimento declarativo sobre as relações entre os elementos do problema;

- segregar variáveis de controle;

- identificar os fatos que são locais (internos) a um grupo, e os fatos que são usados em mais de um grupo de inferências;

- explicitar, em documentação externa, a descrição e as propriedades dos fatos de um grupo que afetam as inferências em outro grupo.

3.9. DESEMPENHO DO SISTEMA

Apesar do SE ter sido implementado em uma estação de trabalho do tipo PC, sem grande capacidade de processamento e sem a aquisição direta de dados do processo, o desempenho do sistema quanto à rapidez dos resultados é amplamente suficiente. Isto se deve principalmente ao seguinte:

a) devido à grande inércia térmica do forno, as constantes de tempo do processo são grandes, da ordem de 20 ou 30 minutos. Uma amostragem cerca de 10 vezes menor seria uma indicação para um razoável intervalo de amostragem e decisão, o que daria cerca de 2 ou 3 minutos para um ciclo completo de inferências;

b) o sistema não é muito grande, pois trata-se de um protótipo com cerca de 250 regras, que consome menos de 30 segundos em um ciclo, incluindo a leitura dos dados do processo através da comunicação com o computador supervisor.

A crítica ao desempenho operacional do sistema foi bastante favorável. O sistema foi avaliado dentro do contexto dos conhecimentos parciais sobre a operação do forno contidos no SE (nível térmico, avaria química no gusa, e permeabilidade), e levando em conta que na perspectiva do controle total da operação do forno, este conhecimento parcial não é suficiente para as necessidades operacionais globais.

Considerando esta restrição, o sistema foi avaliado pelo Superintendente da Operação do forno e engenheiros de operação que não participaram da elicitação de conhecimentos, os quais teceram os seguintes comentários, na análise dos testes a frio:

- as recomendações do sistema foram no mesmo sentido do que se faria na operação real, não tendo sido feita nenhuma

recomendação contrária ou errada;

- do ponto de vista qualitativo, o desempenho foi considerado perfeitamente satisfatório; a porcentagem de acerto, neste sentido da ação tomada corretamente, pode-se dizer que é de 100% ;
- do ponto de vista quantitativo, em certas situações a magnitude das ações recomendadas devem sofrer um pequeno ajuste para que a ação se torne mais efetiva, trazendo o forno à normalidade na rapidez desejada. Deve ser transmitido e inserido no sistema o conhecimento de uma avaliação quantitativa através de cálculo, em função da reserva térmica;
- como avaliação geral, ficou comprovado que:

a) o sistema está qualificado para dar uma tendência de ações no sentido de eliminar um problema,

b) a análise feita é confiável qualitativamente,

c) o protótipo é suficiente para se sentir a utilidade prática do sistema, e o retorno será imediato, mais rápido à medida que a resposta do sistema se aproximar da realidade operacional.

O sistema deve ser submetido a testes "a quente" durante 1 ou 2 meses no ambiente operacional, fase do projeto em que nos encontramos atualmente, para sofrer o refinamento dos fatores de confiança e dos valores quantitativos das recomendações de correção, (hoje fixas) que devem ser variáveis em função do estado do forno e da confiança no diagnóstico.

Em suma, o desempenho do sistema foi considerado amplamente satisfatório do ponto de vista qualitativo. O sistema diagnostica e indica corretamente a direção e o tipo de ação para contornar o problema. Em uma avaliação "a quente" dos resultados operacionais,

as recomendações do sistema estariam qualitativamente corretas mas eventualmente na quantidade errada. Este é um conhecimento que poderia ser incluído na Base de Conhecimentos com facilidade, em se dispondo do recurso dos especialistas.

Dentro deste contexto, o sistema atendeu perfeitamente à validação da tecnologia, às características da solução e principalmente à decisão dos usuários de utilizar efetivamente um protótipo completo.

