

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA
ESPECIALISTA PARA PROJETO DE UNIDADES DE
POTÊNCIA HIDRÁULICA**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCIANO CALETTI

Florianópolis, Outubro de 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para
projeto de unidades de potência hidráulica**

LUCIANO CALETTI

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA,
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA,**

sendo aprovada na sua forma final.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng. - orientador

Prof. José Antonio Bellini da Cunha Neto, Dr. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.

Prof. Irlan von Linsingen, Dr. Edu.

Prof. Raul Guenther, D.Sc.

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

“Todo homem por natureza deseja o conhecimento”

Aristóteles, Metafísica

Agradecimentos

A CAPES, pelo apoio financeiro, e ao LASHIP, pelo apoio técnico;

Ao professor Jonny Carlos da Silva, pelo apoio e pela orientação ao meu trabalho, sempre objetiva e eficaz, e aos membros da banca, pelas sugestões e críticas pertinentes, em especial ao professor Irlan von Linsingen, pelas conversas e explicações sobre Educação e Ensino;

Aos engenheiros Marco Aurélio Zimmerman e Fernando Luiz Furst, pelo auxílio e conhecimento que auxiliaram o andamento do meu mestrado;

Aos amigos da 96-1, Fábio Pinto, os Márcios, Fabrício, Dalpa, Monte, Sideto, Joel, Felipe, enfim, todos da turma, aos amigos de Florianópolis, e aos amigos de Aracaju, Lucas e minha segunda família, Sidclay, Sadi, Vinícius, Matheus Oliveira, Mateus Freitas e Gilberto, por sempre estarem presentes e acreditarem em mim;

Aos meus tios e primos, também sempre presentes e que sempre me recebem de braços abertos (e com um belo churrasco!) quando vou para Sergipe e para o Rio Grande do Sul, e para a minha avó Barbara, que infelizmente não pode estar junto de nós ao fim do mestrado;

Aos meus pais, Joelci e Maria, meus irmãos, Gio e Paty, e a minha namorada, Naninha, pelo carinho, compreensão, apoio nos momentos difíceis e alegria nas boas horas;

E a todos que me ajudaram direta ou indiretamente neste trabalho, que, por falta de melhor memória, eu não incluí aqui nestas breves linhas.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS SOBRE ESTA PESQUISA	1
1.2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	2
1.3. MOTIVAÇÕES PARA O TRABALHO	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2. SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO.....	6
2.1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	6
2.1.1. <i>Introdução</i>	6
2.1.2. <i>Fatos sobre a Inteligência Artificial</i>	7
2.1.3. <i>Conhecimento e Representação do Conhecimento</i>	9
2.2. SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO E ENGENHARIA DO CONHECIMENTO	11
2.3. SISTEMAS ESPECIALISTAS	12
2.3.1. <i>Estrutura de um Sistema Especialista</i>	12
2.3.2. <i>Vantagens dos Sistemas Especialistas</i>	15
2.3.3. <i>Desvantagens dos Sistemas Especialistas</i>	16
2.3.4. <i>Desenvolvimento de Sistemas Especialistas</i>	17
2.3.5. <i>Aquisição do Conhecimento</i>	18
2.3.6. <i>Representação do Conhecimento</i>	18
2.3.7. <i>Implementação</i>	21
2.3.8. <i>Ferramentas de Desenvolvimento</i>	21
2.3.9. <i>Verificação e Validação</i>	22
2.4. SISTEMAS DE ENSINO INTELIGENTES (SEI)	23
2.4.1. <i>Conceitos Preliminares</i>	24
2.4.2. <i>Abordagens Educacionais</i>	25
2.4.3. <i>Arquitetura Computacional para um SEI</i>	29
2.4.4. <i>Sugestões para um SEI para ensino de projetos de UPHs</i>	32

3. UNIDADES DE POTÊNCIA HIDRÁULICA	36
3.1. INTRODUÇÃO.....	36
3.2. CARACTERÍSTICAS	39
3.3. PROJETO.....	41
3.4. COMPONENTES	45
3.4.1. <i>Bombas Hidrostáticas</i>	46
3.4.2. <i>Reservatórios</i>	49
3.4.3. <i>Acumuladores</i>	51
3.4.4. <i>Válvulas</i>	53
3.4.5. <i>Filtros Hidráulicos</i>	55
4. O SISTEMA PHIDR	58
4.1. PROPÓSITOS E ARQUITETURA DO PROTÓTIPO PHIDR	58
4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	60
4.2.1. <i>Tarefas de projeto da base de conhecimento</i>	61
4.2.2. <i>Idéias para aquisição de conhecimento</i>	65
4.3. PROPOSTA DE ORGANIZAÇÃO PARA PROJETO DE UPHs	68
4.3.1. <i>Etapas de seleção de UPHs</i>	69
4.4. COMENTÁRIOS SOBRE AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO PARA O PHIDR	81
5. VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO PHIDR.....	83
5.1. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO PROTÓTIPO	83
5.2. ANÁLISE DAS RESPOSTAS DO PROTÓTIPO.....	86
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	91
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O PROTÓTIPO PHIDR	91
6.2. RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES	92
6.3. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
APÊNDICE A – INSTRUÇÕES DO PROTÓTIPO PHIDR	103
INSTALAÇÃO DO PHIDR	103
USO DO PROTÓTIPO	103
EXPLICAÇÕES REFERENTES À SELEÇÃO	107
APÊNDICE B – EXEMPLO DE ARQUIVO DE RESULTADOS.....	110
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO PHIDR.....	113

