

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Marco Aurélio Zimmermann

SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE
BOMBAS HIDROSTÁTICAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FLORIANÓPOLIS

2003

MARCO AURÉLIO ZIMMERMANN

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE
BOMBAS HIDROSTÁTICAS**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof^o Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS

2003

MARCO AURÉLIO ZIMMERMANN

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE
BOMBAS HIDROSTÁTICAS**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 01 de outubro de 2003

Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng. (Orientador)

Edson Pacheco Paladini, Dr. (Coordenador do curso)

BANCA EXAMINADORA

Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng. (Co-orientador)

Irlan von Linsingen, Dr. Edu.

Dedico este trabalho a todas às pessoas
que estiveram do meu lado durante a
execução deste trabalho, tendo me
ajudado direta ou indiretamente,
principalmente minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Aurélio José Zimmermann e Marlene Zimmermann por terem me dado subsídios para que eu pudesse chegar a este título, e aos meus irmãos Ricardo e Luiz por estarem sempre a meu lado.

À Dani, por sempre me incentivar, e à Eliete, por todo seu apoio.

Ao professor Jonny Carlos da Silva, que esteve sempre disponível para me atender, tornando o trabalho possível.

Ao professor Fernando Antônio Forcellini, pelo apoio, incentivo e pelas oportunidades oferecidas.

Ao professor Irlan von Linsingen, pelas conversas esclarecedoras que tivemos e pela participação na banca.

Ao especialista Júlio Scussel, que através de seus conhecimentos tornou possível a finalização do trabalho.

E a todos os meus amigos que direta ou indiretamente tiveram sua participação neste período, em especial à Thina (“in memoriam”).

**“...Valeu a pena? Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena...”**

Fernando Pessoa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Aspectos Gerais.....	15
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	17
1.3	Justificativa.....	17
1.4	Metodologia.....	18
1.5	Limitações do trabalho.....	20
1.6	Estrutura do trabalho	21
2	SISTEMAS HIDRÁULICOS E BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO.....	22
2.1	Sistemas Hidráulicos.....	22
2.2	Bombas de Deslocamento Positivo.....	24
2.2.1	Bombas de engrenagens externas.....	24
2.2.2	Bombas de engrenagens internas.....	26
2.2.3	Bombas de parafusos.....	28
2.2.4	Bombas de palhetas.....	29
2.2.5	– Bombas de pistões axiais.....	31
2.2.6	Bombas de pistões radiais.....	32
2.3	Fatores que influenciam a seleção da bomba hidrostática.....	33
3.	SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	34
3.1	Origens da Inteligência Artificial.....	34
3.2	Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas.....	36
3.3	Conceituação de Sistemas Especialistas.....	37

3.4	Princípios de funcionamento de S.E.....	39
3.5	Engenharia de conhecimento.....	42
3.5.1	Identificação do problema.....	44
3.5.2	Aquisição de conhecimento.....	45
3.5.3	Representação do conhecimento.....	47
3.5.4	Implementação de Sistemas Especialistas.....	51
3.6	Sistemas Especialistas no Projeto.....	53
4.	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	55
4.1	Introdução.....	55
4.2	Projeto conceitual.....	55
4.2.1	Identificação do problema.....	56
4.2.2	Definição do público alvo.....	59
4.2.3	Definição da ferramenta computacional.....	59
4.2.4	Definição do método de inferência.....	60
4.2.5	Definição do modelo de desenvolvimento.....	60
4.3	Aquisição e representação do conhecimento.....	62
4.3.1	Técnicas de aquisição.....	62
4.4	Implementação computacional.....	72
4.4.1	Interface do Sistema.....	72
4.4.2	Apresentação das saídas em HTML.....	73
4.4.2	Funcionamento do protótipo.....	75
4.5	Comentários gerais sobre o desenvolvimento.....	77
5.	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	79
5.1	Introdução.....	79
5.2	Aspectos importantes da verificação e validação de sistemas especialistas.....	79
5.3	Verificação do protótipo.....	81
5.3.1	Atendimento às especificações.....	81

5.3.2 Erros de semântica e sintática.....	82
5.4 Validação do protótipo.....	82
5.4.1 Determinação das métricas de validação.....	83
5.4.2 Métodos de validação.....	84
5.4.3 Resultados da validação do protótipo.....	85
6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS.....	86
6.1 Comentários preliminares.....	86
6.2 Comentários sobre o desenvolvimento do protótipo.....	87
6.3 Comentários sobre os resultados obtidos.....	88
6.4 Contribuições do trabalho.....	89
6.5 Recomendações para trabalhos futuros.....	90
6.6 Comentários finais.....	91
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema genérico. Fluxos de energia, matéria e informação (LINSINGEN 2001).....	23
Figura 2.2 – Bomba de engrenagens externas (LINSINGEN, 2001).....	25
Figura 2.3 Bomba de engrenagens internas (LINSINGEN, 2001).....	26
Figura 2.4 Bomba de engrenagens internas tipo gerotor (LINSINGEN, 2001).....	27
Figura 2.5 Bomba de parafusos (LINSINGEN, 2001).....	28
Figura 2.6 – Bomba de palhetas de deslocamento fixo com compensação de pressão (LINSINGEN, 2001).....	29
Figura 2.7 Bomba de palhetas de deslocamento variável (LINSINGEN, 2001).....	31
Figura 2.8 Bomba de pistões axiais (LINSINGEN, 2001).....	31
Figura 2.9 – Características operacionais das bombas de pistões axiais (IVANTYSYN & IVANTYSYNOVA, 2001).....	32
Figura 2.10 – Bomba de pistões radiais (LINSINGEN, 2001).....	32
Figura 3.1 – Estrutura de um Sistema Especialista (GIARRATANO & RILEY, 1994).....	40
Figura 3.2 – Exemplo de triplas OAV.....	51
Figura 4.1 – Etapas do projeto conceitual (ALVES 2001).....	56
Figura 4.2 – Modelo incremental utilizado para o desenvolvimento do sistema (LIEBOWITZ 1988).....	62
Figura 4.3 Tabela OAV desenvolvida pelo engenheiro de conhecimento....	66
Figura 4.4 Rede de inferência para escolha do deslocamento.....	66
Figura 4.7 Exemplo da determinação da bomba mais adequada entre as bombas de engrenagens e de palhetas de deslocamento fixo.....	68
Figura 4.8 – Diagrama de classes do sistema.....	68

Figura 4.9 – Interação entre o usuário e o protótipo.....	73
Figura 4.10 – Exemplo de arquivo HTML gerado pelo protótipo.....	74
Figura 4.11 – Gráfico da relação entre pressão, vazão e bombas de deslocamento fixo que podem ser utilizadas.....	76
Figura 5.1 – Métricas de avaliação do protótipo (ALVES 2001).....	83

RESUMO

A seleção de uma bomba hidrostática durante o projeto de um sistema hidráulico é uma decisão importante que tem grande influência na qualidade da atuação do sistema. É uma tarefa que requer tanto conhecimento teórico, disponível através da literatura técnica, quanto conhecimento heurístico adquirido ao longo de anos de experiência.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um Sistema Especialista protótipo que tem o objetivo de auxiliar o usuário, um estudante ou engenheiro com pouca experiência na área, na seleção da bomba hidrostática durante o projeto do circuito de potência hidráulica.

Primeiramente, são apresentados conceitos de hidráulica necessários para o desenvolvimento do trabalho, assim como a apresentação teórica das bombas hidrostáticas disponíveis. Em seguida é feita uma exposição dos principais conceitos relativos a Sistemas Especialistas, e de como estes podem ser aplicados na seleção da bomba.

Após a fundamentação teórica apresenta-se o desenvolvimento do protótipo, descrevendo como este foi desenvolvido e suas principais características.

Apresentam-se finalmente as conclusões sobre o trabalho, onde são feitas considerações sobre os resultados alcançados, as potencialidades a serem exploradas em trabalhos futuros e comentários finais.

ABSTRACT

The selection of a hydrostatic pump during the hydraulic system design is an important decision that has great influence in the system performance. It is a task that requires both theoretical background, available through technical literature, and heuristic knowledge gained along years of experience.

This work describes the development of an expert system prototype that has the objective of assisting a user, student or young engineer, in the pump selection during the power supply circuit design.

At first, some hydraulic systems concepts necessary to the development of the work are presented, along with a theoretical presentation of the available positive displacement pumps. In the sequence, an exposition of the main concepts related to Expert Systems and how they can be applied to pump selection is presented.

After the theoretical basis explanation, the prototype development is presented, describing how it was developed and its main characteristics.

Finally, the conclusions about the work are presented, with the results achieved by the research and the potentialities to be still explored in future works are considered, along with final comments about the work.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

A hidráulica possui um papel importante na história da humanidade, desde as rodas d'água primitivas até os dias atuais. A utilização energética de fluidos vem sendo explorada pelo homem há mais de 2.000 anos, contribuindo de forma relevante para o desenvolvimento técnico de sociedades. Atualmente, sistemas hidráulicos são utilizados em larga escala em vários segmentos de atividade, “da extração mineral à indústria aeroespacial, bem como em aplicações de uso cotidiano, como em veículos de transporte e passeio, equipamentos odontológicos e médicos, construção civil, etc” (LINSINGEN, 2001).

A necessidade de sistemas cada vez mais eficientes e baratos torna a busca pela melhor solução para o problema de projeto um fator determinante no desenvolvimento de um sistema hidráulico. O projeto de sistemas hidráulicos pode ser visto como uma seqüência de processos de tomada de decisões (ULLMAN apud SILVA, 1998), como por exemplo, o dimensionamento dos dutos, seleção de componentes, escolha da estratégia de controle, etc (OHHASI apud SILVA, 1998).

Uma decisão importante durante o projeto do sistema hidráulico é a seleção da estratégia de controle de fluxo (SILVA, 1998). Este controle pode ser feito de duas formas: controle resistivo e controle conservativo. O controle conservativo é realizado por meio de bombas e motores de deslocamento variável, enquanto o controle resistivo é obtido por componentes (válvulas) que são essencialmente dissipativos, podendo-se utilizar bombas de deslocamento fixo ou variável (LINSINGEN, 2001).

A seleção da estratégia de controle está diretamente relacionada com a seleção da bomba hidrostática (designada a partir deste ponto simplesmente pela palavra bomba) a ser utilizada no sistema. A seleção da bomba nem sempre pode ser vista como uma tarefa simples. A maioria das bombas pode ser adaptada para serem utilizadas em várias situações, porém alguns tipos são mais adequados para determinadas circunstâncias (PUMP SCHOOL, 1998).

Segundo Edgington (1969), a bomba representa o coração de um sistema hidráulico, e a sua escolha naturalmente merece considerações especiais. A falta de experiência e conhecimento para esta tarefa, comum em jovens engenheiros e estudantes de engenharia, faz com que seja útil a utilização de uma ferramenta de apoio à tomada de decisões.

Existem várias ferramentas para apoio a tomadas de decisões e, entre elas, destaca-se os Sistemas Especialistas (S.E.). Esta técnica, que tem sido estudada e aplicada desde a década de 60, é uma ferramenta útil para a resolução de problemas onde não se possui um método analítico de resolução estabelecido e onde o conhecimento necessário para a sua resolução seja de natureza heurística, ou seja, conhecimento obtido através da experiência na resolução do problema (GIARRATANO e RILEY 1994).

A utilização de S.E. para solução do problema de seleção da bomba para um sistema hidráulico apresenta algumas vantagens, que são apresentadas em detalhe na seção 1.3.

Neste trabalho será apresentado o processo de desenvolvimento de um Sistema Especialista que tem como objetivo auxiliar o projetista na escolha de uma bomba durante o projeto de um sistema hidráulico, através de questionamentos sobre as características do sistema a ser projetado, fornecendo uma solução baseada no conhecimento adquirido através de técnicas de engenharia de conhecimento, além de explicações sobre como esta solução foi alcançada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um Sistema Especialista que auxilie o engenheiro no processo de escolha da bomba mais apropriada para um determinado sistema hidráulico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Fazer um levantamento, através de revisão bibliográfica e de entrevistas com especialistas, do processo de escolha da bomba mais apropriada para um sistema hidráulico;
- Apresentar um modelo heurístico do processo de escolha da bomba através de técnicas de engenharia do conhecimento;
- A partir do modelo heurístico proposto, desenvolver uma ferramenta que auxilie o projetista na seleção da bomba mais apropriada para o sistema hidráulico a ser desenvolvido;
- Explorar o potencial do uso de Sistemas Especialistas em etapas de desenvolvimento de projetos.

1.3 Justificativa

Segundo Götz (1991), em nenhuma outra classe de componentes hidráulicos existe uma variedade tão grande de soluções construtivas como nas bombas e motores hidráulicos, devendo as opções serem escolhidas de modo a fazer coincidir as vantagens da solução encontrada com os requisitos do protótipo do próprio circuito que a bomba vai alimentar. Para isto, é importante que o projetista tenha um conhecimento dos componentes e de como eles operam no

circuito hidráulico, além de experiência com projeto de sistemas hidráulicos (ESPÓSITO 2000).

Geralmente o projeto do sistema hidráulico é realizado por alguém que possui este conhecimento e experiência, porém, em alguns casos não se tem disponível um engenheiro com este perfil. Nestes casos, a utilização de uma ferramenta computacional de auxílio à tomada de decisões pode ser útil, pois pode reduzir as chances que uma má escolha por parte do projetista, devido à sua inexperiência, comprometa o desempenho do sistema projetado, além de minimizar o tempo necessário para a tomada de decisão.

Uma forma de se disponibilizar conhecimento e experiência a pessoas consideradas novatas em um domínio de conhecimento é através do desenvolvimento de um sistema especialista. Desta forma, é possível que pessoas sem a experiência necessária para a realização da tarefa consigam obter um resultado próximo ou semelhante ao obtido por um especialista (LIEBOWITZ 1988).

Através do desenvolvimento deste sistema especialista, possibilita-se a aquisição do conhecimento de um especialista no projeto de sistemas hidráulicos no que concerne à escolha da bomba apropriada, para que este conhecimento esteja disponível em casos onde não se dispõe de um especialista, evitando com isto as desvantagens decorrentes de uma má escolha.

1.4 Metodologia

O problema apresentado neste trabalho será abordado através do desenvolvimento de um Sistema Especialista utilizando a metodologia de Modelagem Orientada a Objetos (DURKIN, 1994; GIARRATANO, 1998; GIARRATANO e RILEY, 1994; RICH & KNIGHT, 1992; RUSSEL & NORVIG, 1995; GONZALEZ & DANKEL 1993). Para o desenvolvimento do S.E. protótipo serão utilizadas teorias de Engenharia do Conhecimento (KIDD, 1987; MCGRAW

& WESTPHALL, 1990) para aquisição e representação do conhecimento utilizado pelo sistema. Estes conceitos serão devidamente apresentados no capítulo 4.

As etapas a serem realizadas para o desenvolvimento do protótipo são as seguintes (SILVA, 1998).

1. *Identificação*: Definição do tipo e escopo do problema, dos recursos necessários, dos objetivos do sistema e escolha dos especialistas.
2. *Conceitualização*: O engenheiro do conhecimento e os especialistas decidem quais conceitos, relações, estratégias, sub-tarefas e restrições são necessárias para resolver os problemas no escopo específico.
3. *Formulação*: Expressa os conceitos chaves e relações de acordo com a estrutura da ferramenta de implementação a ser utilizada.
4. *Implementação*: Codificação do sistema.
5. *Verificação e Validação*: Teste da performance e utilidade do sistema.

A complexidade envolvida no desenvolvimento de um S.E. torna necessária que sua implementação seja feita por etapas. O método mais utilizado para este fim é o modelo incremental, onde o sistema é desenvolvido a partir de incrementos na sua funcionalidade, através de ciclos definidos de desenvolvimento (GONZALEZ e DANKEL, 1993; GIARRATANO e RILEY, 1994).

A cada ciclo de desenvolvimento, realizam-se as seguintes tarefas:

- Aquisição de conhecimento (conceitualização e formulação)
- Implementação
- Verificação e validação

O objetivo de cada ciclo é incorporar ao sistema uma ou mais novas funcionalidades, tornando-o cada vez mais completo.

A utilização deste modelo emprega também o conceito de prototipagem (GONZALEZ e DANKEL, 1993) onde a cada ciclo de desenvolvimento tem-se um protótipo utilizável. Por não se tratar de um sistema comercial, ao final do trabalho será apresentado um sistema protótipo, que por sua vez poderá ser incrementado até chegar ao nível de sistema comercial.

1.5 Limitações do trabalho

Devido à complexidade envolvida na escolha da bomba, algumas limitações são impostas ao trabalho. A seguir são apresentadas as principais:

- Os valores dos atributos de cada tipo de bomba, como por exemplo pressão e vazão máximas e mínimas, foram retirados dos catálogos de apenas um fabricante (Rexroth), para evitar conflitos durante a coleta de dados.
- Em casos práticos, é possível que se modifique um tipo de bomba para que este se adapte a condições onde normalmente não poderiam ser aplicadas. Considerando-se estas modificações, a escolha da bomba tornaria-se abrangente demais para o escopo do trabalho. Portanto, limitou-se a escolha aos tipos comerciais normais de bombas sem modificações.
- Os tipos de bombas a serem escolhidos foram limitados pelos especialistas entrevistados, de acordo com a sua frequência de utilização.
- Por se tratar de um protótipo, o sistema está sendo desenvolvido para uso acadêmico, sendo necessária a sua expansão para que este possa ser utilizado de forma comercial ou industrial.

1.6 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 são apresentados conceitos referentes a sistemas hidráulicos, com ênfase aos tipos de bombas que podem ser utilizados no projeto deste tipo de sistema.

No capítulo 3 é feita uma descrição do que são sistemas especialistas e de como são desenvolvidos.

O capítulo 4 apresenta o processo de desenvolvimento do sistema, demonstrando como cada etapa foi realizada.

No capítulo 5, apresenta-se a verificação e validação do protótipo, demonstrando através de testes a sua funcionalidade e sua performance.

Por último, são apresentadas no capítulo 6 conclusões a respeito do trabalho desenvolvido, juntamente com sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir do conhecimento proporcionado por este trabalho.

CAPÍTULO 2

2 SISTEMAS HIDRÁULICOS E BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO

2.1 Sistemas Hidráulicos

Segundo LINSINGEN (2001), “um sistema hidráulico é um conjunto de elementos físicos convenientemente associados que, utilizando um fluido como meio de transferência de energia, permite a transmissão e controle de forças e movimentos”.

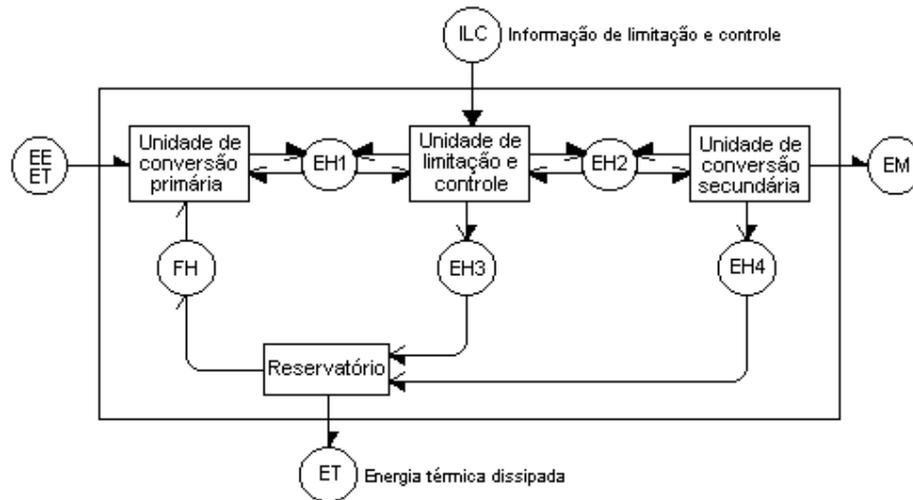
As principais funções dos sistemas hidráulicos são as seguintes:

- conversão de energia de uma forma (elétrica ou térmica) em energia mecânica útil.
- controle de energia
- limitação de energia

O sistema recebe como entrada energia mecânica (na forma de torque, rotação) convertida de energia elétrica ou térmica através de um motor elétrico ou de combustão interna. Em seguida, esta energia mecânica é convertida em energia hidráulica (potência hidráulica) pela unidade de conversão primária (UCP). A energia hidráulica transferida ao fluido hidráulico passa pela unidade de limitação e controle (ULC), onde é condicionada por válvulas, sendo em seguida transmitida à unidade de conversão secundária (UCS). O condicionamento da energia hidráulica na ULC é feito através das informações de limitação e controle, obtidas externamente ou por sinais de realimentação do próprio sistema.