Foi desenvolvido e implementado um protótipo de SE para guia operacional de altos fornos, com aquisição automática de fatos para inferência, a partir de dados de sensores colhidos diretamente do processo, e com recomendações de ações de controle em tempo real compatível com as necessidades do forno.

O protótipo foi desenvolvido segundo a metodologia proposta, e inclui funções tais como: detecção de situações anormais no forno, diagnóstico, identificação de fontes de perturbação, recomendação de ações imediatas para o retorno do forno à um nível térmico apropriado, identificação e ação sobre causas fundamentais do problema para eliminar tendências negativas e manter o forno operando em condições normais e estáveis.

Conhecimento operacional sobre tendências prospectivas de forma a evitar situações de emergência foi incluído na base de conhecimentos.

A monitoração do forno para verificar se as ações prescritas foram efetivas para alcançar uma situação operacional normal e segura foi também incluída; em caso contrário, ações mais fortes são continuamente recomendadas.

O SBC foi implementado em uma estação de trabalho dedicada unicamente ao funcionamento do sistema especialista, que faz parte de um sistema de controle supervisório do forno, o qual inclui um computador supervisório, um sistema digital de controle distribuído, controladores lógico programáveis, equipamentos de monitoração, e outros.

No próximo capítulo, discute-se os resultados obtidos e trabalhos futuros.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

CONTEÚDO

<i>seção</i>	<i>página</i>
1. INTRODUÇÃO.....	4.1
2. CONCLUSÕES E EXPANSÃO DO SISTEMA.....	4.2
4. RESUMO.....	4.4

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo discute-se os resultados do trabalho, em função dos objetivos propostos dentro do escopo da dissertação.

Comenta-se também as expansões previstas tanto nas funções atuais do sistema como em novas funções, aproveitando as estruturas de hardware e software já desenvolvidas, assim como o eventual uso de novas características de implementação.

4.2. CONCLUSÕES E EXPANSÃO DO SISTEMA

Podemos considerar que atingimos, dentro de uma filosofia pragmática, os objetivos propostos.

Os resultados concretos consistiram principalmente: na absorção de técnicas de desenvolvimento de SEs, consolidada no desenvolvimento de uma metodologia; na absorção de conhecimentos que nos permitiram formar um arcabouço teórico para prosseguir no domínio da tecnologia; na fixação deste aprendizado com a realização física de um projeto implementado, testado e validado, que considerou ao lado de aspectos tradicionais, as características particulares ao controle de processos em tempo real utilizando SEs; e finalmente o estabelecimento de um núcleo para a expansão do sistema na direção de torna-lo operacionalmente completo.

Durante este processo, constatou-se que a tecnologia de SBCs se aplica com vantagens ao problema de controle e guia operacional de um alto-forno, e representa realmente o estado da arte nestas funções.

Será natural a expansão do sistema na direção de uma base de conhecimentos que cubra um leque maior de funções relacionadas com o conhecimento total de operar o forno e seus equipamentos auxiliares.

A estrutura conceitual do sistema permite acréscimos incrementais de conhecimentos, e a estrutura de "hardware" mostrou-se suficiente, podendo ser feita com facilidade uma transposição do sistema para uma estação de trabalho mais potente. De qualquer forma, devido as constantes de tempo do processo, e a eficiência atual das inferências, a avaliação é que é grande o espaço de crescimento do sistema tal como implantado, sem a necessidade de migração nem da linguagem nem do hardware utilizado.

Um trabalho futuro consistirá em aumentar o conhecimento para incluir ações preditivas em lugar de ações corretivas tais como: a sistematização de operações sobre estados instáveis do forno, como o julgamento das causas e posições de engaiolamentos, arriamentos, chaminés etc. bem como guiar o trabalho de recuperação destes estados; operações de parada programada com retorno suave ao estado de operação normal, com a preparação do leito de fusão, procedimentos de parada e recuperação; sistematização do conhecimento sobre as medidas que os operadores devem tomar quando de falhas operacionais em equipamentos auxiliares; procedimentos de interpretação de informações hoje existentes em sistemas auxiliares de apoio ao operador, como telas gráficas de SDCD, na monitoração de temperaturas dos regeneradores, na interpretação das informações dos modelos convencionais, além da integração destes modelos no SE .