APÊNDICE D – QUESTIONÁRIOS ENVIADOS PELOS ESPECIALISTAS..... 115

QUESTIONÁRIO 1..... 115

QUESTIONÁRIO 2..... 117

Lista de Figuras

FIGURA 2.1: HIERARQUIA DO CONHECIMENTO (GIARRATANO; RILEY, 1994)	9
FIGURA 2.2: ESTRUTURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA (ADAPTADO DE GIARRANTANO; RILEY, 1994)	13
FIGURA 2.3: ARQUITETURA TRADICIONAL DE SISTEMAS TUTORIAIS INTELIGENTES (GIRAFFA, 1999).....	29
FIGURA 3.1: COMPONENTES DE UM SISTEMA HIDRÁULICO (GÖTZ, 1991).....	37
FIGURA 3.2: PEQUENA UNIDADE DE POTÊNCIA HIDRÁULICA (PARKER HANNIFIN, 2002).....	38
FIGURA 3.3: UNIDADE DE POTÊNCIA HIDRÁULICA - COMPONENTES BÁSICOS.....	40
FIGURA 3.4: OUTRAS CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS PARA UNIDADES DE POTÊNCIA HIDRÁULICA.	41
FIGURA 3.5: PRINCIPAIS FASES DO PROJETO DE PRODUTO (BACK; OGLIARI, 2001)	42
FIGURA 3.6: MODELO DE ENGENHARIA SIMULTÂNEA PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO (YAZDANI; HOLMES, 1999, CONFORME BACK; OGLIARI, 2001).....	42
FIGURA 3.7: ENFOQUE DE ENGENHARIA SIMULTÂNEA EM SBC PARA PROJETO (ADAPTADO DE PERERA, 1997, CONFORME BACK; OGLIARI, 2001).	43
FIGURA 3.8: RESERVATÓRIO RETANGULAR E ASSESSÓRIOS (VESCOR, 1997)	50
FIGURA 3.9: ACUMULADOR DE BEXIGA (GÖTZ, 1991; BOSCH, 2002)	51
FIGURA 3.10: ACUMULADOR DE DIAFRAGMA (GÖTZ, 1991; BOSCH, 2002)	52
FIGURA 3.11: VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO, COM RETORNO LIVRE POR VÁLVULA DE RETENÇÃO.	54
FIGURA 3.12: VÁLVULA DE CONTROLE DE PRESSÃO.	54
FIGURA 3.13: VÁLVULA DE RETENÇÃO COM MOLA.	54
FIGURA 3.14: VÁLVULA DIRECIONAL (TRÊS VIAS E DUAS POSIÇÕES), ACIONAMENTO POR ROLETE E RETORNO POR MOLA.	54
FIGURA 3.15: FILTRO HIDRÁULICO (SOFIMA, 2002)	56
FIGURA 4.1: ARQUITETURA DO SISTEMA PHIDR.....	59
FIGURA 4.2: EXEMPLO DE ENTRADA COM VALORES DO PROTÓTIPO PHIDR	60
FIGURA 4.3: EXEMPLO DE ENTRADAS COM OPÇÕES DO PROTÓTIPO PHIDR.....	60
FIGURA 4.4: EXEMPLO DAS REDES DE INFERÊNCIA PRESENTES NO PROTÓTIPO PHIDR.....	62
FIGURA 4.5: FLUXOGRAMA DE DECISÃO PARA CICLOS CONTÍNUOS, COM VALORES-PADRÃO PARA GRANDES VARIAÇÕES DE PRESSÃO E GRANDES VAZÕES	72
FIGURA 4.6: FLUXOGRAMA DE DECISÃO PARA CICLO INTERMITENTE, COM VALORES-PADRÃO PARA GRANDES VARIAÇÕES DE PRESSÃO E GRANDES VAZÕES.....	73

FIGURA 4.7: UNIDADES DE POTÊNCIA HIDRÁULICA SEM ACUMULADOR.....	78
FIGURA 4.8: UNIDADES DE POTÊNCIA HIDRÁULICA COM ACUMULADOR.....	78
FIGURA 6.1: RESUMO DA SISTEMATIZAÇÃO DE PROJETO DE UPHS.....	93