Na UCS, a energia hidráulica devidamente condicionada é convertida em energia mecânica, expressas em termos de força e velocidade (ou deslocamento)

ou torque e rotação (ou deslocamento angular). Esta energia é a saída do sistema, e é utilizada em acionamentos mecânicos para diversos fins (LINSINGEN, 2001). A figura 2.1 mostra a estrutura de um sistema hidráulico genérico.



EE / ET = energia elétrica / energia térmica EH = energia hidráulica [pressão(p); vazão (Q)]
 EM = energia mecânica [força (F); velocidade (v) e/ou torque (T); rotação (n)]

Figura 2.1 Sistema genérico. Fluxos de energia, matéria e informação (LINSINGEN 2001)

Os principais componentes envolvidos em cada unidade de um sistema hidráulico são os seguintes:

UCP: bombas de deslocamento positivo

UCS: motores e cilindros hidráulicos

ULC: válvulas

Na próxima seção será feita uma descrição aprofundada do funcionamento e dos tipos de bombas de deslocamento positivo.

2.2 Bombas de Deslocamento Positivo

As bombas hidrostáticas caracterizam-se pela transferência de energia na forma de energia de pressão, sendo a variação de energia cinética muito pequena, podendo ser desprezada. O aumento da restrição ao escoamento implica aumento da pressão sem queda considerável da vazão, o que significa, teoricamente, que não existe limite superior de pressão, e pode-se operar com quantidades “ilimitadas” de energia (potência). Porém, para evitar danos físicos ao sistema hidráulico, limita-se a potência máxima através de válvulas limitadoras de pressão (LINSINGEN, 2001).

As situações de utilização de sistemas hidráulicos são as mais variadas, cada situação com suas necessidades de carregamento, velocidades, precisão posicional, tempo de resposta, etc. Para suprir estas necessidades, vários tipos construtivos de bombas foram concebidas, cada qual com características distintas.

Estas características são determinadas pelo princípio de deslocamento utilizado. Desta forma, as bombas hidrostáticas são classificadas em bombas de deslocamento por engrenagens, palhetas, pistões e parafusos.

As bombas de deslocamento por palhetas e pistões podem ser construídas para permitir uma variação de vazão à rotação (ou velocidade) constante. Bombas construídas desta forma são chamadas de bombas de deslocamento variável.

2.2.1 Bombas de engrenagens externas

Bombas de engrenagens externas simples consistem em máquinas com duas engrenagens iguais acomodadas dentro de uma carcaça apropriada (estator), com uma entrada e uma saída e vedadas lateralmente por tampas. Uma das engrenagens (motora) recebe energia oriunda da fonte de energia mecânica do sistema e a outra (movida) é montada livremente sobre o eixo. As engrenagens são montadas com a menor “folga” possível, de forma a isolar a

entrada de fluido da sua saída. O fluido é transportado da câmara de entrada para a câmara de saída através da parte periférica das engrenagens, entre dois dentes consecutivos de cada uma das engrenagens (células de transporte). Este tipo de bomba é de fácil construção e extremamente versátil, sendo produzidas em uma grande variedade de tamanhos.

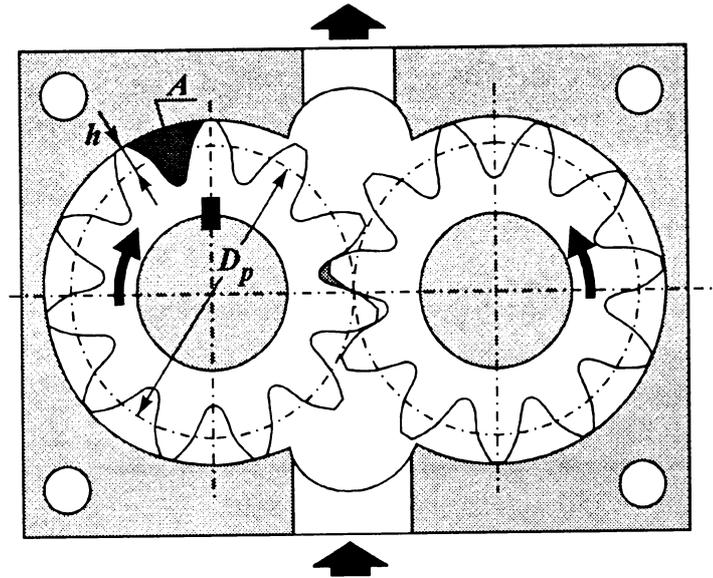


Figura 2.2 – Bomba de engrenagens externas (LINSINGEN, 2001)

As bombas de engrenagens externas são as mais utilizadas em sistemas hidráulicos, devido às seguintes qualidades (LINSINGEN, 2001; DETER, 1965):

- Preço relativamente baixo;
- Robustez;
- Bom comportamento em um grande domínio de viscosidades de fluídos hidráulicos;
- Baixa sensibilidade à presença de partículas sólidas presentes no fluído hidráulico;
- A posição de montagem é indiferente;

- Grande gama de rotações permissíveis;
- Boas características de sucção.

Apesar destas vantagens em relação a outros tipos de bombas, a utilização de bombas de engrenagens externas esta sujeita à limitação pelos valores de pressão e vazão máximas admissíveis (a adaptação para um maior intervalo de pressão e vazão torna a bomba mais cara), e a sua utilização depende também do tipo de aplicação em que a bomba será empregada.

2.2.2 Bombas de engrenagens internas

Este tipo de bomba é constituído de dois elementos, pinhão (engrenagem motriz) e coroa (engrenagem movida), montadas excentricamente em uma carcaça e girando no mesmo sentido. Da mesma forma que as bombas de engrenagens externas, o fluido é transportado pelo contínuo desengrenamento e engrenamento dos dentes do par de engrenagens (LINSINGEN, 2001).

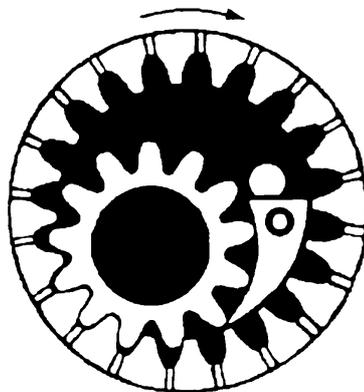


Figura 2.3 Bomba de engrenagens internas (LINSINGEN, 2001)

Em relação às bombas de engrenagens externas, as bombas de engrenagens internas apresentam algumas vantagens:

- maior rendimento volumétrico;

- menor perda de carga;
- menor pulsação na vazão;
- menor nível de ruído;
- mais adequação para trabalhar com fluidos de maior viscosidade.

Apesar disto, as bombas de engrenagens internas são de montagem mais complicadas e de maior custo de produção. Em vista disso, este tipo de bomba é utilizado basicamente em situações onde estas vantagens são importantes, ao invés de servirem como bombas de propósito geral (WARRING, 1969).

Assim como as bombas de engrenagens externas, as bombas deste tipo podem ter o seu limite de pressão e desempenho reduzidos.

Uma variação das bombas de engrenagens internas é a bomba tipo gerotor, onde as engrenagens possuem perfil trocoidal, com o pinhão possuindo um dente a menos que a coroa. Este tipo de bomba pode obter uma operação silenciosa e uma vida útil longa.

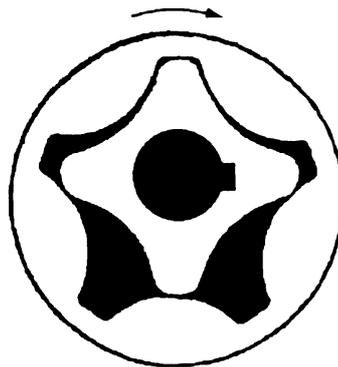


Figura 2.4 Bomba de engrenagens internas tipo gerotor (LINSINGEN, 2001)

2.2.3 Bombas de parafusos

O princípio de deslocamento por parafusos baseia-se em dois ou mais fusos helicoidais montados em uma carcaça. A vazão é axial e na direção do rotor. O fluido é transportado entre os flancos de um fuso, a depressão do outro e a carcaça. O movimento de rotação do fuso empurra o fluido uniformemente até a saída no final do eixo, sem variação volumétrica.

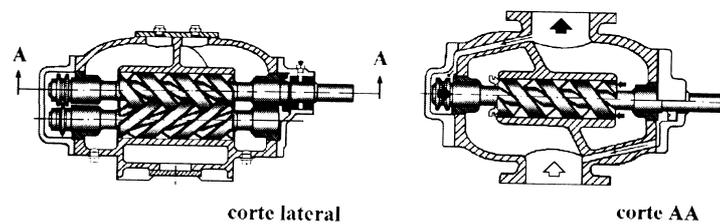


Figura 2.5 Bomba de parafusos (LINSINGEN, 2001)

As principais características deste tipo de bomba são (LINSINGEN, 2001):

- escoamento praticamente isento de pulsação;
- forças desbalanceadas axiais, facilmente compensadas;
- recomendadas para operar a rotações elevadas (máximo de 3600rpm);
- deslocamento desde 2 até 800cm³/rot;
- pressões operacionais de até 200bar;
- baixo rendimento, devido ao atrito elevado;
- exigem fluidos com viscosidade elevada (30 a 80 cSt);
- preço mais elevado em relação a bombas de engrenagens e palhetas.

A pressão de operação pode chegar a 175 bar, com rotações variando entre 600 e 4800rpm, e vazões entre 10 e 150 lpm. Bombas compensadas especiais podem ter pressões máximas de 210 bar e vazões que atingem 600 lpm.

As bombas de palhetas possuem em relação às bombas de engrenagens uma menor pulsação de deslocamento, porém não são mais silenciosas do que as bombas de engrenagens internas. Os inconvenientes deste tipo de bombas são: maior fragilidade, pressões de trabalho em funcionamento prolongado menores e baixo rendimento relativo (DIETER, 1965).

O funcionamento das bombas de palhetas de deslocamento variável segue o mesmo princípio das bombas de palhetas de deslocamento fixo, com algumas diferenças em relação à geometria do estator e da carcaça e pela possibilidade de variação reversível da posição do estator em relação ao rotor.

Neste tipo de bomba, o estator possui perfil circular e a variação do deslocamento é feita através da variação da excentricidade entre o estator e o rotor.

Devido à montagem circular do estator, só é possível existir uma entrada e uma saída, o que gera duas regiões de pressão distintas. Desta forma, a força radial resultante age de forma desequilibrada sobre o rotor e não pode ser compensada. Em decorrência, a pressão máxima de regime é relativamente baixa, na ordem de 100bar, podendo existir montagens com pressões de operação de até 160bar (LINSINGEN, 2001).

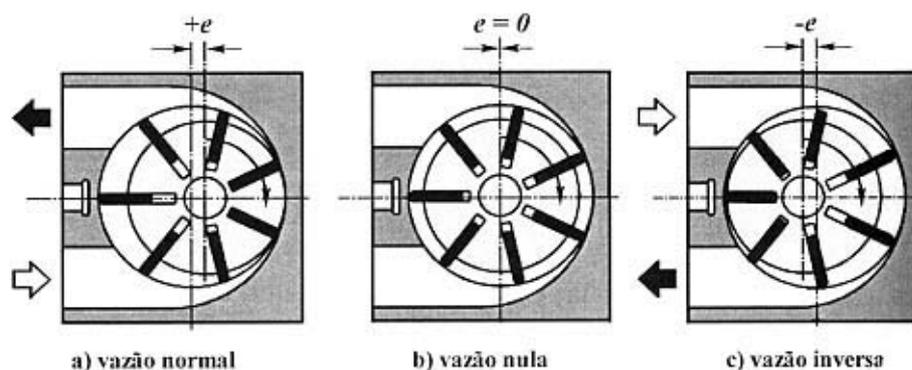


Figura 2.7 Bomba de palhetas de deslocamento variável (LINSINGEN, 2001)

Uma das grandes vantagens das bombas de deslocamento variável é a possibilidade de se realizar uma compensação interna de pressões, sem que seja necessária a utilização de válvula de alívio para conseguir a compensação externa. Além disto, as bombas com deslocamento variável, tanto de palhetas quanto de pistões, geram menos calor, e como conseqüência, desperdiçam menos energia.

2.2.5 – Bombas de pistões axiais

Estas bombas possuem como característica geométrica principal a disposição de pistões ajustadas em furos cilíndricos em um tambor também cilíndrico. O deslocamento do fluido é obtido através do movimento rotativo de um plano inclinado, que gera o movimento dos pistões, e pode ser fixo ou variável. As bombas de pistões axiais podem ser montadas de duas formas: com o prato inclinado ou com o eixo inclinado.

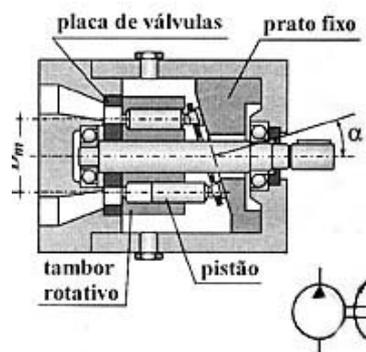


Figura 2.8 Bomba de pistões axiais (LINSINGEN, 2001)

As bombas com prato inclinado ocupam menor volume, porém as bombas de eixo inclinado possuem rendimentos melhores e menor sensibilidade à presença de partículas sólidas contaminadas. As características operacionais

dos dois tipos de bombas de pistões axiais são as seguintes (IVANTYSYN & IVANTYSYNOVA, 2001).

		Pistões axiais com prato inclinado	Pistões axiais com eixo inclinado
Custo	Inicial	alto	alto
	Operação	baixo	baixo
Pressão (bar)	Operação Máxima	100 – 450	120 – 450
	Mínimo	600	500
deslocament o (cm³/ rev)	Mínimo	0.1	1.5
	Máximo	500	1000

Figura 2.9 – Características operacionais das bombas de pistões axiais (IVANTYSYN & IVANTYSYNOVA, 2001)

2.2.6 Bombas de pistões radiais

Neste tipo de bombas os eixos dos pistões são perpendiculares ao eixo de acionamento. Os pistões podem ser dispostos em forma de estrela ao redor do eixo ou em linha de um virabrequim.

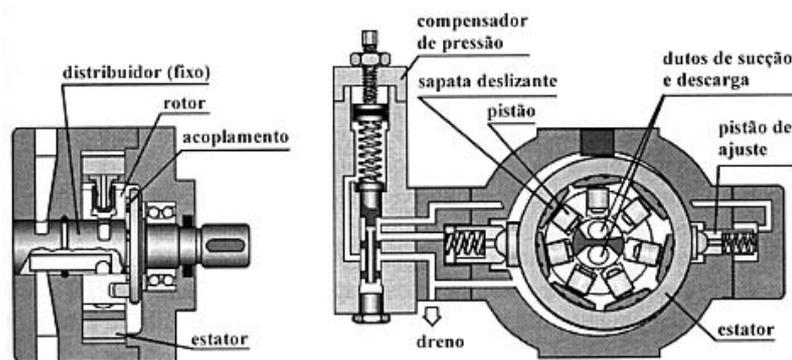


Figura 2.10 – Bomba de pistões radiais (LINSINGEN, 2001)

2.3 Fatores que influenciam a seleção da bomba hidrostática

A seleção da bomba não é uma tarefa simples. A maioria das bombas pode ser adaptada para serem utilizadas em várias situações, porém alguns tipos são mais adequados para determinadas circunstâncias (PUMP SCHOOL, 1998).

Segundo Dieter (1965), para escolher o tipo de bomba adaptável a determinado sistema hidráulico, deve-se considerar principalmente os seguintes pontos:

- preço, peso e restrições;
- pressão de trabalho, faixa de velocidades de rotação;
- condições de transporte e de instalação;
- sentido de rotação único ou duplo;
- faixa de temperaturas de funcionamento;
- natureza dos fluidos hidráulicos a utilizar;
- pulsação de deslocamento, ruídos;
- rendimento do sistema, variações do deslocamento útil.

Considerando as características da tarefa de seleção apresentadas, pode-se verificar que esta é uma tarefa adequada a ser realizada por um sistema especialista. No capítulo seguinte apresentam-se conceitos sobre a aplicação de sistemas especialistas e como eles podem ser utilizados para solucionar o problema proposto.

3. SISTEMAS ESPECIALISTAS

3.1 Origens da Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) não surgiu somente como consequência do desenvolvimento da informática. Sua base teórica é resultado de séculos de estudos, tendo a informática apenas fornecido o meio pelo qual esses estudos pudessem ser aplicados e desenvolvidos.

Segundo o filósofo Hunbert Dreyfus (DREYFUS 1984) a história da Inteligência Artificial pode muito bem ter começado por volta de 450 a.C. quando Platão reportou o diálogo em que Sócrates pergunta a Eutífron “eu gostaria de saber quais são as características da bondade que tornam todas as ações boas...para que eu as utilize como um padrão através do qual se possa julgar as ações de outros homens”. Ou seja, Sócrates queria adquirir o conhecimento que Eutífron possuía sobre a bondade das ações para que ele também pudesse utilizar este conhecimento para distinguir ações boas de não boas. Esta é provavelmente a mais antiga descrição de um processo de aquisição de conhecimento.

Os primeiros estudos sobre o processo de raciocínio são atribuídos a Aristóteles, que tentou formular as leis que governam a parte racional da mente, criando um sistema informal de silogismos que em princípio permitiam a geração mecânica de conclusões a dadas premissas iniciais.

Estudos mais modernos sobre o raciocínio e o funcionamento da mente forneceram contribuições importantes para a IA. René Descartes afirmava que todo entendimento consiste em formar e utilizar representações simbólicas apropriadas, a isto Kant adicionou a idéia de que todos os conceitos são regras, e

Frege mostrou que regras poderiam ser formalizadas de maneira a serem manipuladas sem intuição ou interpretação (DREYFUS, 1984). Leibniz, baseado na teoria materialista¹, foi um dos primeiros a tentar criar um artefato mecânico com o objetivo de realizar operações mentais (RUSSEL & NORVIG, 1995).

A idéia de que o cérebro possui e processa informações e sua possível aplicação à IA teve um grande desenvolvimento com a psicologia cognitiva. Em 1943, Kenneth Craik especificou três aspectos básicos de um agente baseado em conhecimento: (1) o estímulo deve ser traduzido para uma representação interna, (2) a representação é manipulada por processos cognitivos para derivar novas representações internas, e (3) estas são traduzidas para uma ação (RUSSEL & NORVIG, 1995).

A formalização matemática também proporcionou um grande avanço no sentido da IA. George Boole, ao formalizar a lógica de Aristóteles, forneceu uma ferramenta que, ao ser aprimorada por Frege, tornou-se a base da maioria dos sistemas de representação do conhecimento atuais. Outra grande contribuição da matemática à IA é no campo da probabilidade, que fornece teorias para tratamento de incertezas.

Para que a IA finalmente surgisse, foi necessário o surgimento de um artefato que permitisse a aplicação destas idéias. O desenvolvimento deste artefato começa com o surgimento do Ábaco, passando pela máquina de soma e subtração de Pascal e de multiplicação de Leibniz, pela Máquina Analítica de Babbage, até chegar finalmente ao computador moderno, no início da década de 40, com a construção do primeiro computador operacional por Alan Turing, o Heath Robinson² (RUSSEL & NORVIG, 1995).

Foi o próprio Turing o primeiro a ver o computador como um possível artefato inteligente, afirmando em meados da década de 40 que até o final do século XX existiriam computadores inteligentes.