A conveniência de um tratamento mais flexível das incertezas nos leva a considerar, no sistema futuro, o tratamento por lógica nebulosa. Consideramos ainda um sistema para atualizações estatísticas das funções de pertinência para o acompanhamento automático das variações de longo termo nas condições do forno, tal como o desgaste dos refratários. Nesta última função, o estudo do aspecto de aprendizado , provavelmente baseado em casos ("case-based reasoning"), se imporá como uma consequência natural. Redes Neurais se adaptariam bem na interpretação ou reconhecimento de padrões dinâmicos de variáveis relevantes.

Objetiva-se também, no futuro, SBCs completamente integrados e conectados com a rede de controle dos processos dos três altos-fornos da CSN, para lidar com o nível operacional e gerencial de todos os fornos.

4.3. RESUMO

Neste capítulo foram apresentadas as conclusões decorrentes do trabalho como um todo, nos aspectos de aprendizado e realização do protótipo, e considerações sobre direções em que uma expansão do sistema seguiria, nos aspectos funcionais.

BIBLIOGRAFIA

- Amano, S. et al, *Expert System for Blast Furnace Operation at Kimitsu Works*, Iron and Steel Institute of Japan International, vol.30, nº 2, pp.105-110, 1990.
- Atsumi, T., *Artificial Intelligence in the Japanese Steel Industry*, Central R&D Bureau, Nippon Steel Corporation, 1989.
- Ayton, Peter & Wright, George, *Eliciting and Modeling Expert Knowledge*, Decision Support Systems, Elsevier Science Publishers, 1987.
- Boose, John H., *Expertise Transfer For Expert System Design*, Elsevier, 1986.
- Borsje, H. J. et al, *Real-time Expert Systems and Data Reconciliation for Process Applications*, Advances in Instrumentation and Control, volume 4, ISA, 1990.
- Breuker, Joost & Wielinga, Bob, *Use of Models in the Interpretation of Verbal Data*, em Kidd, Alison L. (Ed), *Knowledge Aquisition for Expert Systems - A Practical Handbook*, Plenum Press, 1987.
- Delgrande, J. P. & Mylopoulos, J., *Knowledge Representation: Features of Knowledge*
- Evanson, Steven E., *How to talk to an expert*, AI Expert, february 1988.
- Fernandes, C. A. C., *Análise de Viabilidade Técnica e Econômica*, RT-DCA, Unicamp, FEE, DCA, nov/89.
- Giorno et al, *Methods and Techniques for Knowledge Elicitation*, technical Report, IBM, dec/88.
- Gonçalves, Carlos A., *Aquisição e Representação do Conhecimento para Sistemas Especialistas*, Tese de doutorado, FEA/USP, 1986.
- Gonçalves, C. A., *Processos para Aquisição do Conhecimento e Area para condução do Experimento*, Notas de curso, out/89.
- Harmon, P. et al, *Expert Systems Tools and Applications*, John Willey & Sons, Inc., 1988.
- Hart, Anna, *Knowledge Elicitation: Issues and Methods*, Computer Aided Design, november 1985.
- Hoppen, N & Mazzili, C. P., *JHS: Um Protótipo de Sistema Especialista*