Lista de Tabelas

TABELA 3.1: SIMBOLOGIA PARA BOMBAS HIDROSTÁTICAS	46
TABELA 3.2: ESQUEMATIZAÇÃO DE DIVERSAS BOMBAS HIDROSTÁTICAS (GÖTZ, 1991)	47
TABELA 3.3: SIMBOLOGIA PARA ACUMULADORES HIDRÁULICOS	52
TABELA 4.1: CLASSE UNIDADE DE POTÊNCIA HIDRÁULICA	62
TABELA 4.2: CLASSE BOMBA HIDROSTÁTICA	63
TABELA 4.3: FAIXAS DE VALORES PARA BOMBAS EM HIDRÁULICA INDUSTRIAL	75
TABELA 4.4: RESOLUÇÃO DE CONFLITOS ENTRE SUBCLASSES DE BOMBAS HIDROSTÁTICAS	76
TABELA 5.1: TESTES DE CONSISTÊNCIA COM DADOS EXTREMOS	88
TABELA 5.2: TESTES COM DADOS MAIS PRÓXIMOS À REALIDADE	89
TABELA A.2: JUSTIFICATIVAS PARA ESCOLHA DA UPH, CICLO INTERMITENTE DE OPERAÇÃO	108
TABELA A.3: JUSTIFICATIVAS PARA ESCOLHA DA UPH, CICLO CONTÍNUO DE OPERAÇÃO	109

Resumo

Este trabalho trata do desenvolvimento de um protótipo de sistema baseado no conhecimento voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica de sistemas industriais. O objetivo da pesquisa é sistematizar e disponibilizar computacionalmente parte do conhecimento deste domínio específico, por meio de um sistema especialista criado a partir de regras definidas para o projeto de unidades de potência hidráulica.

Além da potencial aplicação operacional do sistema, também é proposta uma aplicação para ensino na área de conhecimento do sistema, discutindo-se como um programa pode ser desenvolvido para fins educacionais e quais as características relevantes de um sistema para tal finalidade.

A criação de um sistema baseado no conhecimento é feita através das seguintes etapas: escolha da ferramenta de desenvolvimento, aquisição e representação do conhecimento, implementação, verificação e validação computacional. Tais etapas são detalhadas ao longo do texto. As dificuldades encontradas no desenvolvimento do protótipo, principalmente a aquisição de conhecimento sobre projetos de unidades de potência hidráulica, também são discutidas em detalhes.

Por fim, são apresentados os resultados deste trabalho de mestrado, destacando-se a sistematização de projeto elaborada e o estágio atual de desenvolvimento do protótipo, que permite a seleção de uma UPH em quatro disponíveis, bem como a classe e o princípio de deslocamento da bomba hidrostática. São mostradas ainda as limitações inerentes às dificuldades encontradas durante a criação do protótipo e as possibilidades de aprimoramento e outros usos (sugestões para futuros trabalhos) de um sistema especialista para projeto de unidades de potência hidráulica.

Palavras-chave: sistemas especialistas, unidades de potência hidráulica

Abstract

This study presents the development of a knowledge-based system prototype directed towards the design of hydraulic power units on industrial systems. The aim of this research is to systematize and make computationally available part of the knowledge about this specific domain, through an expert system created from rules defined for hydraulic power units design.

Besides the potential operational application of the expert system, it is also proposed a tutoring application on the knowledge area of this system, discussing how a computer program can be developed for educational use and what are the relevant features of a system for this purpose.

The creation of a knowledge-based system is made by the following stages: selection of a development tool, knowledge acquisition and representation, implementation, computational verification and validation. Those stages are shown through this text. The difficulties found on this expert system prototype development, mainly the knowledge acquisition of hydraulic power units design, are also discussed in details.

Finally, this text presents the results of this MSc project: the organized HPU design systematization and the current stage of the expert system prototype development, which can select one of a four available HPUs and the class and working principle of the employed hydrostatic pump. In addition, the thesis shows inherent limitations on the difficulties found throughout its development and some possibilities of improvement and other uses, as suggestions for future researches, of an expert system directed towards hydraulic power units design.

Keywords: expert systems, hydraulic power units

1. Introdução e Objetivos

1.1. Comentários iniciais sobre esta pesquisa

Este texto discorre sobre as pesquisas realizadas sobre a aplicação da Engenharia do Conhecimento na solução de problemas da Engenharia Mecânica, em especial para tarefas da Hidráulica. Para tanto, foram estudados os sistemas especialistas, isto é, programas de computador que procuram emular a habilidade de especialistas humanos na resolução de problemas restritos; e o projeto de unidades de potência hidráulica, o domínio de problema considerado. Além destes, foi também pesquisada a aplicação de sistemas baseados em conhecimento na educação (os sistemas de ensino inteligentes), como forma de propor o desenvolvimento de sistemas de ensino para a engenharia.

A Engenharia do Conhecimento é um processo ainda pouco explorado tanto por empresas nacionais como pela pesquisa acadêmica brasileira, que propõe a aquisição do conhecimento necessário para uma determinada tarefa, como projeto, classificação e escolha de componentes, a fim de estruturá-lo e codificá-lo em um programa de computador, denominado sistema baseado em conhecimento (SBC). Além destas aplicações classificadas como operacionais, os SBCs também podem ser criados para fins educacionais, aplicáveis aos primeiros anos escolares, como o sistema apresentado por Giraffa (1999), até a profissionais já formados, tais quais os exemplos mostrados por Ong e Ramachandran (2000).