¹ Segundo esta teoria, *“Todo o mundo (inclusive o cérebro e a mente) operam de acordo com leis físicas.”* (RUSSELL 1995)

² Construído com o objetivo de decifrar mensagens codificadas alemãs durante a Segunda Guerra.

3.2 Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas

Com a demonstração feita em 1955 por Allen Newell e Herbert Simon de que “computadores são sistemas de símbolos físicos e que estes símbolos podem ter qualquer significado, incluindo características do mundo real, e seus programas podem ser utilizados como regras para relacionar estes símbolos” (DREYFUS, 1984), mostrou-se que os computadores poderiam ser utilizados para emular certos aspectos importantes da inteligência. Um dos resultados deste trabalho foi o “Logical Theorist” (Teórico Lógico), um programa que tinha como objetivo realizar a prova de teoremas matemáticos (RUSSEL & NORVIG, 1995).

Na década de 60, o estudo da Inteligência Artificial sofreu um grande impulso, com uma variedade de programas sendo desenvolvidos em universidades americanas e européias. Neste período, os programas desenvolvidos eram aplicáveis a domínios restritos (chamados “Micro Worlds” – micro mundos”, dando-se ênfase ao processo de raciocínio utilizado na resolução de problemas em geral. O objetivo dos pesquisadores era, com o tempo, expandir estes domínios e dotar os computadores de uma capacidade de resolução de problemas semelhante à da mente humana (criando o “General Problem Solver” – Resolvedor Geral de Problemas). Era comum na época a idéia de que este processo de expansão dependia apenas de hardware mais rápido e maior capacidade de memória (RUSSEL & NORVIG, 1995).

Este otimismo inicial foi aos poucos dando lugar à frustração. Muitos problemas mostraram-se intratáveis e em domínios onde os humanos utilizam o bom senso para a resolução do problema, o êxito mostrou-se praticamente impossível (RUSSEL & NORVIG, 1995).

Apesar destes insucessos, alguns sistemas obtiveram êxito. Programas como o DENDRAL, o MYCIN e mais tarde o PROSPECTOR, geraram grandes expectativas e mostraram que determinados tipos de problemas poderiam ser resolvidos com sucesso (RUSSEL & NORVIG, 1995).

O que estes programas possuem em comum é o fato de utilizarem uma base de conhecimento para emularem o raciocínio utilizado por especialistas na

resolução do problema. Surgiram então os Sistemas Baseados em Conhecimento, mais especificamente os Sistemas Especialistas (SEs).

O sucesso dos sistemas especialistas causou uma mudança de abordagem na resolução de problemas em IA. De domínios gerais para domínios restritos, e de ênfase no processo de raciocínio para o conhecimento específico sobre o domínio.

Na década de 80, a IA e principalmente os S.E. tornam-se uma indústria bilionária. A partir do sucesso do R1, o primeiro S.E. de uso comercial, em 1982, um grande número de empresas americanas passou a investir em IA, dando um enfoque mais comercial às aplicações de S.E..

Atualmente, a área de S.E. é a que obteve maior sucesso comercial dentro da IA, e continua sendo uma das mais difundidas, apesar do crescimento de outras áreas como as Redes Neurais e os algoritmos genéticos. A tendência é que se passe a utilizar estas técnicas em conjunto, explorando as capacidades de cada uma, obtendo-se melhores resultados em campos ainda pouco explorados pela IA.

3.3 Conceituação de Sistemas Especialistas

Segundo Feigenbaum (1982), “Sistemas Especialistas são sistemas inteligentes que utilizam conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são difíceis o suficiente para requerer uma significativa experiência humana para sua solução”.

Ignizio (1991) define S.E. como sendo “um modelo e um procedimento associado que exhibe, dentro de um domínio específico, um grau de experiência na solução de problemas que é comparável à de um especialista humano”. O modelo é, por sua vez, a representação da base de conhecimento do especialista humano.

Para Liebowitz (1988), “SEs são programas de computador que emulam o comportamento de especialistas humanos dentro de um específico domínio de conhecimento”.

A partir destas definições conclui-se que S.E. são sistemas que emulam o processo de tomada de decisões de um especialista humano na resolução de um problema em um domínio bem definido.

Neste processo de tomada de decisões, o tipo do conhecimento que um especialista utiliza é do tipo heurístico, que segundo Durkin (1994) é o tipo de conhecimento baseado na experiência adquirida por um especialista que permite esta pessoa chegar rapidamente à solução de um problema sem que obrigatoriamente tenha que fazer uma análise detalhada do mesmo. Rich & Knight (1992) afirmam que a heurística é uma técnica que melhora a eficiência de um processo de busca. A emulação desta heurística no sistema é feita através da utilização de técnicas de engenharia de conhecimento apresentadas a diante.

Embora a utilização da heurística do especialista humano apresente um motivo importante para o desenvolvimento de S.E., existem outras características que tornam a utilização desta técnica uma boa opção na solução de problemas (IGNIZIO, 1991; LIEBOWITZ, 1988; WEISS & KULIKOWISKI, 1984):

- Podem ser utilizados para apoiar e verificar a opinião de um especialista humano;
- Auxiliam em situações onde o especialista não está disponível;
- Formalizam o conhecimento do especialista, e promovem a disseminação deste conhecimento;
- Pode integrar o conhecimento proveniente de várias fontes, conferindo mais segurança para a tomada de decisão;
- Fornecem explicações detalhadas de como a solução apresentada foi encontrada, o que torna-se difícil em alguns casos para o especialista humano.

Apesar destas vantagens, existem algumas limitações no uso desta técnica:

- A tarefa de aquisição de conhecimento é uma tarefa difícil, que em alguns casos impossibilita o desenvolvimento do sistema;
- Os S.E. não modelam facilmente criatividade, o que é amplamente usado por especialistas humano quando deparados com situações inusitadas;
- Os S.E. não aprendem com a experiência (ainda não existe um mecanismo amplamente utilizado para este fim, embora existam pesquisas nesta direção).

A seguir são apresentados os princípios de funcionamento de S.E., onde serão explorados conceitos importantes para o entendimento de como um S.E. chega às suas conclusões.

3.4 Princípios de funcionamento de S.E.

De acordo com os resultados obtidos por Newell e Simon (GIARRATANO & RILEY, 1994) em suas pesquisas sobre cognição, a forma dos seres humanos resolverem a maioria dos seus problemas poderia ser expressa através de **regras de produção** do tipo SE *premissa* ENTÃO *conseqüente*. Estas regras representam o conhecimento adquirido através do tempo (experiência), e estão armazenadas na **memória de longo termo**. Além desta memória, os seres humanos utilizam ainda uma **memória de curto termo**, que armazena o conhecimento relacionado ao problema que está sendo resolvido no momento.

Resumidamente, uma regra é disparada (utilizada) quando **fatos** relativos ao problema estão presentes no antecedente (premissa) desta regra. Por exemplo, se existir a necessidade de variação de velocidade do atuador, a regra SE *existe necessidade de variação de velocidade* ENTÃO *usar bomba de deslocamento variável* é disparada, e a ação relativa ao seu conseqüente é

realizada. O processo de disparo das regras é feito através do **processador cognitivo**, que faz a correspondência entre as regras armazenadas na memória e os fatos apresentados pelo problema.

Os S.E. utilizam este modelo de resolução de problemas dos humanos como base para seu funcionamento. A estrutura básica de um S.E. é apresentada na figura 3.10. A **base de conhecimento** representa a memória de longo termo, a **memória de trabalho** representa a memória de curto termo, e o **motor de inferência** representa o processador cognitivo.

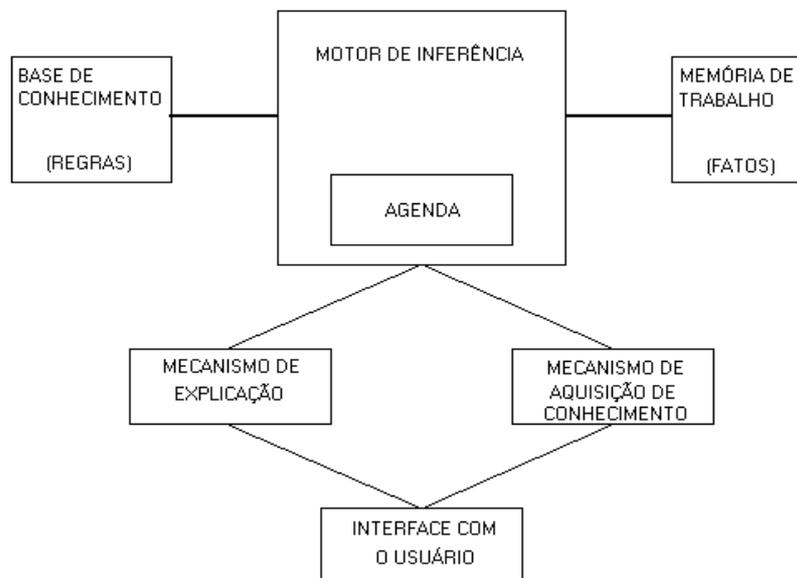


Figura 3.1 – Estrutura de um Sistema Especialista (GIARRATANO & RILEY, 1994)

O **mecanismo de explicação** apresenta ao usuário o raciocínio utilizado pelo sistema para chegar à conclusão apresentada. O **mecanismo de aquisição de conhecimento** é uma ferramenta opcional, com o qual o usuário dispõe de uma forma automática de inserção de novos conhecimentos na base sem a necessidade de intervenção do engenheiro de conhecimento. A **agenda** é uma lista priorizada de regras criada pelo motor de inferência, cujos antecedentes são satisfeitos por fatos na memória de trabalho. A **interface com o usuário** é o mecanismo responsável pela comunicação entre o usuário e o sistema.

Como visto anteriormente, em um sistema baseado em conhecimento, o controle de disparo das regras, isto é, a inferência, é feito pelo motor de inferência. Existem basicamente dois métodos de inferência, o **encadeamento para frente** (forward-chaining) e o **encadeamento para trás** (backward-chaining).

Um **encadeamento** é um grupo de múltiplas inferências que conectam um problema à sua solução (GIARRATANO & RILEY, 1995). No encadeamento para frente, a inferência é feita a partir dos fatos, gerando as respectivas conclusões de acordo com as regras. O sistema espera a entrada de fatos, e então procura todas as regras cujas premissas são satisfeitas pelos fatos, colocando-as na agenda. Já no encadeamento para trás, parte-se de uma hipótese (uma conclusão a ser provada) e buscam-se os fatos que geram esta conclusão. Enquanto no encadeamento para frente o sistema espera a entrada de novos fatos para colocar uma regra na agenda, no encadeamento para trás o sistema “procura” os fatos que podem provar uma regra.

A escolha do método de inferência depende do problema a ser resolvido. O encadeamento para frente é mais apropriado para problemas de prognóstico, monitoramento, controle, projeto e seleção, enquanto problemas de diagnóstico são resolvidos de forma mais eficiente utilizando-se o encadeamento para trás.

Para o desenvolvimento do sistema apresentado neste trabalho, será utilizado o encadeamento para frente, pois este método é o mais apropriado para o tipo de problema (seleção) a ser abordado.

A máquina de inferência opera através de **ciclos de execução**. Esta execução é realizada até que alguma operação cause o fim da execução. Um

exemplo de um ciclo de execução é apresentado a seguir em pseudo-código (GIARRATANO & RILEY, 1994).

Enquanto não termina

Resolver conflitos: se existem regras ativadas (regras em que os fatos da premissa estão presentes), então escolhe a regra de maior prioridade para executar.

Executar: executa a conclusão da regra escolhida (esta execução pode ter efeito dentro do ciclo atual). Remove esta ativação da agenda.

Ativar (Match): atualizar a agenda, checando se os fatos presentes na memória de trabalho estão presentes nas premissas de algumas(s) regra(s), ativando-as em caso verdadeiro. Se para alguma ativação já presente na agenda a premissa não é mais satisfeita, retirar esta ativação da agenda.

Checar se termina: se alguma ação de fim de programa é realizada, termina a execução.

Fim do enquanto

Enquanto uma boa estratégia de inferência é de grande importância para o resultado obtido pelo sistema, este resultado depende também em grande parte da qualidade da base de conhecimento. Para que isto seja alcançado, um bom trabalho de engenharia de conhecimento deve ser realizado. A seguir, a tarefa de engenharia de conhecimento será apresentada, através de definições, objetivos e técnicas utilizadas para sua realização.

3.5 Engenharia de conhecimento

A engenharia de conhecimento consiste na atividade de adquirir conhecimento de um especialista e codificá-lo na forma computacional mais adequada. Segundo Liebowitz (1988), engenharia de conhecimento é o “processo de construção, teste e avaliação de um sistema especialista”. Este processo é realizado pelo engenheiro de conhecimento.

As etapas envolvidas na atividade de engenharia de conhecimento são:

- Identificação do problema
- Aquisição de conhecimento
- Representação do conhecimento
- Implementação
- Verificação e testes

O desenvolvimento de S.E. é um processo iterativo e evolucionário. As etapas de aquisição de conhecimento, representação do conhecimento, implementação, validação e testes são realizados de forma iterativa durante o desenvolvimento. A base de conhecimento deve ser refinada, aumentando-se o conhecimento e filtrando-se imperfeições e erros (LIEBOWITZ, 1988).

A abordagem mais utilizada para se realizar o desenvolvimento iterativo de S.E. é a prototipagem, que consiste em modelar um subconjunto da tarefa onde todas as etapas iterativas são realizadas, fechando-se um ciclo de desenvolvimento. A cada ciclo, um novo subconjunto é modelado e implementado, promovendo a evolução do sistema em forma de protótipos. A avaliação e os testes em cada ciclo são muito importantes, pois assim pode-se descobrir ineficiências na representação do conhecimento ou no mecanismo de inferência, além de fornecer ao engenheiro de conhecimento um *feedback* sobre a qualidade do conhecimento adquirido durante a fase de aquisição de conhecimento. Utilizando-se esta abordagem, pode-se dizer que o desenvolvimento do S.E. não tem final definido, pois o sistema pode ser sempre incrementado.

A seguir, cada etapa da engenharia de conhecimento é apresentada em detalhes.

3.5.1 Identificação do problema

A primeira etapa a ser confrontada no desenvolvimento de um S.E. é a identificação do problema. Esta etapa é uma atividade de análise que tem como objetivo determinar se o problema abordado pode ser resolvido utilizando-se a técnica de sistemas especialistas e se a utilização desta técnica apresenta alguma vantagem sobre a forma como o problema é resolvido no momento.

Algumas características de uma tarefa tornam a aplicação de S.E. aconselhada (LIEBOWITZ, 1988):

- A tarefa deve ser bem delimitada para evitar explosão combinatorial.
- Envolve principalmente processamento simbólico (processamento de símbolos e listas), em contraste com processamento numérico.
- O problema leva de algumas horas a algumas semanas para resolver.
- A tarefa é realizada com freqüência, e não raramente.
- Existe uma diferença significativa entre uma boa e uma má realização da tarefa. Dados de teste estão disponíveis com facilidade.
- Existe um consenso geral sobre o resultado da tarefa.
- O especialista está disposto a participar no desenvolvimento do S.E. e dispõe o tempo necessário para o desenvolvimento do sistema.
- O especialista é articulado e pode ser entendido pelo engenheiro de conhecimento.

A partir da análise positiva destas características, pode-se optar pelo desenvolvimento de um S.E. na resolução do problema, e a próxima tarefa a ser realizada é a aquisição de conhecimento.

3.5.2 Aquisição de conhecimento

A aquisição de conhecimento é definida pela maioria dos autores como sendo o “gargalo” no desenvolvimento de SE. Nesta tarefa, geralmente o engenheiro de conhecimento entrevista um especialista no domínio da aplicação para elucidar o conhecimento especialista, que é então traduzido para regras (RICH & KNIGHT, 1993).

O processo usual utilizado para extrair o conhecimento do especialista é a realização de entrevistas, onde ocorre a interação entre engenheiro de conhecimento e especialista. A dificuldade inerente a esta tarefa está relacionada com a dificuldade que um especialista em qualquer domínio encontra em escrever de forma clara e detalhada os passos realizados durante a realização da tarefa. Segundo Hart (1992), a incapacidade de explicar a atividade de resolução de problemas em alto nível sem ambigüidade é uma característica comum de especialistas. Isto está relacionado com a forma como o conhecimento está registrado na memória. Segundo Dreyfus & Dreyfus (1986), na maioria dos casos um verdadeiro especialista resolve os problemas intuitivamente, sem utilizar regras ou estratégias. Mesmo que as regras existam, elas estão compiladas de forma inconsciente pelo especialista.

Para contornar esta dificuldade, são utilizadas técnicas de questionamento que facilitam a codificação do conhecimento do especialista para um modelo formal. Existem formas de se conduzir uma entrevista, utilizando técnicas de questionamento que são apropriadas para situações distintas. As entrevistas podem ser focadas, onde um tópico específico é abordado, ou não focadas, onde são abordados assuntos gerais sobre o problema. As questões feitas pelo engenheiro de conhecimento também podem ser de dois tipos: abertas ou fechadas. Nas abertas, o especialista e o engenheiro de conhecimento discutem sobre algum assunto relativo ao problema, sem que pontos específicos sejam abordados formalmente. Já nas fechadas, o especialista responde de forma objetiva as questões feitas pelo engenheiro de conhecimento.

Algumas técnicas têm como objetivo fazer com que o especialista descreva o seu método de resolução do problema de forma direta. A seguir são apresentadas algumas destas técnicas (Hart, 1992):

- Resolução de problemas exemplo: através da resolução de problemas exemplos com o acompanhamento do engenheiro de conhecimento, o especialista tem maior facilidade em explicar o que ele está fazendo.
- Características e decisões: O especialista fornece uma lista com algumas características e possíveis decisões, e depois faz a associação entre elas.
- Distinção entre decisões: o especialista diferencia as possíveis soluções (decisões), listando as evidências que são necessárias e suficientes para distinguir uma da outra.
- Reclassificação: O especialista trabalha “ao contrário” em casos já resolvidos, ou seja, parte da decisão para as características.
- Dividir o domínio: Semelhante à reclassificação , porém o especialista começa das características, agrupando-as, até chegar à decisão.
- Falar durante o trabalho: O especialista pensa alto enquanto trabalha, com o acompanhamento do engenheiro de conhecimento.
- Imposição de limitações: O engenheiro de conhecimento limita as informações disponíveis sobre o problema durante a resolução de um caso, de forma a forçar pedir mais informações, relatando desta forma quais informações são utilizadas durante a resolução do problema.

Embora o engenheiro de conhecimento não precise ter amplo conhecimento sobre o domínio a ser abordado, é importante que ele tenha uma certa familiaridade com conceitos básicos e com os termos típicos da área, pois a falta disto pode dificultar a comunicação entre engenheiro de conhecimento e especialista, além de frustrar o especialista, que se sente na obrigação de ensinar coisas óbvias ao engenheiro de conhecimento.

O especialista não é a única fonte de conhecimento, e em alguns casos não é a principal. Livros, manuais, catálogos e outros materiais podem ser utilizados como fonte em conjunto com a interação com um especialista.

Para que o conhecimento adquirido seja registrado, utilizam-se técnicas de representação de conhecimento, que serão apresentadas a seguir.

3.5.3 Representação do conhecimento

O conhecimento adquirido na fase de aquisição de conhecimento precisa ser representado de alguma forma para poder ser utilizado na implementação do S.E.. Existem várias formas de se representar este conhecimento, que podem ser utilizados para a implementação do sistema ou como uma ferramenta de apoio à fase de aquisição de conhecimento. As principais técnicas de representação de conhecimento são:

Regras de produção

A técnica de representação do conhecimento por regras de produção é a mais utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas, e é utilizada desde os primeiros sistemas baseados em conhecimento desenvolvidos. Entre os motivos por esta popularidade, pode-se destacar (IGNIZIO, 1991):

- Regras representam um modo intuitivo de representação de conhecimento, portanto, o tempo necessário para se aprender a desenvolver bases de regras é mínimo.
- Regras são mais transparentes do que outras técnicas de representação de conhecimento, como por exemplo, *frames*.
- Bases de regras podem ser facilmente modificadas.
- A validação do conteúdo de uma base de regras é um processo relativamente simples comparado com outras técnicas.