- para Análise de Crédito de Pessoa Física, Anais do XXII Congresso Nacional de Informática, pp. 456-461, 1989.
- Hoppen, N & Matsura, E., *Engenharia do Conhecimento em Sistemas Especialistas*, Notas de curso, 1990.
- Hr. S. David, *Expert Systems for Software Engineers and Managers*, Chapman and Hall, 1987.
- Ishii, K., Hayami, S., *Expert Systems in Japan*, IEEE Expert, summer 1988
- Jacob, R. J. K & Froscher, J. N., *Software Engineering Methodology for Rule Based Systems*, IEEE transactions on Knowledge and Data Engineering, 1990.
- Kimura, R. & Shimomura, A., *Case-based Guidance System for Blast Furnace Burden Distribution Operation*, Nippon Kokan, Keihin Works, 1990.
- McDermott, D & Charniak, E., *Introduction do Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, 1985.
- Machado, R. J. & Rocha, A. F., *Calculating the Mean Knowledge Representation from Multiple Experts*, Technical Report, IBM, oct/88.
- Morya, M. et al, *Development of Expert System for Trouble-shooting of Electrical Equipment*, Nippon Steel Corporation, Kimitsu Works, 1990.
- NSC, *Trends of New Process Control Technology in Japan and Application of Artificial Intelligence to Blast Furnace at Nippon Steel*, Nippon Steel Corporation, III Seminário de Informática e Automação na Siderurgia, volume II, novembro de 1988.
- Olson, Judith R. et Rueter, Henry H., *Extracting Expertise from Experts: Methods for Knowledge Acquisition*, Expert Systems, August 1987.
- Oglethorpe, D. & Carmignato, B. et al., *A Development Method for Expert System Environment*, International Technical Support Center, IBM, March 1989.
- Prerau, David S., *Knowledge Acquisition in the Development of a Large Expert System*. AI magazine, Summer 1987.
- Pressman, Roger S., *Software Engineering - A Practitioner's Approach*.

- McGraw-Hill, 1987.
- Quinn, Ronald J.. *The Advent of Data Acquisition to Expert Systems*, ISA proceedings, 1990.
- Rocha, A. et al, *Declarative and Procedural knowledge: Two Complementary Tools for Expertise*.
- Shibata, M et al, *Application of Expert System for Blast Furnace Operation Control*, Nippon Kokan, Fukuyama Works.
- Sopocy, D. M., Agogino, A. M., et al, *Development of On-line Expert System : HEATXPRT*, Advances in Instrumentation and Control, volume 1, ISA, 1990.
- Stock, M., *AI Theory and Applications in the VAX Environment*, Intertext Publications/Multiscience Press, McGraw-Hill Book company, 1988
- Takekoshi, A. et al, *Application of Knowledge Engineering for Iron and Steel Making Works*, NKK Technical Review nº 56, 1989.
- Tsunozaki, Y. et al, *An Expert System for Blast Furnace Control at Fukuyama Works*, Nippon Kokan Technical Report, 1987.
- Ward, P. T., Mellor, S. J., *Structured Development for Real Time Systems, Vol. I*, Yourdon Press, 1985.
- Watanabe, S. et al, *Application of Expert System to Blast Furnace Operation*, Nippon Steel Corporation, IFAC at Buenos Aires, 1989.
- Wielinga, B., Schreiber, G., de Greef, P., *KADS Sinthesis Report*, University of Amsterdam, Netherlands, 1989.

ANEXO

CODIFICAÇÕES DE ALGUMAS REGRAS DO SISTEMA

Algumas regras, funções e propriedades do sistema referenciadas no capítulo 3 são mostradas aqui, tal como implementadas em LISP, linguagem usada na codificação do SE projetado.