Diversas vantagens podem ser obtidas pelo uso da Engenharia do Conhecimento em atividades técnicas e científicas, dentre as quais podem ser citadas a permanência de conhecimento para uso posterior (chamado de *memória corporativa* nas empresas), a diminuição no tempo da atividade realizada e a maior qualidade dos resultados da tarefa. Na Engenharia Mecânica em especial, são exemplos de sistemas baseados em conhecimento os protótipos de sistema especialista desenvolvidos por Silva (1998) e Alves (2001), o sistema especialista SEGRed¹, para gerenciamento de redes de gás natural, e aplicativos criados através do sistema ICAD, da Knowledge Technologies International (KTI)², usado em indústrias automobilísticas e aeroespaciais.

O desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento é iniciado pela definição da tarefa que ele abordará. No caso específico de sistemas especialistas, o domínio de

¹ <http://www.laship.ufsc.br/segred>

² <http://www.ktiworld.com>

problema deve ser relativamente restrito, deve ter um conhecimento bem fundamentado e deve ter à disposição especialistas interessados na colaboração da criação do sistema. Dentro da Engenharia Mecânica, uma área de conhecimento já pesquisada na UFSC para o desenvolvimento de sistemas especialistas é a Hidráulica (SILVA,1998; ALVES, 2001). Silva (1998) desenvolveu um protótipo (uma versão do sistema para estudo e avaliação do domínio de problema considerado) para o projeto conceitual de sistemas hidráulicos. Seguindo esta linha de pesquisa, para a criação de um protótipo de sistema especialista neste trabalho foi escolhido como domínio de problema o projeto de unidades de potência hidráulica; os motivos da escolha serão apresentados na próxima seção.

Os responsáveis pelo desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento são chamados de engenheiros do conhecimento. Para realizar esta atividade, algumas das características importantes que estes profissionais devem ter são: entendimento das técnicas para a criação do sistema; compreensão, mesmo que básica, do domínio de problema a ser estudado; bom relacionamento pessoal; e boa capacidade de comunicação.

As atividades deste trabalho, bem como as justificativas para o estudo do projeto de unidades de potência hidráulica como domínio de problema considerado, estão apresentados a seguir.

1.2. Objetivos e Justificativas

Esta pesquisa foi centrada no desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento para a engenharia; em particular, no estudo sobre a criação de um protótipo de sistema especialista voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica. Para tanto, o autor assumiu o papel do engenheiro do conhecimento do protótipo. Neste contexto, os objetivos traçados para este trabalho foram:

1. Aquisição de conhecimento sobre projeto de unidades de potência hidráulica;
2. Sistematização de uma seqüência de projeto para posterior implementação em um sistema especialista;
3. Representação e implementação computacional do conhecimento adquirido; e
4. Verificação e validação do conhecimento sobre projeto de unidades de potência hidráulica implementado em um sistema especialista.

Os objetivos são coerentes com o modelo de desenvolvimento de sistemas especialistas adotado na pesquisa: no modelo incremental, as atividades são iterativas e

envolvem etapas de aquisição e representação de conhecimento, implementação computacional e verificação e validação do protótipo criado.

Sobre o domínio de problema considerado, observações feitas por Silva (1998) indicam que a atividade de projeto de sistemas hidráulicos possui conhecimentos bem fundamentados e disponíveis, mas que não estão metodologicamente organizados. A fim de adequar o estudo desta tarefa ao tempo destinado para a conclusão do mestrado, foi decidido pesquisar o projeto de um dos circuitos do sistema hidráulico, a unidade de potência hidráulica. Conforme será discutido no terceiro capítulo, o domínio de problema escolhido é apropriado para o desenvolvimento de um sistema especialista.

A escolha do projeto de unidades de potência hidráulica como domínio de problema também reflete a preocupação com a sua importância dentro da Hidráulica. As unidades de potência hidráulica são o “coração” de qualquer sistema hidráulico, e o seu bom funcionamento é fundamental para uma operação adequada do sistema. O projeto de unidades de potência hidráulica, na literatura especializada, está centrado na seleção e análise de cada componente em separado; não obstante a importância didática e a orientação para projeto permitidas por essa abordagem, é necessária uma análise da unidade de potência como um circuito, por causa dos inter-relacionamentos dos componentes que a constituem. Assim, determinar como especialistas lidam com o projeto de unidades de potência hidráulica é de grande interesse para a Hidráulica, sendo mais um motivo para a escolha deste domínio de problema no desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista.

Quanto à pesquisa sobre sistemas de ensino inteligentes, os objetivos específicos foram:

- Pesquisar sobre os campos de conhecimento envolvidos com o desenvolvimento destes sistemas;
- Estudar as características dos sistemas baseados em conhecimento voltados à educação, e as possíveis estruturas (arquiteturas) de tais sistemas;
- Propor a aplicação de sistemas de ensino inteligentes para o ensino de Hidráulica, no domínio de problema considerado no protótipo.

Na prática, a criação de um sistema de ensino inteligente voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica depende primeiramente de uma boa organização do conhecimento sobre esta tarefa. Como a sistematização deste conhecimento foi um dos objetivos finais desta pesquisa, mesmo que existissem recursos e disponibilidade de indivíduos (alunos e professores) para teste de um sistema de ensino inteligente, somente foi

proposta a criação de um sistema de ensino baseado em projeto de unidades de potência, sem ser cogitada a realização concreta do seu desenvolvimento.