As regras de produção são afirmações do tipo:

SE <antecedente> *ENTÃO* <conseqüente>

Onde o antecedente é a parte da regra onde é feito um teste para verificar se as premissas da regra são verdadeiras. Se estas premissas forem verdadeiras, o conseqüente da regra é executado, gerando a conclusão da regra.

O antecedente é formado por fatos que estão presentes na base de fatos, enquanto o conseqüente pode simplesmente executar uma ação, apresentar uma mensagem, como inserir um novo fato na base de fatos. Estes fatos podem ser atributos de um objeto, quando utilizam-se regras em conjunto com *frames*.

Por exemplo, para a seguinte base de conhecimento:

Fatos:	Regras:
"pressão de trabalho = 50 bar"	SE "necessidade variação de velocidade"
"vazão de trabalho = 70 lpm"	ENTÃO "deslocamento variável"
"necessidade de variação de velocidade"	
-> "deslocamento variável"	SE "10 ≤ pressão de trabalho ≤ 175 bar"
	E "4 ≤ vazão de trabalho ≤ 156 lpm"
	E "deslocamento fixo"
	ENTÃO "pode usar bomba de engrenagens"
	SE "10 ≤ pressão de trabalho ≤ 100 bar"
	E "20 < vazão de trabalho ≤ 285 lpm"
	E "deslocamento variável"
	ENTÃO "pode usar bomba de palhetas de deslocamento variável"

A primeira regra é disparada, inserindo o fato "deslocamento variável" na base de conhecimento, pois a premissa (o fato) do seu antecedente está na base de conhecimento. Com isto, a terceira regra também é disparada, pois tem todos seus antecedentes satisfeitos (antes do disparo da primeira regra o terceiro antecedente não era satisfeito). Na segunda regra, embora os dois primeiros antecedentes sejam satisfeitos, a falta de um fato faz com que a regra não seja disparada. Para maiores detalhes sobre o disparo de regras, veja o item 2.2.4 deste trabalho.

Modelagem orientada a objetos

Ao resolver um problema, interage-se com vários objetos (reais ou abstratos), e para cada um deles têm-se atributos e valores a eles associados. Esta representação, altamente intuitiva, é reproduzida no computador através da utilização de modelagem orientada a objetos.

Segundo Ignizio (1991), a utilização de objetos representa uma forma robusta de representação de conhecimento. Além de armazenar valores para cada atributo, os slots podem conter valores padrão, atributos/valores para conectar a outros objetos, conjuntos de regras ou procedimentos que podem ser executados.

Os objetos são definidos por suas classes. Na classe estão descritos os atributos que os objetos desta classe possuem e o seu comportamento, através dos métodos (funções que implementam as ações que o objeto pode realizar). Desta maneira, um objeto é definido como uma instância da classe que o representa. Uma classe possui a seguinte estrutura básica:

Classe: tipo de entidade representada

Atributos 1..n: características da entidade, de um determinado tipo (texto, número, etc)

Métodos 1..m: procedimentos que podem ser executados por esta entidade – descrevem o seu comportamento em relação aos outros objetos

Por exemplo, um sistema hidráulico poderia ser representado da seguinte maneira:

Classe: Sistema Hidráulico

Atributos

Nome: Sistema Hidráulico 1

Pressão de trabalho: 100 bar

Vazão de trabalho: 700 lpm

Ciclo: Contínuo

Lista de componentes

...

Métodos:

Dimensionar Motor

...

Embora criados como uma técnica de representação de conhecimento para sistemas baseados em conhecimento, a orientação a objetos passou a ser bastante utilizada em praticamente todos os tipos de sistema, através do paradigma de programação orientada a objetos.

A ampliação de orientação a objetos em S.E. torna-se bastante útil, senão essencial, no projeto de S.E. complexos e de larga escala, particularmente nos que envolvem grande quantidade de dados e vários objetos (IGNIZIO, 1991).

Triplas OAV

Uma forma de representação de conhecimento simples, utilizada principalmente como apoio na fase de aquisição de conhecimento, as triplas Objeto-Atributo-Valor podem ser consideradas um subconjunto dos objetos. Diferentemente destes, as triplas OAV não são estruturas que representam diretamente uma entidade, mas um atributo, com seu respectivo valor e o objeto a qual está associado.

Ex: Sistema Hidráulico 1 – pressão trabalho – 100 bar

A simplicidade em relação a objetos torna esta técnica de representação útil principalmente para a fase de aquisição de conhecimento. Geralmente utiliza-se uma tabela, que pode ser chamada de tabela OAV, onde várias entidades da mesma classe são representadas com seus respectivos valores. Por exemplo:

Nome	Pressão	Vazão
Sistema Hidráulico 1	100 bar	50 lpm

Sistema Hidráulico 2	150 bar	120 lpm
----------------------	---------	---------

Figura 3.2 – Exemplo de triplas OAV.

3.5.4 Implementação de Sistemas Especialistas

Um S.E. pode ser implementado de duas maneiras: utilizando-se uma linguagem de programação (C, Pascal, LISP, PROLOG) ou utilizando-se um ambiente Shell (ferramenta desenvolvida especialmente para a implementação de S.E.).

Utilizando-se uma linguagem de programação, possui-se total controle sobre a implementação, devido à flexibilidade de uso deste tipo de ferramenta. A desvantagem é ter que se implementar todas as partes do sistema. Por outro lado, a utilização de um ambiente Shell fornece a máquina de inferência e os modelos de representação de conhecimento já prontos, deixando para o usuário apenas o preenchimento da base de conhecimento e uma eventual interface. Isto torna a implementação mais rápida, mais barata e mais simplificada, podendo ser realizada por pessoas com pouca experiência em programação. A desvantagem é a falta de controle sobre alguns pontos, principalmente na máquina de inferência, que pode resultar da falta de flexibilidade deste tipo de ferramenta.

Os sistemas especialistas geralmente realizam tarefas importantes, que em alguns casos podem representar algum risco, como por exemplo o diagnóstico médico ou a operação de alguma máquina que necessita de segurança. Por este motivo, é importante que estes sistemas tenham sua qualidade assegurada, o que envolve, entre outras coisas, a confiabilidade no seu funcionamento.

Para que um sistema especialista tenha a sua qualidade assegurada, é importante que durante o seu desenvolvimento ocupe-se parte do tempo e dos recursos com a sua validação e verificação. Com isto, pode-se oferecer um sistema que atenda a algumas especificações de funcionalidade, confiabilidade, usabilidade, eficiência, manutenibilidade e portabilidade.

Alguns erros podem ocorrer durante o desenvolvimento de um S.E., que podem ser de diferentes naturezas. Os principais erros são dos seguintes tipos:

1. Erros de semântica: o significado de uma regra implementada (ou de qualquer outra estrutura) não reflete de forma fiel o que ela deveria representar segundo o especialista. Ocorre quando o engenheiro de conhecimento interpreta erroneamente uma explicação do especialista, quando o especialista interpreta erroneamente uma pergunta do engenheiro de conhecimento ou ambos.
2. Erros de sintaxe: erros de escrita na linguagem utilizada. Estes erros são geralmente apontados pelo ambiente de programação escolhido. Estes erros geralmente não permitem que o sistema funcione, sendo corrigidos antes que o sistema possa funcionar.
3. Erros do ambiente computacional: erros de interface, de configuração do ambiente de programação, compatibilidade, sistema operacional, etc.
4. Erros de especificação: o sistema não atende as especificações técnicas e funcionais que foram propostas antes do seu desenvolvimento. Estes erros podem fazer com que o sistema resolva o problema parcialmente apenas, ou mesmo tornar o sistema inútil.
5. Erros de representação do conhecimento: Estes erros são semelhantes aos erros de semântica, porém compreendem não apenas regras isoladas, mas a base de conhecimento como um todo. Implicam em saídas incorretas e falhas na execução do sistema. Ocorrem quando uma técnica de representação de conhecimento inadequada é empregada, quando o engenheiro de conhecimento entende de forma incorreta alguns pontos do domínio, entre outros motivos.

A verificação compreende a correção e prevenção dos erros de semântica, sintaxe, técnicos e de especificação técnica. É realizada desde o início do desenvolvimento do sistema de forma iterativa, através de testes de execução e de eficiência (verificação dos resultados apresentados).

Na validação, além de se abordar os erros de especificação funcional e de representação de conhecimento, abordam-se algumas métricas de avaliação que correspondem aos objetivos do sistema que devem ser cumpridos. As fases na validação de um S.E. são as seguintes (IGNIZIO, 1991):

1. Justificativa do emprego do sistema especialista: Realizada nas etapas iniciais do projeto do sistema, visa assegurar que o sistema desenvolvido é útil e foi desenvolvido utilizando-se uma técnica adequada.
2. Verificação da base de conhecimento: Faz-se uma checagem da base de conhecimento procurando identificar inconsistências na base.
3. Validação do desempenho geral do S.E.: Definem-se métricas que serão utilizadas para medir o desempenho do sistema.

No capítulo 5 apresenta-se como a etapa de verificação e validação foi realizada no desenvolvimento do protótipo.

3. 6 Sistemas Especialistas no Projeto

A atividade de projeto pode ser considerada uma das mais importantes dentro da engenharia. As decisões tomadas durante o projeto afetam profundamente todos os estágios seguintes no ciclo de vida do produto, como a funcionalidade, qualidade, custo, manutenção, vida útil, etc.

Algumas das principais decisões tomadas durante o projeto de um produto são tomadas durante o processo criativo do projeto, onde novas idéias ou soluções são sintetizadas na ausência de exemplos anteriores (SUH, 1990). Este processo criativo depende fortemente do conhecimento acumulado pelo projetista.

Esta característica do processo criativo torna a técnica de S.E. uma ferramenta valiosa para esta tarefa, como informa Suh (1990), afirmando que “vários S.E. e outros programas baseados em IA têm sido desenvolvidos de acordo com regras *ad hoc* de projeto”.

Outra característica que torna valiosa a utilização de S.E. no projeto é a dificuldade de transmissão do conhecimento adquirido pelo projetista para novas gerações. Segundo Suh (1990), quando *know how* e conhecimento não são codificados, cada geração precisa obter experiência novamente, desenvolvendo sua própria intuição. Isto faz com que o conhecimento obtido por uma geração não seja devidamente aproveitado por gerações seguintes. Uma das características de S.E. é justamente a capacidade de tornar disponível o conhecimento de um especialista para novatos na área.

Além do que foi apresentado acima, a utilização de S.E. no projeto ainda apresenta as seguintes vantagens (KLEIN apud SILVA 1998):

- Raciocínios de projeto explicitamente representados podem ajudar cada projetista a clarificar suas próprias idéias sobre o projeto;
- Segurança de que todos os assuntos e requisitos relevantes foram abordados;
- Detecção de falhas no raciocínio do especialista;
- Rastreamento das conseqüências de mudanças nos requisitos e decisões de projeto.

No capítulo seguinte será descrito como o protótipo foi desenvolvido, apresentando as etapas envolvidas nesta tarefa, dando especial enfoque à aquisição de conhecimento. Descreve-se também o conhecimento utilizado para a implementação do protótipo, o seu funcionamento e como o protótipo foi verificado e validado pelo especialista.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de desenvolvimento do protótipo, onde são aplicados conceitos relativos aos domínios de conhecimento apresentados nos capítulos anteriores, sistemas hidráulicos e sistemas especialistas.

O objetivo deste capítulo é documentar o processo de desenvolvimento do sistema, demonstrando como cada etapa foi realizada, além de apresentar os resultados obtidos pela sua realização. Assim, este capítulo contém orientações para o desenvolvimento de sistemas especialistas em futuros trabalhos que venham a utilizar o presente trabalho como fonte de pesquisa.

Primeiramente apresenta-se o projeto conceitual do sistema, apresentando a seguir como foram realizadas as etapas de aquisição e representação do conhecimento, e por último aspectos importantes sobre a implementação computacional do sistema.

4.2 Projeto conceitual

O projeto conceitual em sistemas especialistas tem como objetivo colher informações que justificam o desenvolvimento do S.E., tendo como apoio os seguintes pontos (ALVES 2001):

- sabe-se que decisões tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento de produtos causam um grande impacto no ciclo de vida destes.
- Sabe-se também que, apesar de S.E. apresentarem vantagens, conflitos podem surgir em torno de questões como propriedades e responsabilidade, o que em alguns casos pode inviabilizar o desenvolvimento do S.E. (BELOHLAV et al apud ALVES 2001).

A figura 4.1 apresenta as etapas do projeto conceitual, que serão descritas na seqüência do trabalho, começando com a fase de identificação do problema, seguida da definição do público alvo do sistema, a definição da ferramenta de desenvolvimento, do método de inferência a ser utilizado, e finalmente, do modelo de desenvolvimento utilizado para a realização deste trabalho.

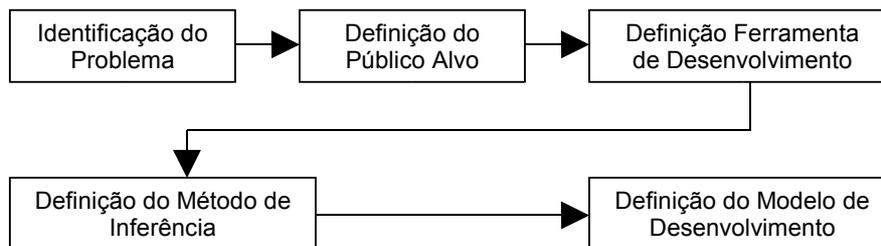


Figura 4.1 – Etapas do projeto conceitual (ALVES 2001).

4.2.1 Identificação do problema

A identificação do problema é uma tarefa de análise que tem como objetivo determinar se o problema abordado pode ser resolvido utilizando-se a técnica de sistemas especialistas e se a utilização desta técnica apresenta alguma vantagem sobre a forma como o problema é resolvido no momento.

Como pode-se ver no capítulo 3 item 3.5.1, existem várias características que determinam se um problema pode ser resolvido através do desenvolvimento de um sistema especialista. A análise destas características para o problema de seleção da bomba para o sistema hidráulico é apresentada abaixo, as características são seguidas de sua explicação para a tarefa de seleção de bomba.

- A tarefa deve ser bem delimitada para evitar explosão combinatorial.
 - A tarefa a ser realizada é bem delimitada, pois possui um número limitado de entradas (características do sistema) e saídas (tipos de bomba).
- Envolve principalmente processamento simbólico (processamento de símbolos e listas), em contraste com processamento numérico.
 - A resolução do problema envolve basicamente apenas símbolos (características qualitativas), o processamento numérico é mínimo e simples (envolve a comparação de valores).
- O problema leva de algumas horas a algumas semanas para resolver.
 - O problema é solucionado em pouco tempo pelo projetista.
- A tarefa é realizada com freqüência, e não raramente.
- A tarefa é realizada sempre que um novo sistema hidráulico for projetado.
- Existe uma diferença significativa entre uma boa e uma má realização da tarefa.
 - Uma boa escolha da bomba traz muitos benefícios, como economia, maior vida útil do sistema, melhor desempenho, etc. Se a escolha não for bem sucedida, o sistema não realizará o seu objetivo de forma satisfatória.
- Dados de teste estão disponíveis com facilidade.

- Através de catálogos é possível se obter dados de sistemas já projetados para a realização de testes.

- Existe um consenso geral sobre o resultado da tarefa.
 - A solução não é completamente consensual, porém as diferenças entre as soluções são compensadas pela configuração dos outros componentes do sistema hidráulico. Por exemplo, um especialista pode optar por uma bomba de engrenagens em um sistema com alta contaminação do fluido, porém outro pode optar por uma bomba de palhetas utilizando-se um filtro que torna o nível de contaminação aceitável para este tipo de bomba.

- O especialista está disposto a participar no desenvolvimento do S.E. e dispõe do tempo necessário para o desenvolvimento do sistema.
 - Existe pelo menos um especialista disposto a colaborar no desenvolvimento do sistema.

- O especialista é articulado e pode ser entendido pelo engenheiro de conhecimento.
 - O especialista escolhido é claro nas suas respostas e interage de forma satisfatória, dentro das limitações impostas pela forma como está sendo feita esta interação.

Através desta análise verificou-se que o problema pode ser resolvido através do desenvolvimento de um sistema especialista. A partir disto, iniciam-se as demais fases do projeto conceitual do protótipo.

4.2.2 Definição do público alvo

A definição do público alvo é importante para o desenvolvimento de um sistema, pois é para ele que o sistema está sendo desenvolvido e, como afirma Liebowitz (1988), “é definitivamente esta classe de usuários que deve ficar satisfeita”. Durante as fases de definição e implementação do protótipo as necessidades do usuário devem ser levadas em consideração, pois desta forma evita-se a necessidade de grandes modificações durante as fases finais de desenvolvimento do sistema.

A seleção da bomba requer um certo grau de experiência por parte do engenheiro, além de conhecimento sobre os diversos tipos de bomba disponíveis. Estes requisitos nem sempre estão presentes, principalmente para jovens engenheiros e estudantes de engenharia. Em vista disto, consideram-se estes usuários como o público alvo para o desenvolvimento do protótipo.

Além do potencial em relação ao auxílio durante o projeto de sistemas hidráulicos, o sistema pode também assumir um papel de ferramenta de auxílio em atividades de treinamento de estudantes de engenharia, embora este não seja o seu papel principal.

4.2.3 Definição da ferramenta computacional

Para o presente trabalho foi escolhida a implementação através de uma *Shell*, devido principalmente à diminuição do tempo de trabalho necessário e pela facilidade de uso, o que permite ao engenheiro de conhecimento focar sua atenção nas etapas mais importantes do desenvolvimento de sistemas especialistas, a aquisição e representação de conhecimento.

A ferramenta escolhida para a implementação do sistema foi a *Shell* CLIPS versão 6.21 (C Language Integrated Production System), desenvolvido pela NASA/Lyndon B. Space Center, lançado pela primeira vez em 1986 (GIATARRANO & RILEY, 1994). Os principais motivos para esta escolha foram os seguintes:

- A ferramenta fornece as estruturas necessárias para a resolução do problema (encadeamento para frente, regras, objetos, fatos).
- Confiabilidade da ferramenta: a ferramenta foi desenvolvida por um centro de pesquisa de alto nível e é utilizada com resultados positivos desde que foi criada.
- O custo de aquisição da ferramenta é zero, pois é um freeware.
- O engenheiro de conhecimento já possuía experiência na utilização da ferramenta.

A principal desvantagem encontrada em relação à utilização desta ferramenta diz respeito à sua interface, que apresenta apenas textos como mecanismo de interação entre o usuário e o sistema. Porém, dentro do escopo deste trabalho esta desvantagem pôde ser contornada, sem comprometer o desempenho do protótipo (ver item 4.4).

4.2.4 Definição do método de inferência

Como descrito no capítulo 3, um sistema especialista pode ser desenvolvido utilizando encadeamento para frente ou encadeamento para trás. Cada um destes métodos de inferência possui suas aplicações, sendo a sua utilização determinada pelo tipo de problema a ser abordado.

O método utilizado para o desenvolvimento do sistema foi o encadeamento para frente, pois o problema de seleção utiliza dados disponíveis sobre o sistema para chegar a uma conclusão quanto ao tipo de bomba, ou seja, é um problema orientado por dados onde estes dados são o ponto de partida para a solução do problema (LIEBOWITZ 1988).

4.2.5 Definição do modelo de desenvolvimento

O sucesso do desenvolvimento de um sistema depende em grande parte da metodologia utilizada durante esta atividade. Segundo Keller (1987), “técnicas

de desenvolvimento estruturado de sistemas oferecem uma abordagem mais apropriada para o desenvolvimento de sistemas de IA”, em comparação a um desenvolvimento desestruturado.