Rule 174:

```
premise :: ($AND
            (NOTKNOWN FRAME CONSULTA))

action  :: (DO-ALL
            (CONCLUDE FRAME CONSULTA "OPERACAO DO FORNO" TALLY 100)
            (STORE CICLO "00:20")
            (STORE LIM_INF_UMID_SOPRO 18)
            (STORE LIM_SUP_UMID_SOPRO 50)
            (SET-OPTIONS OFF ALL)
            (CONSIDERFRAME FORNO))
```

Rule 043:

```
premise :: ($AND
            (SAME FRAME TEMP_DOGUSA ALTA)
            (SAME FRAME VENTANEIRA GRANDE))

action  :: (DO-ALL
            (CONCLUDE FRAME QUENTE YES TALLY 85))
```

Rule 233:

```
premise :: ($AND
            (GREATERP* (MEASURE1 FRAME QUENTE ()) 20))

action  :: (DO-ALL
            (STORE EST_TERM_ANT_Q "forno era quente")
            (SET-VALUE DIAG_Q 1)
            (TIME-STAMP QUENTE)
            (SET-UTILITY PERMEAB -100)
            (SET-UTILITY AV_QUIM_GUSA -100))
```

ANTECEDENT :: YES

DESCRIPTION :: regra de controle

Rule 58:

```
premise :: ($AND
           (SAME FRAME RR)
           (EQUAL* (VALUE-OF DIAG_Q) 1))
action  :: (DO-ALL
           (CONSIDERFRAME ACOMP_QUENTE))
```

Rule 212 :

```
premise :: ($AND
           (LESSEQ*
            (PLUS (VAL1 FRAME UMID_SOPRO) 3) 32))
action  :: (DO-ALL
           (CONCLUDE FRAME DUMMY_MQ YES TALLY 20)
           (CONCLUDE FRAME PODE_COL_VAPOR YES TALLY 100))
```

Rule 110 :

```
premise :: ($AND
           (SAME FRAME PODE_COL_VAPOR)
           (EQUAL* (VALUE-OF V) 0))
action  :: (DO-ALL
           (CONCLUDE FRAME DUMMY_MQ YES TALLY 100)
           (SET-VALUE V 1)
           (CONCLUDE FRAME R_Q_VB YES TALLY 100))
```

Rule 158 :

```
premise :: ($AND
           (SAME FRAME X)
           ($OR (SAME FRAME R_SI_11)
                (SAME FRAME R_Q_VB)
                (SAME FRAME R_PE_A1)))
action  :: (DO-ALL
           (MPRINTT :ATTR (QUOTE (CYAN)) " * Acao imediata:"
                    :ATTR (QUOTE (WHITE)) "AUMENTAR A UMIDADE DO
                    SOPRO EM 3 g/Nm3 E ESPERAR 30 minutos."))
```

Rule 222 :

```
premise  ::  C$AND
            (SAME FRAME QUENTED)

action   ::  CDO-ALL
            (CONCLUDE FRAME DUMMY_MQ YES TALLY 1)
            (CONCLUDE FRAME R_QUENTE_O YES TALLY 100)
            (CONCLUDE FRAME FC_QUENTE YES TALLY 100)
```

Rule 204 :

```
premise  ::  C$AND
            (SAME FRAME X)
            (SAME FRAME R_QUENTE_O)

action   ::  CDO-ALL
            (MPRINTT :ATTR (QUOTE (CYAN)) " *   Analise de causas
            provaveis:"
            :ATTR (QUOTE (WHITE)) "VERIFIQUE SE HA' ERRO NOS
            SEGUINTEs ITENS:"
            :LINE :LEFT 10
            "1. PESAGEM DO COQUE"   :LINE
            "2. PESAGEM DE SINTER"  :LINE
            "3. CORRECAO NA UMIDADE DO COQUE" :LINE
            "4. ANALISE QUIMICA DA MATERIA PRIMA"))
```

Rule 210 :

```
Premise  ::  C$AND
            (LESSEQ*
            (VALUE-OF Q) 2))

action   ::  CDO-ALL
            (CONCLUDE FRAME DUMMY-AQ YES TALLY 100)
            (MPRINTT " *   AGUARDANDO SE A AÇÃO RECOMENDADA FAZ
            EFEITO NO PROBLEMA DE FORNO QUENTE" :LINE "
            VERIFICAR AS AÇÕES CORRETIVAS NAS CAUSAS
            FUNDAMENTAIS"))
```