1.3. Motivações para o trabalho

Além das motivações pessoais do autor desta pesquisa, ele e o seu orientador entendem que os sistemas baseados em conhecimento são ferramentas computacionais promissoras, que devem ser continuamente pesquisadas e exploradas na nossa realidade. Devido às vantagens associadas a estes sistemas, algumas delas citadas em 1.1 e que serão retomadas no próximo capítulo (subseção 2.3.2), consideramos importante incentivar a busca de possibilidades de aplicação da Engenharia do Conhecimento em áreas da engenharia, como é o caso do protótipo desenvolvido neste trabalho.

Para a Hidráulica em particular, o desenvolvimento de um sistema para auxílio no projeto de unidades de potência hidráulica pode contribuir para uma organização do conhecimento necessário à resolução deste problema, complementando o conhecimento encontrado na literatura técnica e conseqüentemente auxiliando em uma melhor compreensão do processo de projeto deste domínio de problema. Ainda, pela inclusão de fatores como custos e manutenção, é possível aplicar conceitos de Engenharia Simultânea à sistematização de projeto de unidades de potência, melhorando desta maneira a qualidade geral do processo de projeto idealizada para esta pesquisa.

Por fim, a proposta de criação de um sistema de ensino inteligente, mesmo que incompleta, pode servir a futuros trabalhos que contemplem o estudo de estratégias de ensino para áreas técnicas e o desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento voltados à educação na engenharia.

1.4. Organização do texto

Esta dissertação possui seis divisões, sendo a primeira o presente capítulo, que faz os comentários iniciais sobre a pesquisa. Avançando no texto, o capítulo 2 trata dos sistemas baseados em conhecimento estudados neste trabalho, explicando as características e a arquitetura dos sistemas especialistas e as tarefas de desenvolvimento relacionadas; ainda são mostrados os sistemas de ensino inteligentes, incluindo aí a proposta de criação de um sistema de ensino para a Hidráulica.

Por sua vez, o terceiro capítulo apresenta conceitos e características de unidades de potência hidráulicas, e discorre sobre como seu projeto é abordado na literatura especializada

e como deve ser realizada a organização de um processo de projeto para o desenvolvimento de um sistema especialista. Também são mostrados no capítulo 3 os principais componentes de uma unidade de potência.

Enquanto os capítulos 2 e 3 tratam da base conceitual desta pesquisa, as realizações práticas deste trabalho são apresentadas no quarto capítulo, que mostra como foram feitas as tarefas de desenvolvimento do protótipo de sistema especialista, seguindo as etapas citadas em 1.2. São mostradas, por exemplo, as idéias para a aquisição de conhecimento e a proposta adotada no protótipo para a sistematização do projeto de unidades de potência hidráulica. No final do capítulo 4, ainda são discutidas as dificuldades encontradas na criação do protótipo, por causa da pouca interação com especialistas do domínio de conhecimento considerado.

O capítulo 5 é dedicado à validação do protótipo, a última etapa de desenvolvimento no modelo incremental, que foi realizada por dois especialistas em hidráulica. Finalizando este texto, o sexto capítulo mostra os resultados e as contribuições desta pesquisa, e apresenta sugestões para trabalhos futuros relacionados ao protótipo criado e a sistemas de ensino inteligentes para a engenharia.

2. Sistemas Baseados em Conhecimento

O objetivo deste capítulo é apresentar as aplicações práticas da Engenharia do Conhecimento - os Sistemas Especialistas e os Sistemas de Ensino Inteligentes – estudadas nesta pesquisa. Para tanto, a seção 2.1 aborda o que se entende neste trabalho sobre Inteligência Artificial e conhecimento, cujos conceitos são necessários para a definição, feita na seção 2.2, de sistemas baseados em conhecimento. O capítulo prossegue com as explicações sobre sistemas especialistas (seção 2.3), técnica empregada nesta pesquisa, e se encerra com uma discussão sobre os sistemas de ensino inteligentes (seção 2.4), uma possibilidade de aplicação dos sistemas baseados em conhecimento para educação.

2.1. Inteligência Artificial

2.1.1. Introdução

Qual seria a primeira lembrança de uma pessoa, quando o assunto é Inteligência Artificial (IA)? Provavelmente a imagem recordada seria a de um computador com capacidade de raciocínio (como o HAL 9000, de “2001, Uma Odisséia no Espaço”) ou de um robô com inteligência e sentimentos (tais quais os replicantes de “Blade Runner” ou o simpático Andrew de “O Homem Bicentenário”). Pode-se dizer que estes dois casos são o objetivo último da Inteligência Artificial, que ainda está longe de ser alcançado; para alguns, nunca o será. Como esses objetivos ainda estão mais no plano da ficção do que da realidade, o que se entende então como Inteligência Artificial, e o que se pode esperar dela nos dias de hoje?