A abordagem utilizada para o desenvolvimento do protótipo é a de ciclo de vida, apresentada por Giarratano & Riley (1994), que consiste em planejar as fases de desenvolvimento e manutenibilidade do sistema continuamente desde o projeto conceitual. Esta abordagem facilita o planejamento das etapas a serem realizadas posteriormente, além de diminuir os seus custos.

O ciclo de vida de um sistema compreende todas as etapas envolvidas desde o projeto conceitual até que o sistema deixe de ser utilizado. Dentre estas etapas, as relativas ao desenvolvimento do sistema até a sua entrega ao(s) usuário(s) devem ser abordadas utilizando-se algum modelo de desenvolvimento. O modelo escolhido para este trabalho foi o modelo incremental, que consiste em desenvolver o sistema através de incrementos da sua funcionalidade. A principal vantagem deste modelo é a facilidade em se testar, verificar e validar estes incrementos de funcionalidade imediatamente com o especialista.

O modelo incremental é iterativo, ou seja, as tarefas são repetidas em uma seqüência predefinida, cada iteração representando um incremento na funcionalidade do protótipo. Portanto, ao final de cada iteração o protótipo torna-se mais completo, até que em determinado momento pode-se considerar que o protótipo está adequado. Neste momento, o sistema está pronto para ser utilizado, e as etapas seguintes são referentes à manutenção do protótipo (o que implica uma possível volta às etapas de desenvolvimento).

As etapas relativas ao desenvolvimento do protótipo, seguindo o modelo incremental, são apresentadas na figura 4.2.

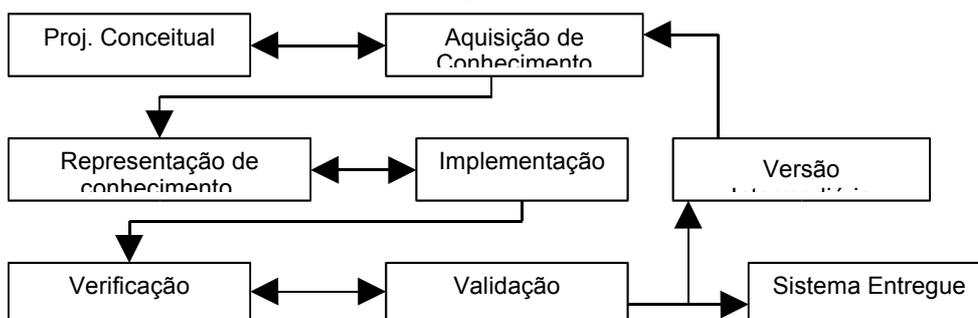


Figura 4.2 – Modelo incremental utilizado para o desenvolvimento do sistema (LIEBOWITZ 1988)

4.3 Aquisição e representação do conhecimento

Como já foi mencionado na seção sobre aquisição do conhecimento no capítulo 3, esta etapa é considerada pela maioria dos autores como sendo o gargalo no desenvolvimento de sistemas especialistas. Conjuntamente com a aquisição, a representação do conhecimento é de vital importância para o projeto, pois é nesta etapa que o conhecimento adquirido pode ser implementado computacionalmente. Em efeito, estas duas etapas ocorrem de forma intercalada, dependendo uma do sucesso da outra.

A seguir será feita uma descrição de como estas etapas foram desenvolvidas durante a realização do presente trabalho, apresentando as técnicas utilizadas e os resultados obtidos.

4.3.1 Técnicas de aquisição

4.3.1.1 Estudo preliminar

Segundo Liebowitz (1988), é vital que o engenheiro de conhecimento deva se tornar familiar com o domínio do problema e a tarefa específica antes de iniciar as sessões de aquisição de conhecimento com o especialista. Para este fim, o engenheiro de conhecimento deve fazer um estudo bibliográfico sobre o domínio, através da leitura de livros, manuais, artigos e outros documentos disponíveis, afim de tirar dúvidas básicas.

A importância desta etapa está na possibilidade de minimizar ou evitar problemas durante a interação com o especialista, como por exemplo o não conhecimento de termos técnicos ou a incompreensão de determinadas explicações.

No presente trabalho o estudo preliminar foi importante para que o engenheiro de conhecimento pudesse adquirir conhecimento básico sobre o domínio, uma vez que a sua formação acadêmica não o contemplava.

Além de fornecer conhecimento básico, esta etapa pode auxiliar o engenheiro de conhecimento a adquirir conhecimentos importantes sobre a tarefa específica, permitindo até que se desenvolva um protótipo inicial do sistema antes mesmo da primeira interação com o especialista.

4.3.1.2 Questionários

Uma das principais dificuldades encontradas no desenvolvimento de um sistema especialista está relacionada com a disponibilidade de um especialista no domínio. Muitas vezes este especialista não possui tempo para participar de entrevistas ou até mesmo está consideravelmente distante, o que impossibilita um contato direto entre engenheiro de conhecimento e especialista.

Nestes casos, a melhor maneira de se realizar a interação com o especialista é através do envio de questionários que abordem as dúvidas encontradas pelo engenheiro de conhecimento. Desta forma, o especialista possui maior liberdade de tempo para responder ao questionário e pode-se consultar especialistas localizados fora do alcance físico do engenheiro de conhecimento. Estas vantagens tornam os questionários uma das técnicas mais utilizadas para o desenvolvimento de sistemas especialistas. No presente trabalho, a dificuldade de se encontrar um especialista próximo fisicamente e com disponibilidade de tempo durante o início do desenvolvimento levou à escolha de um especialista localizado em outra cidade.

O objetivo do primeiro questionário foi identificar as saídas do sistema, ou seja, quais bombas podem ser indicadas pelo sistema. Estas bombas foram escolhidas pelo especialista de acordo com a sua utilização no projeto de sistemas hidráulicos. Desta forma, alguns tipos de bombas não foram incluídas no sistema devido à sua pouca utilização (pelo especialista).

A seguir tem-se um trecho do primeiro questionário encaminhado ao especialista com as suas respostas (em itálico):

1a) Quais são os tipos mais utilizados? Você acrescentaria/excluiria algum? Relacione cada tipo com a sua aplicação a sistemas hidráulicos.

- *Eu acrescentaria as bombas de parafuso que são usadas para grandes vazões, muito utilizadas em sistemas de resfriamento e também em equipamentos de flushing.*
- *Bombas de pistões axiais, para pressões >100bar, vazões < lpm e circuitos com acumuladores.*
- *Bombas de pistões axiais variável, para pressões >100bar, vazões 500lpm e unidades de potência com mais de duas bombas com ou sem circuitos de acumuladores.*
- *Bombas de pistões radiais para baixas vazões e elevadas pressões >200bar.*
- *Bombas de engrenagem interna, para sistemas isolados (um ou dois cilindros) com pressão até 150bar com circuito de acumuladores.*
- *Não tenho experiência de aplicação com bombas de engrenagens externas.*
- *Bombas de palhetas com vazão variável para pressões <100bar em circuitos múltiplos.*
- *Bombas de palhetas com vazão fixa para pressões <100 bar em circuitos múltiplos com ou sem acumuladores.*

1b) Baseado na sua experiência, quais os principais tipos que não poderiam ficar de fora?

Bombas de pistões axiais e de engrenagem.

2) Quais os principais parâmetros do sistema a serem analisados para a escolha do tipo de bomba?

- *Pressão;*
- *Vazão;*
- *Ciclo contínuo ou intermitente.*

Através deste primeiro questionário iniciou-se o desenvolvimento do sistema. Porém, devido a problemas em relação ao contato com o especialista, foi necessária a utilização de um especialista mais próximo, permitindo um maior grau de interação e comprometimento. Foram realizadas entrevistas e também apresentados questionários, que tiveram por objetivo aprofundar o conhecimento sobre domínio, iniciando com a identificação dos parâmetros do sistema hidráulico a serem analisados e em seguida fazendo a correspondência destes

parâmetros (entradas) com os tipos de bombas (saídas). Estes questionários são apresentados nos Anexos 1 e 2.

4.3.2 Representação do conhecimento

Como visto no capítulo 2, existem várias técnicas de representação de conhecimento que podem ser empregadas tanto durante a aquisição do conhecimento quanto durante a implementação do sistema. A escolha das técnicas mais apropriadas para determinada aplicação depende da análise das características do sistema a ser desenvolvido em comparação com as técnicas disponíveis.

4.3.2.1 Tabela OAV (Objeto-Atributo-Valor)

Durante a etapa de aquisição de conhecimento foram utilizadas as técnicas de tabelas OAV e de rede de inferência. Estas técnicas foram escolhidas por apresentarem uma representação mais visual das informações obtidas, facilitando o seu entendimento. Desta forma tornou-se mais fácil a validação do conhecimento obtido.

A tabela OAV foi criada antes do início da interação com o especialista, durante a fase de estudo preliminar, sendo modificada durante a evolução do projeto. Os dados contidos no início referiam-se principalmente às características técnicas dos tipos de bombas. Conforme o conhecimento foi adquirido, algumas características foram suplantadas e outras foram incluídas na tabela, até que ao final do trabalho a tabela continha apenas os dados básicos relevantes para seleção da bomba. Com isto percebe-se a importância da utilização desta técnica, pois ela permite um maior controle sobre o conhecimento adquirido, facilitando a sua recuperação, além de fornecer uma boa forma de documentação das informações. A figura 14 apresenta a tabela OAV criada a partir dos livros consultados (IVANTYSYN & IVANTYSYNOVA 2001, LINSINGEN 2001), do catálogo de bombas da Rexroth e de entrevistas com especialistas.

Bombas	Pressão Min	Pressão Max	Vazão Min	Vazão Max	Rendimento Max
Engrenagens	10	175	4	156	85%
Palhetas DF	10	100	20	285	87%
Palhetas DV	10	100	10	260	87%
Pistões Axiais DF	175	400	17	160	90%
Pistões Axiais DV	175	280	50	210	90%
Pistões Radiais DF	175	700	1	35	93%
Pistões Radiais DV	175	700	1	35	93%

Figura 4.3 Tabela OAV desenvolvida pelo engenheiro de conhecimento

4.3.2.2 Árvores de decisão

As árvores de decisão foram criadas durante a fase de interação com o especialista, de acordo com as respostas por ele fornecidas. Esta é uma das formas mais utilizadas para se representar o conhecimento referente ao processo de tomada de decisão adquirido do especialista. A facilidade de visualização que esta técnica oferece torna muito mais simples a geração das regras que serão codificadas no sistema, em oposição à geração das regras diretamente do texto do questionário.

A seguir serão apresentados exemplos das árvores de decisão desenhadas durante a etapa de aquisição de conhecimento. Na figura 4.4 apresenta-se a árvore de decisão relativa à escolha do deslocamento.

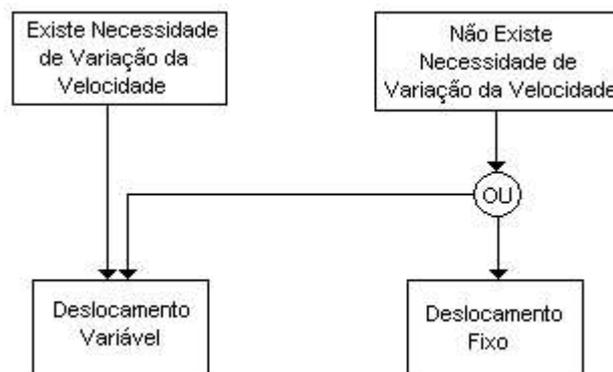


Figura 4.4 Rede de inferência para escolha do deslocamento

Nas figuras 4.5 e 4.6 são apresentadas algumas árvores de decisão relativas a determinação dos tipos de bombas que podem ser utilizadas no sistema hidráulico que está sendo projetado.

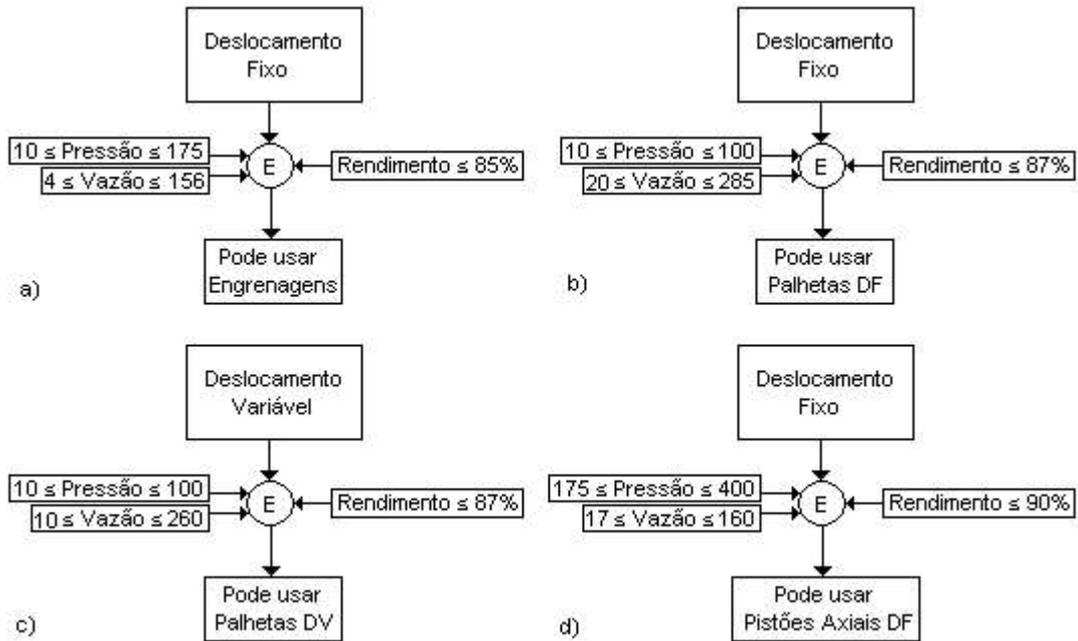


Figura 4.5 Determinação das bombas que podem ser utilizadas

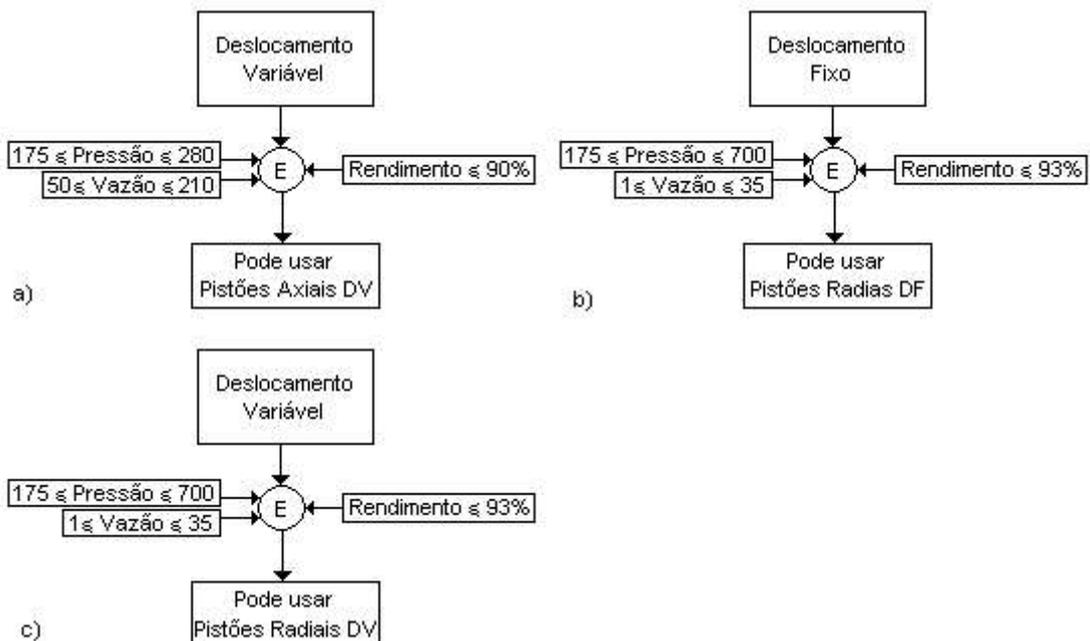


Figura 4.6 Determinação das bombas que podem ser utilizadas (cont).

Na figura 4.7 é apresentado um exemplo de uma árvore de decisão para determinação da bomba mais adequada dentre as que podem ser utilizadas:

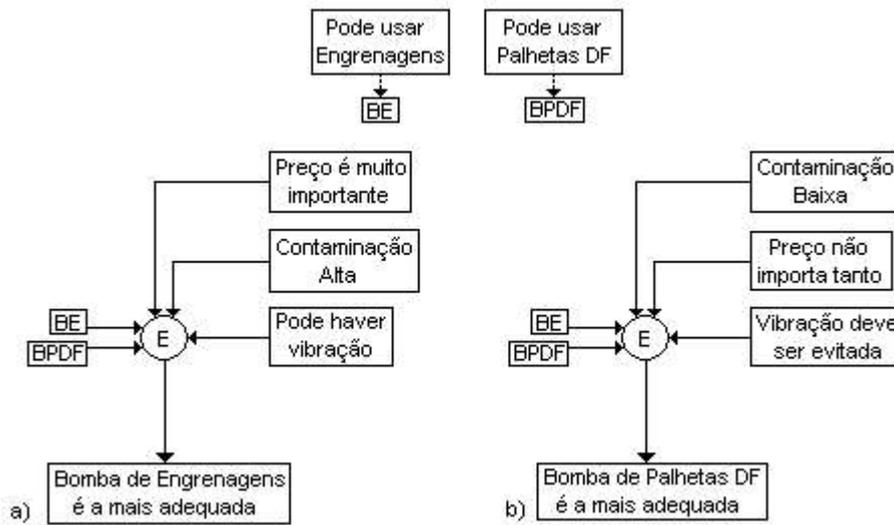


Figura 4.7 Exemplo da determinação da bomba mais adequada entre as bombas de engrenagens e de palhetas de deslocamento fixo.

4.3.2.3 Classes

Para representar os elementos envolvidos no projeto de um sistema hidráulico foi escolhida a modelagem orientada a objetos, devido às vantagens que esta representação apresenta no desenvolvimento de sistemas especialistas (ver cap 3) e apresentadas também em Silva (1998) e Alves (2001).

O protótipo conta com a estrutura de classes apresentada na figura 4.8:

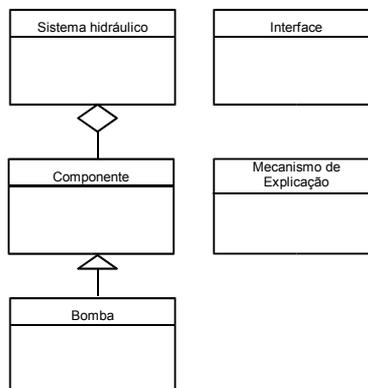


Figura 4.8 – Diagrama de classes do sistema

Classe Sistema Hidráulico – Define os parâmetros do sistema que está sendo projetado. Os seus atributos, obtidos através dos questionamentos feitos ao usuário, são os seguintes:

- Pressão de trabalho (bar)
- Vazão de trabalho (lpm)
- Taxa de vazão (Contínua/Intermitente)
- Contaminação do fluido utilizado ((μm)
- Rendimento (média/alta)

Classe Componente – Classe abstrata utilizada para a definição dos componentes de um sistema hidráulico.

- Descrição
- Tipo

Classe Bomba – Subclasse da classe componente, define os parâmetros das bombas que podem ser utilizadas pelo sistema.

- Descrição
- Tipo de bomba
- Deslocamento (fixo/variável)
- Pressão máxima (bar)
- Pressão mínima (bar)
- Vazão máxima (lpm)
- Vazão mínima (lpm)
- Contaminação aceitável do fluido (μm)
- Taxa de eficiência de trabalho (%)

Classe Explicação – Responsável pela elaboração e apresentação da explicação dada ao final da sessão. Equivale ao mecanismo de explicação referenciado em Giarratano & Riley (1994).

- Texto da explicação
- Imagem (nome do arquivo da figura apresentada no arquivo HTML)

Classe Interface – Responsável pelo controle das funções de interface criadas para o protótipo, como por exemplo as questões feitas ao usuário.

4.3.2.4 Regras

O conhecimento utilizado para a escolha do tipo de bomba foi representado através de regras. Além de representar o conhecimento do especialista, as regras também foram utilizadas para realizar outras funções, como aquisição de dados e interface. A seguir são apresentadas algumas regras codificadas no protótipo (escritas aqui em pseudocódigo). Elas foram escritas a partir das árvores de decisão apresentadas no item 4.3.2.2.

SE “existe necessidade de variação de velocidade”

ENTÃO “usar deslocamento variável”

(ver figura 4.4)

SE “usar deslocamento fixo”

E “ $10 \leq \text{pressão} \leq 175$ ” (bar)

E “ $4 \leq \text{vazão} \leq 156$ ” (lpm)

E “rendimento $\leq 85\%$ ”

ENTÃO “pode usar bomba de engrenagens”

(ver figura 4.5)

SE “usar deslocamento fixo”

E “ $10 \leq \text{pressão} \leq 100$ ” (bar)

E “ $20 \leq \text{vazão} \leq 285$ ” (lpm)

E “rendimento $\leq 87\%$ ”

ENTÃO “pode usar bomba de palhetas de deslocamento fixo”

(ver figura 4.5)

SE “pode usar bomba de Engrenagens”

E “pode usar bomba de Palhetas”

E “o preço é muito importante”

E “a contaminação é alta”

E “pode haver vibração no sistema”

ENTÃO “A bomba de engrenagens é a mais adequada”

(ver figura 4.7)

SE “pode usar bomba de Engrenagens”

E “pode usar bomba de Palhetas”

E “o preço não importa tanto”

E “a contaminação é baixa”

E “a vibração deve ser evitada”

ENTÃO “A bomba de palhetas de deslocamento fixo é a mais adequada”

(ver figura 4.7)

4.4 Implementação computacional

4.4.1 Interface do Sistema

Segundo Giarratano & Riley (1994), o funcionamento básico de um sistema especialista consiste no fornecimento de fatos ou outras informações para o sistema especialista e recebe “aconselhamento especializado” como resposta. Esta interação é realizada através da interface do sistema, e possui as seguintes funções básicas:

- Fazer perguntas ao usuário para a obtenção de informações relevantes (fatos).
- Apresentar conclusões parciais durante a sessão.
- Apresentar a conclusão final sobre o problema.

A ferramenta escolhida para a implementação do protótipo possui certa limitação em relação à interface, pois apresenta apenas a possibilidade de se apresentar textos ao usuário. Para as duas primeiras funções apresentadas acima, esta limitação não apresenta grandes problemas, pois esta interação pode ser feita de forma eficiente através de textos. Porém, a apresentação da conclusão final utilizando apenas textos representa uma grande limitação na funcionalidade do sistema. Para contornar este problema, foi utilizada a idéia apresentada por Silva (1998) de se gerar arquivos HTML como saída (esta solução será apresentada a seguir).

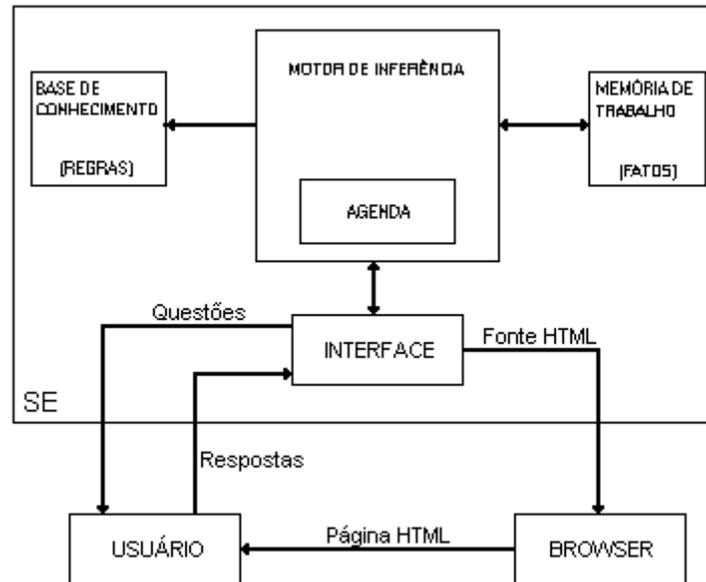


Figura 4.9 – Interação entre o usuário e o protótipo

4.4.2 Apresentação das saídas em HTML

Segundo Rich & Knight (1991), “para um sistema especialista ser uma ferramenta eficaz, as pessoas têm de ser capazes de interagir com ele facilmente”. Isto é importante principalmente na apresentação do resultado obtido e na sua aplicação, que é uma das principais características de sistemas especialistas. Uma interface que apresente informações limitadas pode deixar o usuário insatisfeito comprometendo a funcionalidade do sistema.

Para contornar a limitação apresentada pela ferramenta escolhida, que apresenta apenas uma interface textual, foi utilizada a idéia apresentada por Silva (1998) e utilizada também por Alves (2001), que consiste na geração de um arquivo de saída com informações textuais e gráficas utilizando o padrão HTML (*HyperText Markup Language*). A familiaridade das pessoas em relação a este tipo de arquivo (devido à sua utilização na publicação de páginas para a WEB) torna-o ideal para a apresentação dos resultados obtidos pelo sistema.

A geração do arquivo HTML é feita pelo protótipo através da criação de um arquivo fonte utilizando a linguagem HTML, que é então visualizado através de um browser. Um exemplo de arquivo de saída gerado pelo protótipo é apresentado na figura 4.10.

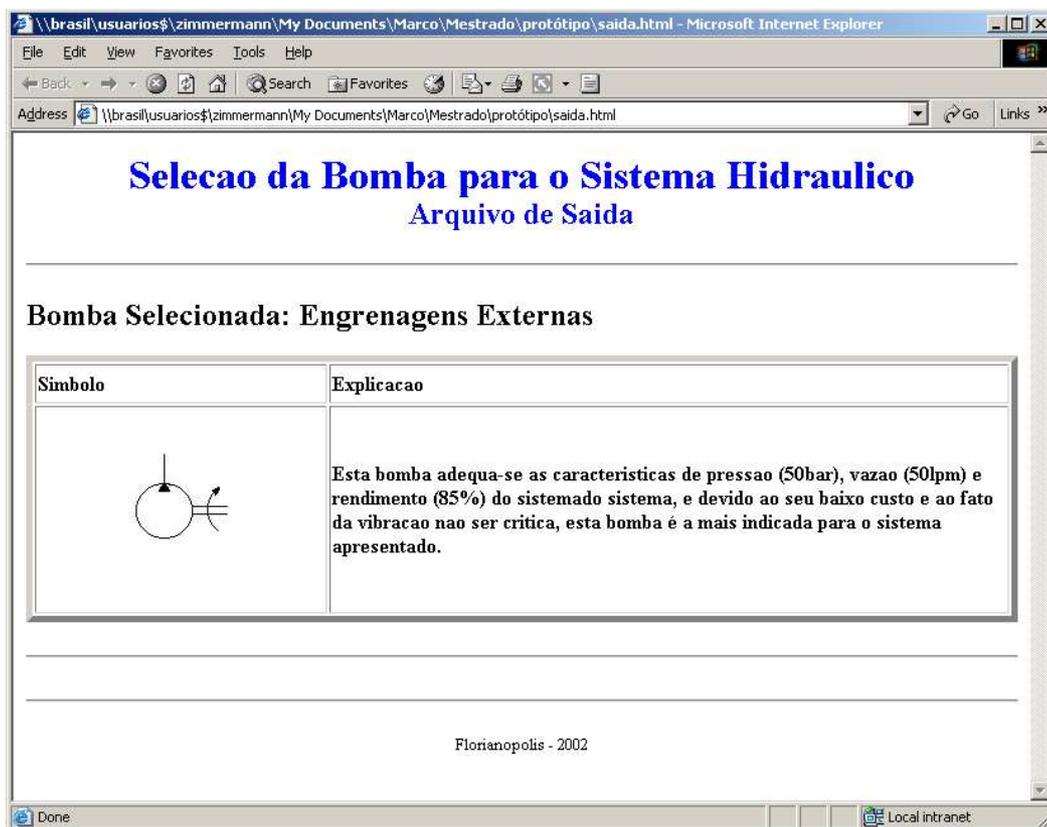


Figura 4.10 – Exemplo de arquivo HTML gerado pelo protótipo.

As informações apresentadas neste arquivo são as seguintes:

- Parâmetros do sistema que está sendo projetado.
- O tipo de bomba escolhido, com uma explicação de como se chegou à conclusão de que este tipo é escolhido para o sistema apresentado.
- Um gráfico mostrando o símbolo do tipo de bomba escolhido.

- Links para páginas que fornecem explicações extras sobre conceitos envolvidos no domínio do problema.

A seguir será apresentado o funcionamento do sistema, mostrando em detalhes as informações apresentadas pela interface.

4.4.2 Funcionamento do protótipo

A seguir apresenta-se o raciocínio envolvido no processo de tomada de decisão utilizado pelo protótipo para chegar ao resultado final. Um exemplo de uma sessão de consulta pode ser visto no anexo 5.

O protótipo possui três etapas de funcionamento:

1. Na primeira fase, através de questões apresentadas ao usuário, o protótipo obtém informações sobre a necessidade de variação de velocidade (para definir o tipo de deslocamento), a pressão e a vazão de operação do sistema. As perguntas feitas são as seguintes:

Existe a necessidade de variação de velocidade (s/n)?

R:

Qual a pressão de operação do sistema? (em bar)

R:

Qual a vazão de operação do sistema? (em lpm)

R:

Utilizando as informações obtidas através destas questões, o sistema determina quais bombas podem ser utilizadas no sistema de acordo com estes parâmetros.

2. Através da determinação de quais bombas podem ser utilizadas no sistema, o protótipo apresenta novas questões ao usuário, com o objetivo de determinar, entre as bombas que podem ser utilizadas, qual a mais adequada. As questões apresentadas dependem de quais bombas

podem ser utilizadas, pois o protótipo apresenta questões diferenciadas para cada situação. A figura 4.11 apresenta a relação entre pressão, vazão e as bombas de deslocamento fixo que podem ser utilizadas. Através da análise deste gráfico, determinam-se as situações possíveis de utilização de diferentes bombas para o mesmo caso.

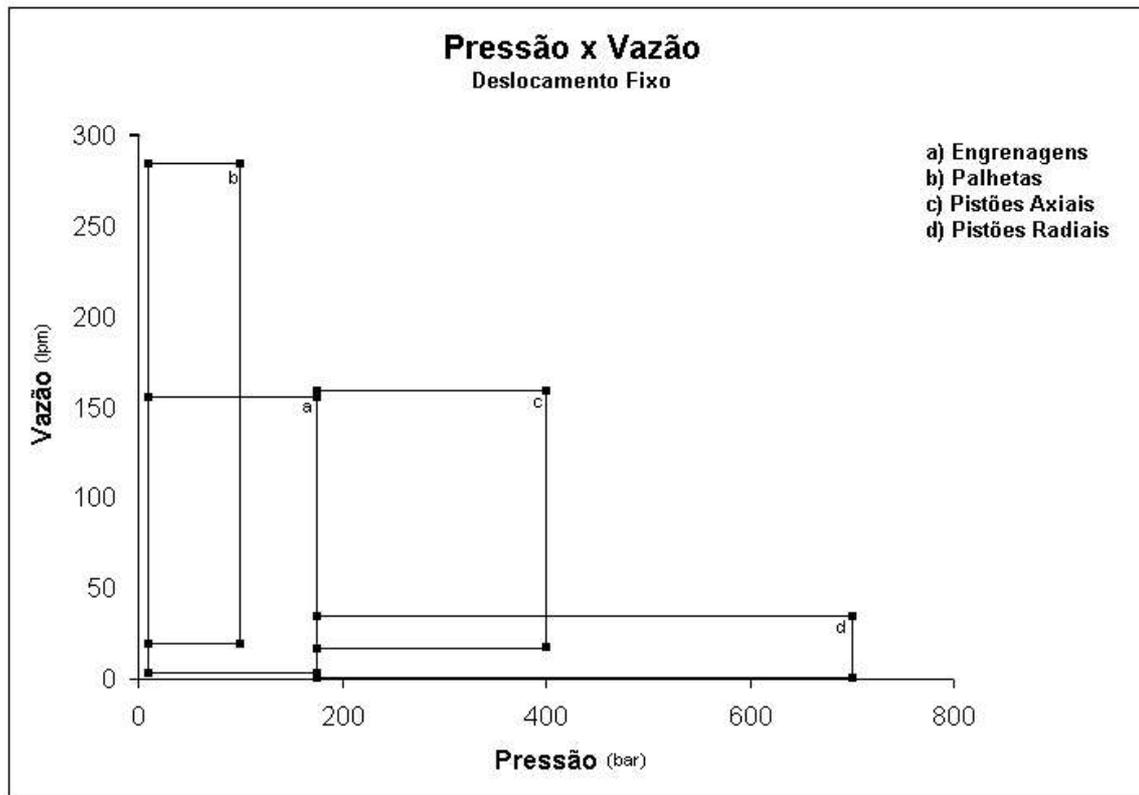


Figura 4.11 – Gráfico da relação entre pressão, vazão e bombas de deslocamento fixo que podem ser utilizadas.

A seguir são apresentadas as possíveis situações encontradas de acordo com a análise do gráfico. Para cada situação, o sistema apresenta questões com o objetivo de obter informações que possam determinar qual bomba é a mais adequada para o sistema sendo projetado.

- Nenhuma bomba pode ser utilizada (os valores de pressão e vazão não são suportados por nenhuma bomba apresentada pelo protótipo);
- Apenas a bomba de engrenagens;

- Apenas a bomba de palhetas;
- Apenas a bomba de pistões axiais;
- Apenas a bomba de pistões radiais;
- Bomba de engrenagens ou de palhetas: As seguintes questões são apresentadas ao usuário:

A contaminação do fluido no sistema é alta?(s/n)

R:

O preço da bomba deve ser o mais baixo possível?(s/n)

R:

A vibração é crítica para a aplicação?(s/n)

R:

- Bomba de pistões axiais ou de pistões radiais. Questões:

É interessante controlar a pulsação?(s/n)

R:

3. Após determinada a bomba mais adequada ao sistema hidráulico em questão, o protótipo apresenta o resultado e a explicação de como este resultado foi alcançado através de um texto na própria janela do CLIPS e através de um arquivo HTML, onde são apresentadas informações extras sobre o resultado da consulta.

4.5 Comentários gerais sobre o desenvolvimento

O desenvolvimento de um sistema especialista apresenta vários desafios, o que pode comprometer a sua realização se uma metodologia não for seguida. Porém, mesmo seguindo uma metodologia, algumas dificuldades persistem. No presente trabalho, as principais dificuldades encontradas foram:

- Necessidade de um estudo preliminar por parte do engenheiro de conhecimento de um domínio de conhecimento totalmente alheio à sua formação acadêmica.
- Dificuldade em encontrar um especialista que tenha disponibilidade de tempo e interesse em contribuir com o trabalho.

A primeira dificuldade apresentada causou um certo atraso no início do desenvolvimento, até que o engenheiro de conhecimento tivesse obtido um conhecimento básico suficiente para que a atividade pudesse ser iniciada. Esta dificuldade foi contornada através da leitura de vários livros e da consulta à pessoas com mais conhecimento na área.

O segundo ponto apresentado dificultou o encaminhamento do trabalho, pois foi necessário procurar outro especialista durante o desenvolvimento do protótipo, pois o primeiro não pode continuar contribuindo com o trabalho. Além disto, o especialista que contribuiu com o trabalho possuía uma disponibilidade limitada e encontrava-se em outra cidade no início da interação, fato que levou à uma demora acentuada na evolução do trabalho.

No próximo capítulo apresentam-se as tarefas de verificação e validação do protótipo e como estas etapas foram realizadas no presente trabalho.

5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

5.1 Introdução

Antes de ser entregue ao usuário final, um sistema especialista deve passar pela verificação e validação. Esta tarefa tem por objetivo garantir que o sistema apresenta resultados corretos e que o sistema desenvolvido atende as necessidades dos usuários finais (GONZALEZ e DANKEL 1993).

Para que se possa realizar esta tarefa, é necessário definir o que pode ser considerado um resultado satisfatório, além das necessidades do usuário final. Para isto, são definidas métricas que são utilizadas como parâmetros de avaliação do sistema (SILVA 1998).

Neste capítulo serão apresentados conceitos sobre a verificação e validação de sistemas especialistas e como estes conceitos foram aplicados na validação do protótipo desenvolvido neste trabalho.

5.2 Aspectos importantes da verificação e validação de sistemas especialistas

Embora seja formalmente apresentada como última etapa no desenvolvimento de um sistema especialista, esta tarefa na verdade é realizada ao longo do desenvolvimento do protótipo (GONZALEZ e DANKELE 1993). Desta forma, tem-se a verificação ao final de cada ciclo de desenvolvimento, sendo dada maior ênfase à última validação realizada antes da entrega do protótipo ao usuário final.

Embora as atividades de verificação e validação tenham o mesmo objetivo final, eliminar erros para garantir que o sistema apresente a resposta correta da forma correta, os erros a serem eliminados por cada uma das duas são diferentes. As maiores causas de erros em sistemas especialistas são (GONZALEZ e DANKELE 1993):

- Falta de especificações ou, se elas existem, falta de comprometimento a elas.
- Erros semânticos e sintáticos introduzidos durante a implementação do sistema (conhecidos como bugs).
- Representação incorreta do domínio de conhecimento, resultando em uma solução incorreta ou na incapacidade de chegar a uma solução.

Os dois primeiros tipos de erros são abordados pela verificação, enquanto o último é responsabilidade da validação. Ao longo do ciclo de desenvolvimento do protótipo é realizada a verificação, geralmente em caráter informal, através da correção do que foi feito até o momento, garantindo que erros não sejam propagados durante a evolução do sistema. Os erros de semântica são referentes ao conhecimento adquirido e implementado até o momento, e os erros de sintaxe são erros gerados na implementação computacional (GONZALEZ e DANKELE 1993).

A validação também é realizada informalmente durante o desenvolvimento do protótipo, porém é necessário que seja realizada uma validação formal antes da entrega ao usuário final. Isto é feito através da definição de métricas que são utilizadas como parâmetros de avaliação do sistema (SILVA 1998).

A seguir apresenta-se como foram realizadas as tarefas de verificação e validação do protótipo.

5.3 Verificação do protótipo

A verificação de um sistema especialista é dividida em duas tarefas: (1) checar se as especificações estão sendo seguidas e (2) checar os erros de semântica e sintática na base de conhecimento (GONZALEZ e DANKEL 1993). A realização destas tarefas é apresentada a seguir.

5.3.1 Atendimento às especificações

O atendimento em relação aos objetivos do protótipo, apresentados no capítulo 1, foram verificados na fase do projeto conceitual e ao longo do desenvolvimento do sistema, pois além de ser uma verificação relativamente subjetiva, estes objetivos foram sempre levados em consideração pelo engenheiro de conhecimento.

Além de checagem do atendimento aos objetivos do protótipo, os seguintes pontos relativos às especificações do protótipo foram levados em consideração (GONZALEZ e DANKEL 1993):

- O paradigma de representação de conhecimento apropriado foi utilizado: a representação do conhecimento através de regras e orientação a objetos foi considerada apropriada devido à verificação de sua utilização com sucesso em trabalhos similares precedentes (SILVA 1998 e ALVES 2001) e pela adequação percebida durante a execução do projeto, além de serem as formas mais utilizadas.

- Modularidade foi utilizada durante o projeto e a implementação: a modularidade fica garantida através da utilização do paradigma de orientação a objetos.
- A interface com o usuário corresponde às especificações: embora a interface disponível na ferramenta escolhida deixe a desejar em termos de representação gráfica, a opção da geração de arquivos HTML para a apresentação dos resultados confere ao protótipo uma interface adequada.
- O mecanismo de explicação é apropriado para os usuários finais: Foi feita a verificação das explicações através de questionários a fim de chegar a um resultado satisfatório.