Para John McCarthy (2002, p. 2, tradução nossa), um dos idealizadores da conferência de verão no Dartmouth College (EUA)³, onde pela primeira vez foi usado o termo “Inteligência Artificial”, IA é a “ciência e engenharia de criar máquinas inteligentes; em especial, programas de computador inteligentes. [A Inteligência Artificial] está relacionada à tarefa similar de usar computadores para entender a inteligência humana, mas a IA não tem que se confinar em métodos que são biologicamente observáveis”. Inteligência, neste caso, é a “parte computacional da habilidade de se atingir objetivos no mundo”. McCarthy e outros, contudo, afirmam que não há uma caracterização precisa do que seja inteligência, isto é, a IA

³ A proposta pode ser lida em <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>

ainda não é capaz de traduzir o cérebro de uma pessoa (isto é, suas capacidades) em um programa de computador. O que é possível é modelar alguns dos seus mecanismos de raciocínio, como reconhecimento de imagem e de texto. Para alguns pesquisadores e filósofos, como Hubert Dreyfus, essa idealização (criar uma máquina com uma inteligência semelhante a nossa) é errada, ou por ser imoral, ou por sua concepção ser incoerente, ou simplesmente por ser impossível. Discussões à parte, acredita-se aqui que seja possível sistematizar e implementar computacionalmente as etapas de decisão (em outras palavras, de raciocínio) de certos problemas práticos, como o projeto de sistemas hidráulicos, caracterizando assim um “comportamento inteligente”, e não uma inteligência como a nossa, dos programas de computador criados para a resolução de tais problemas.

A definição de Inteligência Artificial apresentada anteriormente ainda é um tanto quanto vaga para os objetivos do presente trabalho. Uma abordagem mais voltada à engenharia da IA, e mais adequada na caracterização da sua aplicação no desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento, é afirmar que a Inteligência Artificial procura “gerar *representações de conhecimento e procedimentos* que automaticamente (de maneira autônoma) resolvam problemas anteriormente solucionados por pessoas” (SCHALKOFF, 1990, p. 2, tradução nossa). Para sistemas especialistas, programas de computador que procuram reproduzir o comportamento de especialistas humanos na resolução de problemas restritos, as técnicas de representação de conhecimento incluem *regras, redes semânticas e objetos*, enquanto os procedimentos são os mecanismos de raciocínio (a *máquina de inferência* e o tipo de *encadeamento* de raciocínio) para se chegar a um resultado desejado. Estas representações e procedimentos estão apresentados com mais detalhes na seção 2.2.

2.1.2. Fatos sobre a Inteligência Artificial

Construída a partir de idéias filosóficas, científicas e tecnológicas herdadas de outras ciências, como a lógica, que data do século IV A.C., a Inteligência Artificial só tomou corpo como ciência no século XX, com o advento da eletrônica e do computador digital. Até então, só existiam mecanismos mecânicos que imitavam algum comportamento humano em atividades limitadas a poucos resultados possíveis, chamados de *autômatos*, e *máquinas de calcular*, também mecânicas, que levaram ao surgimento dos computadores que hoje conhecemos (BITTENCOURT, 1998). Com a eletrônica, W. Grey Walter criou, no início de 1950, um dos primeiros dispositivos conhecidos de IA: “tartarugas” (*tortoises*) robóticas que, apesar de serem tecnicamente simples, podiam se mover no solo desviando-se de obstáculos e, quando suas baterias estavam acabando, procuravam a fonte de energia mais próxima para

se recarregar e continuar suas “aventuras” no solo (PENROSE, 1989). Por seus “animais” robotizados, Walter foi considerado um dos pais da cibernética, juntamente com Norbert Wiener e Warren McCulloch.

Mas foi a partir da construção dos primeiros computadores movidos à válvula, na década de 1940, que a idéia da criação de máquinas inteligentes ganhou força por encontrar um meio excelente para seu desenvolvimento. McCarthy acredita que Alan Turing foi o primeiro indivíduo a idealizar a construção de máquinas inteligentes, em uma palestra sobre o assunto em 1947, e também o primeiro a decidir que a IA poderia ser melhor pesquisada pela programação de computadores (McCARTHY, 2002). Turing é o autor do artigo “Computing Machine and Intelligence”⁴, que apresenta um teste prático para verificar se uma máquina é inteligente ou não. Apesar de ter sido contestada por filósofos e pesquisadores, esta foi a primeira tentativa de estabelecer um critério para provar a capacidade de raciocínio de um dispositivo. Por isso, este artigo é considerado um dos marcos iniciais da Inteligência Artificial, juntamente com a discussão de Claude Shannon sobre como uma máquina pode ser programada para jogar xadrez (McCARTHY; HAYES, 1969).

A partir das idéias destes e de outros filósofos e cientistas, duas linhas principais de pesquisa de IA em computadores se destacaram: a *conexionista*, que procura modelar o funcionamento de redes de neurônios, e a *simbólica*, que interessa a este trabalho e que busca a solução de problemas por meio de manipulações simbólicas. A IA simbólica pode ser dividida em três “épocas” (BITTENCOURT, 1998):

- A *clássica*, de 1956 a 1970, onde a grande meta foi criar sistemas que pudessem resolver qualquer tipo de problema, e que fatalmente acabou fracassando;
- A *romântica*, de 1970 a 1980, que buscava construir teorias para simular a inteligência humana em situações específicas, mas que não procurava construir programas práticos; e
- A *moderna*, entre 1980 e 1990, cujo objetivo foi desenvolver sistemas especialistas para simular o comportamento de um especialista humano em domínios específicos.

Atualmente, a inteligência artificial simbólica se divide em várias áreas, como sistemas especialistas, tratamento de informação imperfeita e modelagem cognitiva. Por fim, uma outra linha de pesquisa em IA está evoluindo, baseada na observação de mecanismos

⁴ Disponível em <http://cogprints.ecs.soton.ac.uk/archive/00000499/00/turing.html>

evolutivos encontrados na natureza; os seus modelos mais conhecidos são os algoritmos genéticos e os autômatos celulares.

2.1.3. Conhecimento e Representação do Conhecimento

Além das controvérsias existentes na definição de inteligência, incluindo uma determinação única sobre o conceito de inteligência artificial, outra idéia que não apresenta um consenso entre filósofos e pesquisadores é a referente ao termo conhecimento. Para a epistemologia - ramo da filosofia que estuda o conhecimento, sua natureza, suas fontes e sua validade - tradicional, conhecimento pode ser descrito como uma “crença verdadeira justificada” (DUTRA, 2000). Um dos problemas dessa explicação, contudo, é definir o que é a justificativa de uma crença verdadeira; não há um conceito considerado ideal sobre este ponto. Outros assuntos, como a maneira na qual conhecimento é adquirido e a natureza do conhecimento, são também objetos de debates dentro da epistemologia.

Para os objetivos do presente trabalho, a descrição mais objetiva feita em (GIARRATANO; RILEY, 1994) é adequada: conhecimento faz parte de uma hierarquia formada também por ruído, dados, informação e meta-conhecimento (ou seja, conhecimento sobre conhecimento), conforme a Figura 2.1.

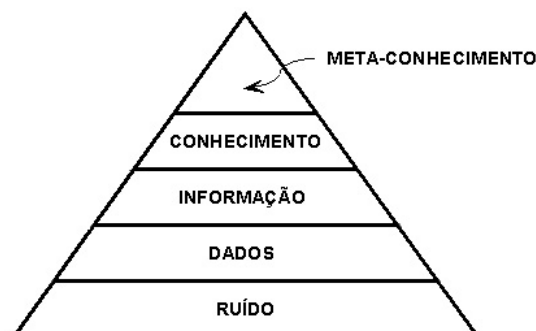


Figura 2.1: Hierarquia do conhecimento (GIARRATANO; RILEY, 1994)

A interpretação ou análise de dados, os itens de potencial interesse no ruído, é o que gera informação, e a especialização ou síntese dessa é o que representa o conhecimento. Um exemplo da diferença entre dados, informações e conhecimento na hidráulica está descrito em (ALVES, 2001): um valor qualquer de pressão, como 0,2 bar, é um dado; se associarmos este valor à pressão da linha de aspiração de uma bomba, tem-se então uma informação (a pressão de sucção é 0,2 bar); por fim, se um profissional na área de hidráulica sabe que valores maiores de 0,16 bar são considerados anormais em uma determinada condição de operação de

sistemas hidráulicos, então ele gera um conhecimento a respeito desta informação: como pressão de sucção está maior que 0,16 bar, e em uma situação específica pressões maiores de 0,16 bar são consideradas anormais, então a pressão na linha de aspiração está anormal.

Neste contexto, a experiência é um tipo de conhecimento especializado e implícito que especialistas possuem, que não é geralmente encontrado em fontes públicas como livros e artigos e que deve ser adquirido e explicitado para poder ser codificado em um programa de computador. O conhecimento de um especialista é específico para um *domínio de problema* (no caso desta pesquisa, o projeto de unidades de potência hidráulica, abordado no próximo capítulo), e não conhecimento sobre técnicas de solução de problemas gerais. O *domínio de conhecimento* é, por sua vez, o conhecimento especialista usado para a solução de problemas em um domínio de problema específico (GIARRATANO; RILEY, 1994).

Para que conhecimento possa ser codificado em um programa de computador, é necessário que ele seja formalizado. A seleção de uma técnica de *representação do conhecimento*, como lógica de primeira ordem, modelo nebuloso, regras de produção, objetos, redes semânticas, entre outros, é parte importante no desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento: representações adequadas devem ser escolhidas para que o sistema possa ser capaz de cumprir os seus requisitos e chegar a resultados satisfatórios. Deve-se ter em mente que representações são modelos, ou “substitutos da realidade”, que possivelmente não podem ser igualados ao conhecimento em si; porém, são suficientemente adequadas para a compreensão e a codificação de algumas das etapas de raciocínio de um indivíduo na resolução de problemas. Já algumas teorias sobre a natureza do conhecimento na IA, como a situacionista (CLANCEY, 1995, 1998), não admitem que seja possível aprender por meio de representações como regras e redes de inferência, porque elas sempre seriam descrições pobres do conhecimento real.