5.3.2 Erros de semântica e sintática

Durante a implementação do protótipo, testes relativos ao funcionamento do sistema são feitos permanentemente, o que torna a verificação dos erros de semântica e sintática uma tarefa informal em sistemas desenvolvidos por apenas um engenheiro de conhecimento. Embora seja importante a sua documentação em sistemas desenvolvidos por uma equipe, no presente trabalho ela não foi realizada por não ser imprescindível e pela limitação de tempo.

A maior parte dos erros de sintática foram descobertos através de debug ao ser indicado um erro de execução do sistema. Os erros semânticos foram descobertos da mesma maneira, porém através da constatação de que o resultado esperado para determinada operação não era apresentado. A seguir, apresenta-se como foi realizada a validação do protótipo.

5.4 Validação do protótipo

Como já foi mencionado anteriormente, é necessário que se determinem métricas para que seja possível validar um sistema especialista. Além da

determinação destas métricas, é necessário definir uma metodologia de validação, onde determina-se como a validação será realizada.

Após estes passos, a validação em si é realizada, e através dos resultados alcançados o engenheiro de conhecimento realiza os ajustes necessários, com repetição do ciclo de desenvolvimento até que o sistema seja considerado pronto para a entrega ao usuário. Estas etapas são apresentadas a seguir.

5.4.1 Determinação das métricas de validação

A definição das métricas para a validação do protótipo foram feitas como sugerido em Alves (2001), onde foram identificados, em normas que tratam do assunto, atributos que devem ser observados em um software para que este possa ser considerado de qualidade.

A norma utilizada foi a ISO/IEC9126, de onde foram extraídas as seguintes métricas: funcionalidade, confiabilidade, usabilidade, eficiência e manutenibilidade. A figura 5.1 apresenta as métricas definidas para a validação do protótipo.

CARACTERÍSTICA	SUB-CARACTERÍSTICA	PONTO CHAVE A SER OBSERVADO
FUNCIONALIDADE	Adequação	Propõe-se a fazer o que é adequado?
	Precisão	Faz o que é proposto de forma correta?
CONFIABILIDADE	Maturidade	Com que frequência apresenta falhas?
USABILIDADE	Integibilidade	Entende-se o conceito e a aplicação
	Operacionalidade	Como é a operação?
MANTENABILIDADE	Modificabilidade	É fácil fazer alterações?

Figura 5.1 – Métricas de avaliação do protótipo (ALVES 2001).

A seguir serão apresentados os métodos utilizados para validar o protótipo utilizando as métricas apresentadas acima.

5.4.2 Métodos de validação

Existem vários métodos que podem ser utilizados para a validação de sistemas especialistas (GONZALEZ e DANKEL 1993), e embora as abordagens possam ser diferentes, a validação por testes é a mais intuitiva e a mais empregada.

Primeiramente foram realizados testes informais (apresentando por Gonzalez e Dankel (1993) como validação informal), onde um especialista realizou diversas sessões de consulta com o objetivo de conhecer o sistema e comentar o seu funcionamento. A seguir, um questionário confeccionado pelo engenheiro de conhecimento foi respondido (anexo 3). Estes testes tiveram por objetivo realizar uma pré-avaliação, a fim de evitar que erros básicos ocorridos durante o desenvolvimento do protótipo sejam abordados pela validação formal. Além de auxiliar na correção de erros, esta validação permitiu ao protótipo ser avaliado com mais credibilidade na validação formal.

Em seguida, foram realizados testes para avaliar e validar formalmente diferentes aspectos do protótipo. Estes aspectos, definidos pelas métricas citadas anteriormente, foram avaliados pelo especialista, que foi responsável pela validação do conhecimento implementado, realizando testes e verificando se as respostas fornecidas são corretas (de acordo com o conhecimento do especialista).

Um aspecto importante relativo à validação do conhecimento é que ela não foi realizada apenas através de testes com o protótipo. As árvores de decisão apresentadas anteriormente (capítulos 4 e 5) são uma poderosa ferramenta de validação de conhecimento, pois permitem que o especialista avalie o raciocínio utilizado pelo sistema para chegar aos resultados. Desta forma, uma vez validado o conhecimento através das árvores de decisão, os erros de precisão apresentados pelo sistema podem ser considerados erros de implementação, pois o conceito utilizado está correto.

5.4.3 Resultados da validação do protótipo

Após terminado o primeiro ciclo de desenvolvimento do protótipo, quando se tinha uma primeira versão pronta para avaliação, o especialista realizou testes e fez observações em relação às respostas fornecidas.

A partir destas observações iniciou-se um novo ciclo de desenvolvimento, sendo feita uma entrevista de aquisição de conhecimento, com o intuito de rever alguns conceitos implementados, chegando ao final com uma nova versão do protótipo.

Esta versão foi testada novamente pelo especialista, gerando novas observações (anexo 4). A partir destas observações foram feitas alterações até que o protótipo foi considerado concluído dentro dos objetivos propostos. Segundo o especialista, “Fiz o teste e para o objetivo que o trabalho se propõem, está OK” (Anexo 4).

Desta forma o ciclo de desenvolvimento do protótipo foi encerrado como trabalho de mestrado, sendo a sua continuação objeto de uma eventual expansão em outro trabalho acadêmico ou em um sistema industrial.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

6.1 Comentários preliminares

A utilização de sistemas especialistas ainda pode ser considerada muito modesta no Brasil, sendo pequeno o número de sistemas implementados comercialmente. Em contraste com países como Estados Unidos e Japão, esta é uma técnica ainda pouco empregada.

Uma das principais causas deste panorama é a falta de pessoas com conhecimento nesta área. Segundo artigo da revista COMPUTERWORLD (http://computerworld.terra.com.br/templ_textos/noticias.asp?id=17457), existe uma carência nas universidades brasileiras no ensino de certas técnicas de informática, entre elas sistemas especialistas.

O trabalho aqui apresentado procurou demonstrar como esta técnica pode ser utilizada em uma aplicação importante no meio industrial, desenvolvendo um sistema protótipo que abre caminho para futuras aplicações (comentadas a diante).

A aceitação de um artigo sobre este trabalho em um congresso internacional de engenharia mecânica (IWK – Ilmenau, Alemanha) demonstra a sua relevância e o reconhecimento de sua importância.

A seguir serão comentados alguns aspectos importantes sobre o desenvolvimento do trabalho, assim como as contribuições obtidas com o seu desenvolvimento e trabalhos futuros que podem ser realizados a partir do que foi aqui demonstrado.

6.2 Comentários sobre o desenvolvimento do protótipo

De forma prática, o desenvolvimento do protótipo pode ser dividido em três etapas: formulação do problema, estudo sobre o problema, aquisição de conhecimento e implementação, sendo estas etapas iterativas e interativas entre si.

A primeira etapa apresentada acima foi desenvolvida no início das atividades do trabalho, durante os primeiros contatos entre o autor e os seus orientadores. Após escolhido o tema, foi realizado o estudo sobre os assuntos a serem abordados. O autor possuía apenas conhecimento na área de sistemas especialistas, e não possuía nenhum conhecimento prévio sobre hidráulica, dada a sua formação (bacharel em Ciências da Computação).

O fato de o autor não possuir conhecimento na área de hidráulica ocasionou a demanda de uma grande quantidade de tempo no estudo nesta área, através da leitura de livros e conversa com professores. O objetivo deste estudo foi familiarizar-se com os conceitos básicos e ao jargão utilizado, tornando-se desta forma capaz de interagir com os especialistas. Em relação à técnica de sistemas especialistas, o autor assistiu a uma disciplina cujo conteúdo lida com a aplicação de sistemas especialistas ao projeto, mais especificamente na área de engenharia mecânica.

É importante ressaltar que embora seja afirmado na literatura que o engenheiro de conhecimento não precisa tornar-se um especialista no domínio de conhecimento no qual se insere o problema a ser resolvido (GIARRATANO e RILEY 1994), verificou-se que a falta de conhecimento no domínio causou certa dificuldade no desenvolvimento do protótipo, sendo necessário que o engenheiro de conhecimento não apenas adquirisse conhecimento básico, mas em alguns casos foi necessário um estudo mais detalhado.

Este problema está diretamente relacionado a outro problema encontrado durante o desenvolvimento do protótipo, que foi a dificuldade em encontrar-se um especialista disponível a fornecer o conhecimento necessário para o desenvolvimento adequado do trabalho. Devido a este problema, a maioria do

conhecimento utilizado no desenvolvimento do protótipo foi adquirido através da interpretação de livros e catálogos por parte do engenheiro de conhecimento, tarefa que demandou, como citado anteriormente, um estudo mais aprofundado do assunto.

A dificuldade em encontrar-se um especialista disponível também ocasionou o atraso na finalização do desenvolvimento do protótipo, pois enquanto isto não ocorria as últimas etapas de desenvolvimento não podiam ser realizadas. Só com a disponibilidade de um especialista apto a contribuir com o projeto é que foi possível a finalização do mesmo.

Com isto, confirma-se a informação presente na maioria dos livros sobre sistemas especialistas, declarando que a etapa de aquisição de conhecimento é o “gargalo” no desenvolvimento de sistemas especialistas. As outras etapas, principalmente a implementação, foram realizadas sem maiores problemas.

6.3 Comentários sobre os resultados obtidos

Pode-se considerar que os objetivos almejados no início do trabalho foram alcançados com êxito, principalmente levando-se em conta as dificuldades encontradas durante a sua realização. Como em todo trabalho de mestrado, algumas idéias tidas no início foram abandonadas ou reavaliadas, devido a limitações encontradas durante a sua realização.

A primeira delas foi a utilização de conhecimento adquirido de vários especialistas, a fim de fornecer um resultado de maior qualidade na seleção da bomba. Esta idéia foi abandonada devido à dificuldade de se encontrar pelo menos um especialista disponível. Outra idéia que teve que ser abandonada foi a de se realizar uma análise mais aprofundada dos atributos do sistema hidráulico sendo projetado, pois a dificuldade de interação com especialistas tornou-a inviável.

Apesar destas limitações, o protótipo é capaz de fornecer respostas satisfatórias ao usuário, como pode ser comprovado através dos resultados obtidos na validação do sistema.

É importante ressaltar que o problema abordado neste trabalho não possui uma solução definitiva. Cada especialista pode realizá-lo de forma diferente e chegar a resultados ligeiramente diferentes. Portanto, a solução apresentada neste trabalho pode diferenciar da solução obtida de alguma outra forma, mas não pode ser considerada incorreta.

Além disto, durante o projeto do sistema hidráulico é possível adaptar um tipo de bomba para que este seja utilizado em uma situação onde tipicamente não seria utilizado, o que torna o problema de seleção muito mais complexo. Neste trabalho, não se levou em consideração este fato, e as respostas apresentam apenas bombas simples, sem adaptações.

6.4 Contribuições do trabalho

Alguns dos principais objetivos do trabalho foram definidos de forma a contribuir para futuras pesquisas na área de sistemas especialistas aplicados ao projeto e na área de seleção de bombas para sistemas hidráulicos. Ambas as áreas ainda não foram amplamente exploradas.

Através do desenvolvimento deste trabalho procurou-se demonstrar o potencial da utilização da Inteligência Artificial, mais precisamente de Sistemas Especialistas, na criação de ferramentas inteligentes de auxílio ao projeto de sistemas mecânicos em geral.

Os resultados obtidos mostram que através da continuidade no desenvolvimento do protótipo pode-se utiliza-lo como uma importante ferramenta no auxílio ao projeto, possibilitando que engenheiros com pouca experiência na seleção da bomba possam consultar a opinião de outro especialista com mais experiência, e até que engenheiros com experiência nesta tarefa possam contar com a uma segunda opinião.

Em um caráter mais teórico, uma contribuição extra do trabalho é a possibilidade de se gerar uma discussão sobre a tarefa de seleção de bombas para sistemas hidráulicos, uma vez que este assunto é pouco abordado na literatura.

Além disto, o trabalho está sendo utilizado como referência em outro trabalho de mestrado junto ao POSMEC (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC), onde está sendo desenvolvido um S.E. para projeto de Unidade de Potência (CALETTI, 2003).

6.5 Recomendações para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho foram identificados alguns pontos que melhorariam o resultado do sistema, mas que pelas limitações inerentes a um trabalho acadêmico não puderam ser desenvolvidas. Alguns destes pontos são discutidos a seguir.

- Utilização de mais de um especialista: desta forma, é possível combinar a experiência de vários especialistas, chegando a resultados mais satisfatórios e com mais possibilidade de acerto. A dificuldade de se fazer isto é a falta de especialistas disponíveis para auxiliar no desenvolvimento e o trabalho extra para lidar com os conflitos no conhecimento dos especialistas.
- Uma interação mais sólida com o(s) especialista(s): a dificuldade de interação entre engenheiro de conhecimento e especialista pode gerar muitas dificuldades durante o desenvolvimento, pois em muitos casos a seqüência do desenvolvimento depende dos resultados de uma entrevista com o especialista. Além de diminuir o tempo de desenvolvimento, uma maior interação melhora os resultados obtidos, possibilitando que se chegue mais perto dos objetivos traçados.
- Utilização de mais de um catálogo de bombas: para facilitar o desenvolvimento do sistema, foi utilizado apenas um catalogo de

bombas. A variação na montagem de bombas do mesmo tipo por fabricantes diferentes demandaria um estudo mais profundo na parte de classificação das bombas, e o fato do autor do trabalho não possuir formação em mecânica fez com que esta tarefa ficasse fora do escopo do trabalho.

- Apresentação de mais características do sistema hidráulico como resposta do sistema, e não apenas o tipo da bomba: este ponto, sugerido pelo especialista, visa atender melhor as necessidades do engenheiro durante o projeto do sistema hidráulico no que se refere à bomba. Novamente, esta tarefa exigiria um maior conhecimento em hidráulica por parte do autor, o que não é o objetivo do trabalho.

Abordando estes pontos, o sistema estaria pronto para ser testado a um nível mais comercial, podendo ser integrado a um sistema que cubra as demais tarefas envolvidas no projeto, como em SILVA (1998).

6.6 Comentários finais

A aplicação de ferramentas computacionais tem contribuído para o desenvolvimento da engenharia através de sistemas de auxílio ao projeto, a maioria destas ferramentas sendo aplicadas na parte visual do projeto. Existem poucas ferramentas aplicadas nas tarefas que exigem conhecimento especializado, como por exemplo a seleção de componentes.

A Inteligência Artificial fornece técnicas que possibilitam que ferramentas inteligentes passem a auxiliar o engenheiro, de forma a dotá-lo de uma maior capacidade de desenvolvimento.

Neste trabalho procurou-se demonstrar o potencial da aplicação da Inteligência Artificial em uma área prática que requer além de conhecimento experiência, atributos que só são disponíveis ao engenheiro após certo tempo de realização da atividade. Outras tarefas que possuem estas características também podem ser abordadas, como por exemplo modelagem do circuito hidráulico (SILVA 1998), manutenção (ALVES 2001).

Além disto, apresentou-se um tratamento da tarefa de seleção de bombas, abrindo espaço para uma discussão neste sentido, pois trata-se de uma tarefa pouco abordada pela literatura.

Vale ressaltar a importância da colaboração de um especialista no desenvolvimento de um sistema especialista aplicado a um domínio que não corresponde à formação do engenheiro de conhecimento, como no caso deste trabalho. A falta de conhecimento profundo no domínio gera dificuldades que só podem ser sanadas com o apoio de uma pessoa com o conhecimento necessário e o tempo disponível para poder esclarecer as dúvidas do engenheiro de conhecimento.

Em casos onde o próprio especialista no domínio é também o responsável pelo desenvolvimento do sistema, estas dificuldades tornam-se mais amenas, diminuindo a dependência do engenheiro de conhecimento da ajuda de terceiros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Guilherme D. **Sistema Especialista Protótipo para Diagnóstico de Falhas em um Sistema Hidráulico Naval**. Florianópolis: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, 1998. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

BARRETO, Jorge Muniz. **Inteligência Artificial no limiar do século XXI**. Florianópolis. 1997

CALETTI, Luciano. **Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para projeto de unidades de potência hidráulica**. Florianópolis: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, 2003. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

D'AZZO, John J. HOUPIS, Constantine H. **Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1984.

DREYFUS, H. L., DREYFUS, S. E. "From Socrates to Expert Systems: The Limits of Calculative Rationality". ***Technology in Society***, vol. 6, no. 3, pp. 217-3. 1984.

DREYFUS, H. L. DREYFUS, S. E. **Mind over Machine: The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of Computer**. New York: Free Press, 1986.

DIETER, Werner. **Les Éléments des Systèmes Hydrauliques**. Paris: Dunod, 1965.

DURKIN, John. **Expert systems: desing and development**. Prentice-Hall, 1994.

EDGINGTON, Roy. "Desingn, Operation and Control of Pumps and Motors". In **Hydrostatic Transmission Systems**. Edited by J. Korn. London: Intertext Books, 1969.

ESPOSITO, Anthony. **Fluid Power with Applications**. 5th Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2000.

FITCH JR, Ernest C. **Fluid Power and Control Systems**. McGraw-Hill, 1966.

GIARRATANO, Joseph C. **CLIPS User's Guide – Version 6.10**. Aug. 5th 1998.

GIARRATANO, Joseph C, RILEY, Gary. **Expert Systems – Principles and Programming**. Second Edition. PWS Publishing Company, 1994.

GONZALEZ, Avelino, DANKEL, Douglas D. **The Engineering of Knowledge Based Systems – Theory and Practice**. Prentice-Hall, 1993.

GÖTZ, Werner. **Hidráulica, Teoria e Aplicações**, da Bosch. Robert Bosch GmbH, 1991.

HART, Anna. **Knowledge Acquisition for Expert Systems**. Second Edition. McGraw-Hill, 1992.

IGNIZIO, James P. **Introduction to Expert Systems – The development and Implementation of Rule-Based Expert Systems**. McGraw-Hill, 1991.

IVANTYSYN, Jaroslav, IVANTYSYNOVA. **Hydrostatic Pumps and Motors**. First English Edition. New Deli: Academia Books International, 2001.

KELLER, Robert. **Expert System Technology – Development and Application**. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

KIDD, Alison L, et al. **Knowledge Acquisition for Expert Systems – A Pratical Handbook**. New York: Plenun Press, 1987.

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

LINSINGEN, Irlan von. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. Florianópolis: ED. da UFSC, 2001.

MCGRAW, Karen L, WESTPHAL Christopher R. **Readings in Knowledge Acquisition – Current Practices and Trends**. Ellis Horwood Limited, Chichester, 1990.

PEASE, Dudley A. **Basic Fluid Power**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1967.

Pump School. **Comparing 4 Types Of PD Pumps** (<http://www.pumpschool.com/intro/selection.htm>). Viking Pump, Inc, 1992.

RICH, Elaine, KNIGHT, Kevin. **Artificial Intelligence**. McGraw-Hill, Inc, 1992.

RUSSEL, S. J., NORVIG, P. **Artificial Intelligence: a modern approach**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

SILVA, Jonny C. **Expert System Prototype for Hydraulic System Design Focusing on Concurrent Engineering Aspects**. Florianópolis: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, 1998. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica).

SUH, P. Nam. **The Principles of Design**. Oxford: Oxford University Press, 1990.

WEISS, Sholom M. KULIKOWSKI, Casimir A. **A Pratical Guide to Designing Expert Systems**. New Jersey: Rowman & Allanheld Publishers, 1984.

WARRING, R. H. **Pumps Selection and Applications**. Morden, England: Trade and Technical Press, 1969.

ANEXOS

Anexo 1 – Primeiro questionário respondido por um especialista* por email.

Caro Marco,

Talvez não tenha muito que lhe falar sobre bombas. Na verdade minha experiência se espelha somente dentro da área de projeto industrial (siderúrgica) e portanto um pouco limitada para escolha de vários tipos de bombas. Eu explico!!! Dentro de uma indústria trabalha-se muito com determinado tipo de bomba limitadas a faixas de pressão e tamanho nominal. O motivo, é que se tenha poucos itens de estoque e que uma determinada bomba sirva a vários outros equipamentos. Sendo assim, o que tenho a lhe falar talvez não seja satisfatório, mas espero que contribua para o seu trabalho

Saudações.

1a) Quais são os tipos de bombas mais utilizados? Você acrescentaria/excluiria algum? Relacione cada tipo com a sua aplicação a sistemas hidráulicos.

Eu acrescentaria as bombas de parafuso que são usadas para grandes vazões, muito utilizadas em sistemas de resfriamento e também em equipamentos de flushing.

Bombas de pistões axiais fixa, para pressões >100bar, vazões <500lpm e circuitos com acumuladores.

Bombas de pistões axiais variável, para pressões >100bar, vazões >500lpm e unidades de potência com mais de duas bombas com ou sem circuitos de acumuladores.

Bombas de pistões radiais para baixas vazões e elevadas pressões > 200bar.

Bombas de engrenagem interna, para sistemas isolados (um ou dois cilindros) com pressão até 150bar com circuito de acumuladores.

Não tenho experiência de aplicação com bombas de engrenagens externas.

Bombas de palhetas com vazão variável para pressões < 100bar em circuitos múltiplos.

Bombas de palhetas com vazão fixa para pressões < 100bar em circuitos múltiplos com ou sem acumuladores.

1b) Baseado na sua experiência, quais os principais tipos que não poderiam ficar de fora?

Bombas de pistões axiais e de engrenagem.

2) Quais os principais parâmetros do sistema a serem analisados para a escolha do tipo de bomba?

Pressão;

Vazão;

Ciclo contínuo ou intermitente;

3) Durante o projeto da unidade de potência, o que é definido primeiramente, o tipo de bomba ou o tipo de deslocamento (fixo/variável)? Por que?

Para mim é a mesma coisa. O que deve ser definido primeiramente é como o sistema irá funcionar, ou seja, o que se deseja do sistema (tipo de ciclo) e então definir qual a bomba.

4) Quais são os critérios utilizados para a escolha do tipo de deslocamento?

Economia de energia – variável;

Ciclo contínuo – fixa;

Ciclo intermitente – variável;

Pressão contínua – fixa + acumulador;

Vazão contínua – variável + acumulador;

5) Quais são as características que diferem entre uma bomba do mesmo tipo de deslocamento fixo e de deslocamento variável? (Por exemplo, uma bomba de palhetas de deslocamento fixo e uma bomba de palhetas de deslocamento variável)

Carcaça diferentes;
Temperatura dos mancais diferentes;
Montagem de drenos;
Resfriamento de mancais.

* Fernando Furst: Engenheiro mestre em Eng. Mecânica pela UFSC, especialista em hidráulica industrial.

Anexo 2 – Questionário respondido por um especialista* (EUA) por email.

Please coment as much as you can/want ALL your responses.

1) Analyze the following types of pump, with the corresponding options fixed or variable when applicable:

- a) Axial Piston with bend axis
- b) Axial Piston swash plate
- c) Radial Piston
- d) External Gear
- e) Internal Gear
- f) Vane (with or without force compensation)

1a) Which are the most applicable types you have seen according to specific applications?

- Fixed volume vane pumps for single actuator one function circuits and some multiple actuator circuits.
- Pressure compensated Vane pumps for low to medium pressure multiple actuator circuits.
- Pressure compensated axial swash plate pumps for high pressure multiple actuator circuits.
- Bi-directional axial swash plate pumps for closed loop actuator circuits.
- Bi-directional radial piston pumps for closed loop cylinder circuits.
- Gear pumps for fluid transfer, super charging or mobile equipment.

1b) Based on your experience, which are the main types to be addressed at first?

Fixed volume vane and any pressure compensated type.

2) During the power supply detailed design, what is firstly defined, the type of displacement or the type of pump? Why?

The type of pump is determined first according to number of actuators, how the actuators must perform and often purely by personal preference. Displacement is based on the actuator size and cycle time and only determines minimum pump size at a given RPM.

3) What are the criteria to choose the type of displacement?^

See 1a) above

4) Which are distinctive characteristics between fixed and variable displacement pumps of the same type? (for example: what distinguishes fixed and variable displacement swash plate piston pump?)

Pressure requirement. In 35 years I have only used one fixed displacement piston pump and that was due to no fixed volume vane pump could operate at the pressure I needed.

Normally my criteria is if I can unload the pump when no fluid is required and can use all pump flow at all times during the cycle (Never send fluid across the relief valve) I use a fixed volume pump. Otherwise I use a pressure compensated pump and flow controls to control actuator speed. When possible I use a load sensing pressure compensated pump to reduce energy loss and the resultant heat.

* Bud Trinkel: Especialista americano em hidraulica & pneumática com mais de 30 anos de experiência em projeto e manutenção de sistemas hidráulicos.

Anexo 3 – Questionário de validação respondido por um usuário* (estudante de mestrado)

Questionário para validação do protótipo

1. Faça comentários sobre:

a) Clareza das perguntas feitas pelo sistema.

Estão claras, acredito sem nenhum problema para o entendimento do usuário. Talvez (reparei depois que conversei contigo) poderia mudar a pergunta sobre a contaminação do fluido, para algo como “contaminação do fluido no sistema”.

b) A relevância das perguntas.

Do que sei sobre bombas hidrostáticas, as perguntas são pertinentes. Pressão e vazão de operação são dados essenciais para o projeto de um sistema hidráulico (as bombas são escolhidas depois que os requisitos do sistema forem encontrados), e a capacidade da bomba de suportar contaminação do fluido é importante para a sua seleção (ou para a definição de um filtro a ser usado no sistema). A única dúvida é como um especialista pensa sobre o rendimento global da bomba (se é ou não um requisito primário para a escolha); talvez a sua suposição esteja correta (pensar nas perdas do sistema hidráulico como um todo, e assim escolher uma bomba que permita um determinado rendimento global do sistema).

c) Clareza das respostas apresentadas (algo poderia ser acrescentado)?

Nem todas as respostas mostram o nível de contaminação escolhido para a bomba. Como foi uma das características na seleção, é interessante inserir isto na resposta apresentada.

Sobre o que nós conversamos anteriormente, seria interessante apresentar alternativas de escolha quando uma determinada bomba possa ser utilizada com a presença de um filtro (provavelmente de sucção) no sistema.

Talvez também pudesse modificar as saídas onde apenas bombas de pistões possam ser utilizadas (altas pressões e/ou vazões). A parte onde fala que “a utilização de qualquer outro tipo de bomba só seria possível através de

alterações que permitam à bomba suportar estes valores de pressão e vazão” é um tanto quanto vaga, pois não explica que alterações seriam necessárias; uma alternativa seria explicar, por exemplo, que apenas bombas especiais de palhetas poderiam ser utilizadas (e eu não sei se são mais caras).

d) A qualidade das respostas (na sua opinião, alguma resposta dada pode ser considerada errada?)

Como também discutimos quando conversamos: grandes pressões e grandes vazões não são geralmente compatíveis. Provavelmente, não existe uma bomba que possa operar com pressões maiores de 500bar e vazões elevadas (neste caso maiores de 30lpm); seriam necessários um conjunto de bombas (duas ou mais) para realizar o trabalho necessário. É ponto para conversar com especialistas da área.

Outros pontos a discutir:

Para sistemas com pressões elevadíssimas (maiores que 700bar), quais são as bombas utilizadas? Pelas fontes de pesquisa que vimos, bombas chegam ao máximo de 700bar.

Vazões muito elevadas (maiores que 150lpm)? Provavelmente, usam-se duas ou mais bombas para realizar o trabalho.

e) Comentários gerais sobre o sistema.

Eu sei que já está trabalhando nisto: uma melhora nos arquivos .html é importante (mais informações sobre a bomba, os dados escolhidos, e por aí vai). Na pressão de operação: consertar o intervalo de entrada da pressão (está escrito assim, quando se digita um valor fora da faixa: “Responda dentro do intervalo: 01000”).

Talvez limitar a entrada para a vazão seja necessário.

2. O protótipo apresentou algum erro de execução? (anote o erro e os valores que o causaram)

Quando tentei inserir um valor negativo para a pressão ou vazão, na forma “-<valor>”, o programa apresentou o seguinte erro:

Function > expected argument #1 to be of type integer of float

Não apresentou erro semelhante nas perguntas sobre nível de contaminação e rendimento global da bomba.

3. Na sua opinião, algo poderia ser modificado/acrescentado ao sistema?

Algumas sugestões para modificar o sistema estão nas outras respostas. Algo interessante, porém um tanto quanto complicado, seria desenvolver um banco de dados de bombas fornecidas por vários fabricantes, para que o sistema pudesse informar algumas bombas de acordo com a seleção feita pelas inferências. Contudo, não é este o objetivo do trabalho, e seria necessário o apoio de fabricantes e fornecedores dispostos a colaborar com o sistema.

* Luciano Calletti: Mestrando em Engenharia Mecânica pela UFSC.

Anexo 4 – Questionário de Validação final, respondido pelo especialista* que contribuiu com a aquisição de conhecimento.

Email

Marco;

- Fiz o teste e para o objetivo que o trabalho se propões, está OK.
- Somente sugiro que troques a pergunta sobre vibração para: O escoamento pode ou não ter pulsação de pressão?
- Ainda existem uns pontos de indeterminação quanto às faixas de pressão, mas isso é para o futuro. Estou feliz por ti.

SDS

Questionário de avaliação:

1. Em relação aos resultados apresentados durante o teste, foram encontradas inconsistências, erros, etc? Comente.

*Faltou a colocação de opção para o usuário que oriente-o para que bomba está mais perto daquela possibilidade solicitada. Porque se o software não conseguir achar uma adequada, ele simplesmente fica esperando por uma nova informação. Coisas do tipo: *a bomba solicitada não é disponível no escopo de fornecimento da empresa A, B ou C, mas a bomba X, com pressão e vazão tais, são as mais próximas. Confirme estes dados na próxima iteração.* Acho que no futuro isto poderia reduzir o tempo de procura.*

2. As perguntas apresentadas ao usuário são claras? Alguma sugestão?

Aquela com relação à vibração não especifica que a vibração é da pressão do escoamento. Dá para entender que é vibração da estrutura ou da máquina.

3. O texto apresentado nos resultados é satisfatório para o entendimento da resposta?

Como se trata de resposta de software, está. Neste caso, as colocações via tópicos ajudam muito.

4. Faça uma avaliação geral do sistema, com sugestões sobre o que pode ser modificado.

Aumentar os loopings de iteração com o usuário, antes que a bateria de perguntas se esgote.

Tipo:

P:Qual a faixa de pressão?

R:xxxxx(usuário)

Caso a bomba exista, segue, caso não, volta e faz uma nova pergunta, sugerindo uma pressão mais próxima

P: Qual a faixa de vazão?

R:xxxxx(usuário)

Novamente o caso acima...

Comentários finais:

-Fiz o teste e para o objetivo que o trabalho se propões, está OK.

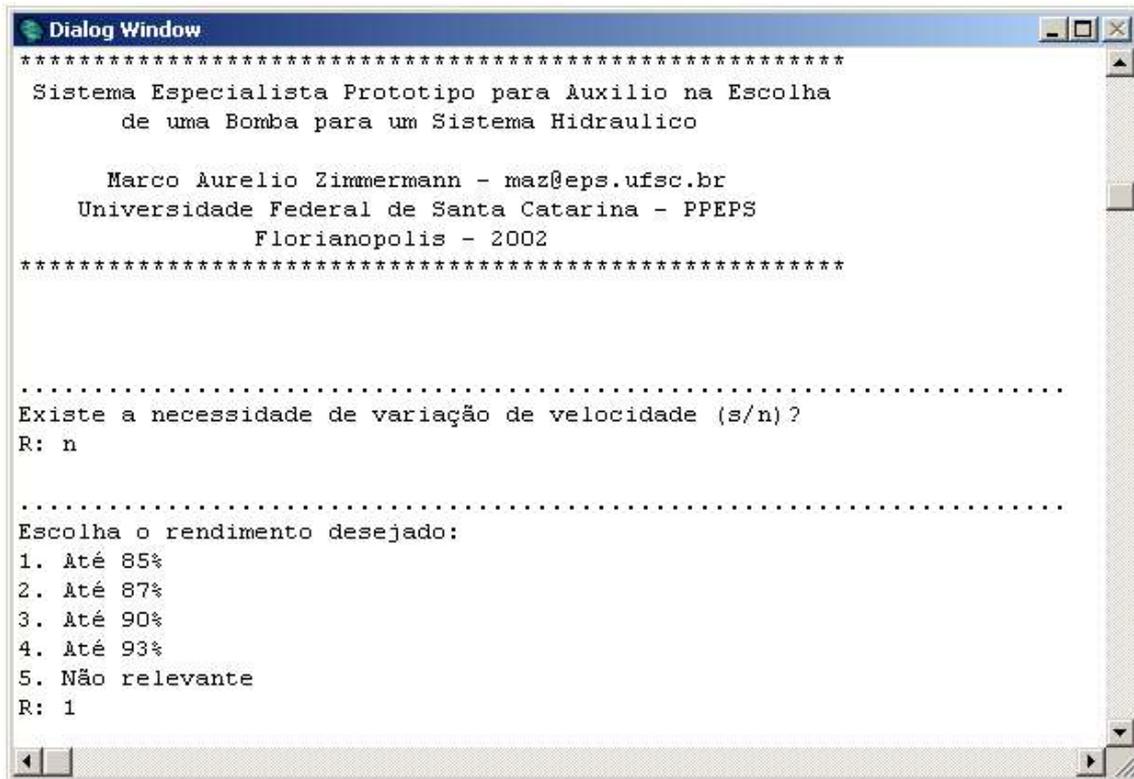
-Somente sugiro que troques a pergunta sobre vibração para: O escoamento pode ou não ter pulsação de pressão?

- Ainda existem uns pontos de indeterminação quanto às faixas de pressão, mas isso é para o futuro. Estou feliz por ti.

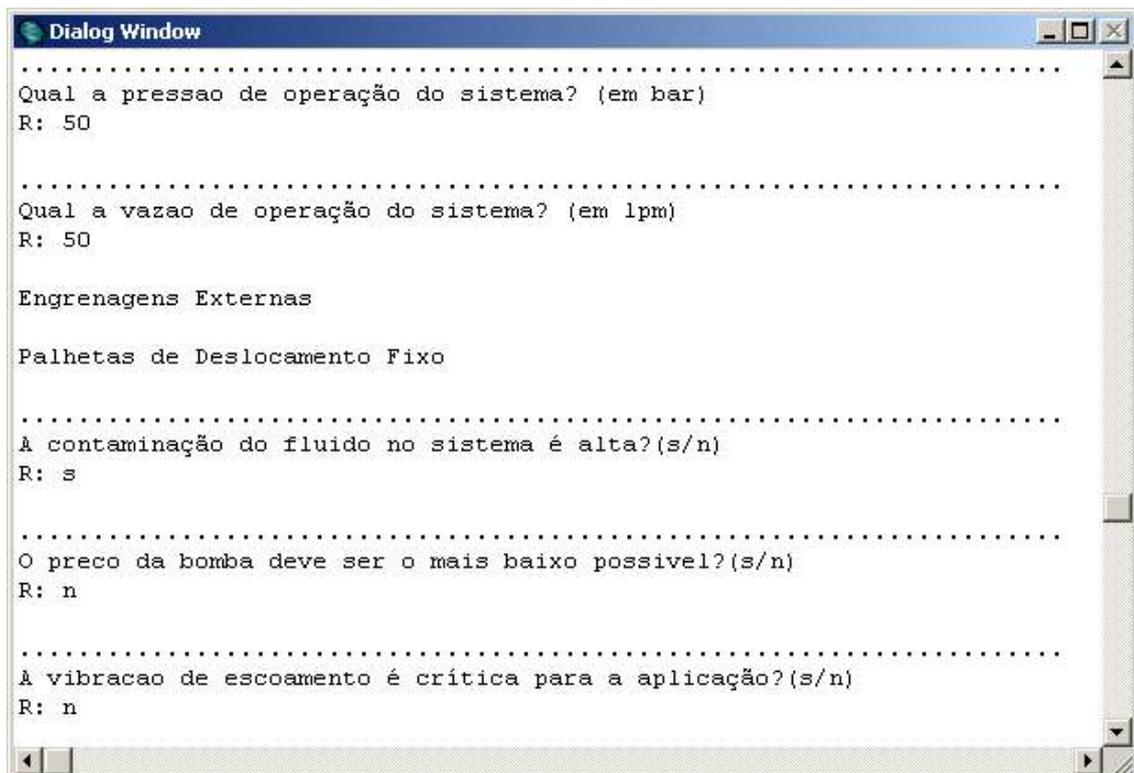
* Júlio Scussel: Engenheiro mecânico especialista em hidráulica industrial e mestrando em Engenharia Mecânica pela UFSC.

Anexo 5 – Exemplo de uma seção de consulta ao protótipo

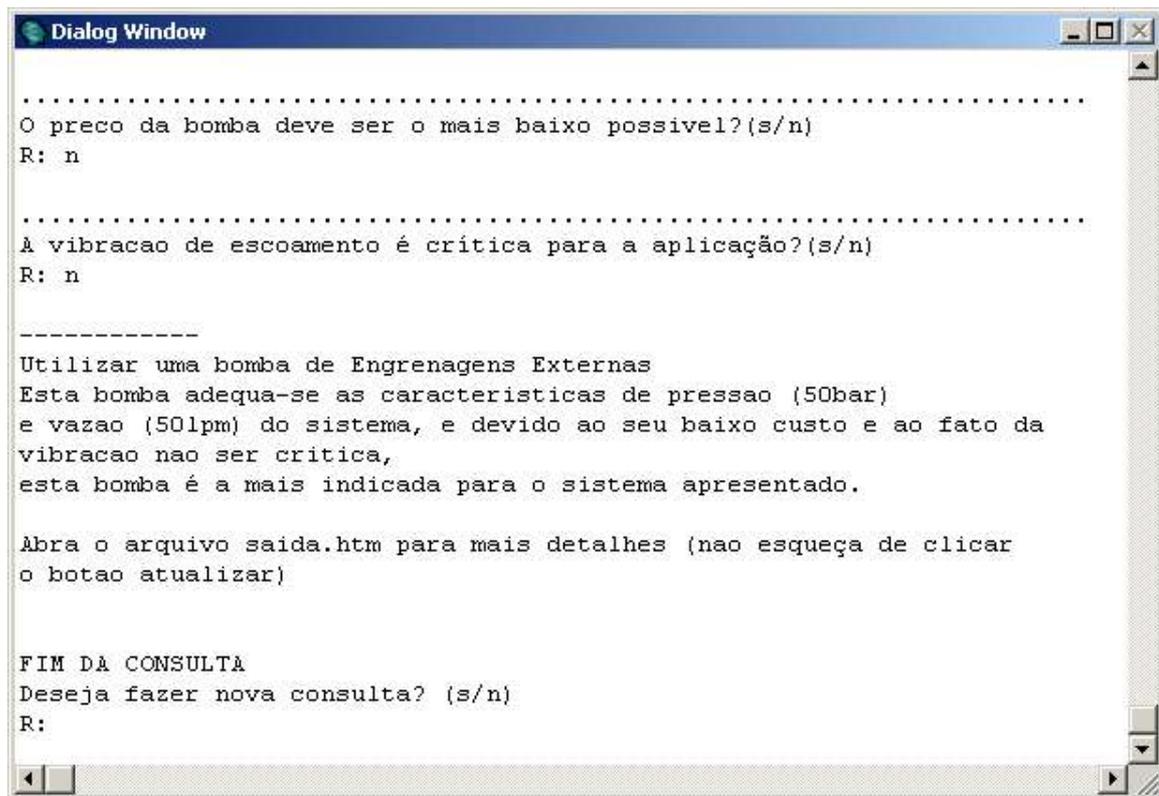
Tela 1: Tela de abertura e inicio das perguntas.



Tela 2: Continuação das perguntas.



Tela 3: Final das perguntas e apresentação do resultado.



Tela 4: Tela de saída (arquivo HTML)