Consideram-se três dimensões de adequação para uma representação de conhecimento (McCARTHY; HAYES, 1969): a metafísica - se a representação não apresenta contradições com a realidade; a epistemológica - se a representação pode ser usada na prática para representar fatos de interesse; e a heurística - se os processos de raciocínio necessários para a solução de problemas podem ser descritos pela representação. Esta última adequação merece um comentário maior aqui, já que ela acaba determinando a utilidade de um SBC: como analisar se uma ou mais representações de conhecimento são heurísticamente adequadas? Assumindo que o conhecimento é um conjunto de fragmentos, ou seja, partes que são acessadas pelo raciocínio, a adequação heurística pode ser analisada sob dois aspectos: quanto às propriedades dos fragmentos propriamente ditos e quanto às estruturas que os contêm (BITTENCOURT, 1998). As propriedades dos fragmentos são:

- *Granularidade* ou o nível de detalhe da correspondência entre os elementos de conhecimento real e os fragmentos de conhecimento codificados;
- *Disponibilidade* ou como os fragmentos de conhecimento são representados explicita ou implicitamente dentro da estrutura de representação;
- *Credibilidade* ou a medida do grau de incerteza associada aos fragmentos de conhecimento, no caso destes modelarem um conhecimento incerto.

Por sua vez, as propriedades relativas à estrutura dos fragmentos são:

- *Modularidade* ou a facilidade de adicionar ou modificar fragmentos de conhecimento em uma representação. Objetos em linguagens de programação orientadas a objetos, por exemplo, permitem modularizar fragmentos de conhecimento;
- *Reflexividade* ou a capacidade de reproduzir explicitamente a estrutura de representação utilizada na reprodução do conhecimento real, o que permite ao sistema prover explicações sobre o processo de raciocínio usado.

Estes aspectos definem várias características desejáveis a uma boa representação de conhecimento (SCHALKOFF, 1990), como *aplicabilidade* e *integridade*, ou a representação precisa e completa do que se quer modelar; *flexibilidade* e *capacidade de expansão* do modelo; *consistência* da representação, como regras não contraditórias; entre outras.

2.2. Sistemas Baseados em Conhecimento e Engenharia do Conhecimento

Postas as explicações pertinentes para este trabalho sobre inteligência e conhecimento, é possível fazer uma definição de *sistemas baseados em conhecimento*. Tais sistemas são programas de computador que possuem uma *base de conhecimento* referente a um domínio de problema, um *mecanismo de raciocínio* e uma *base de fatos* (dados ou informações) referentes ao problema. Os SBCs servem para o auxílio em tarefas como ensino, diagnóstico, projeto, seleção e classificação.

Dentro deste contexto, os sistemas especialistas são um dos possíveis tipos de SBC existentes; por isso, não é muito adequado usar o termo sistema especialista como sinônimo de sistema baseado em conhecimento. O conhecimento usado por um educador para favorecer em seus alunos uma compreensão sobre um assunto específico é substancialmente diferente do conhecimento usado por um especialista para chegar a uma solução de um determinado problema. Analogamente, pode-se dizer que os propósitos de sistemas especialistas são diferentes dos usos de sistemas de ensino inteligentes. Assim, uma divisão dos tipos de SBCs

levaria em conta o conhecimento necessário e o propósito do sistema. Apesar dessas diferenças, não existe ainda um consenso relativo a possíveis subclassificações de sistemas baseados em conhecimento. Criar uma classificação para SBCs está fora do escopo desse trabalho, mas é importante ter em mente esta diferenciação.

Chama-se de *Engenharia do Conhecimento* o processo que envolve as técnicas de desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento. O *engenheiro do conhecimento* é, portanto, um profissional responsável pela estruturação e criação de um SBC, que adquire conhecimento de alguma fonte, interpreta-o e representa-o em tipos e estruturas convenientes. Algumas das características importantes para este profissional são: conhecimento da tecnologia sobre sistemas baseados em conhecimento, entendimento do domínio de conhecimento do programa, bom relacionamento pessoal e boa capacidade de comunicação. O engenheiro do conhecimento do protótipo PHIDR, desenvolvido nesta pesquisa, foi o próprio autor do trabalho.

O desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento pode ser feito completamente com uma linguagem de programação como PROLOG ou LISP; porém, existem ferramentas computacionais especialmente desenvolvidas para a criação de SBCs, como o sistema *ICAD*, da Knowledge Technologies International⁵ (KTI) e o ambiente *C Language Integrated Production System* (CLIPS), desenvolvido pela NASA, que já possuem implementado o mecanismo de raciocínio necessário ao SBC. A adoção de uma ferramenta ou linguagem em particular depende de vários fatores, como a forma de representação do conhecimento que ela permite, os custos envolvidos, o treinamento necessário na sintaxe de programação etc. A ferramenta usada no desenvolvimento do protótipo deste trabalho está descrita no capítulo 4.

2.3. Sistemas Especialistas

2.3.1. Estrutura de um Sistema Especialista

Um *sistema especialista* (SE) pode ser definido como “um programa inteligente de computador que usa conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são suficientemente difíceis para requerer significativa experiência humana em sua solução” (Edward Feigenbaum, da Universidade de Stanford, citado em GIARRANTANO; RILEY, 1994, p. 1, tradução nossa). Sistemas especialistas são desenvolvidos para agir como um

⁵ <http://www.ktiworld.com>

especialista humano - em outras palavras, para emular um especialista – nas suas capacidades de tomada de decisão sobre um domínio de conhecimento restrito. A estrutura genérica de um sistema especialista, cujos componentes estão apresentados a seguir, é mostrada na Figura 2.2 (SILVA; BACK, 2000).

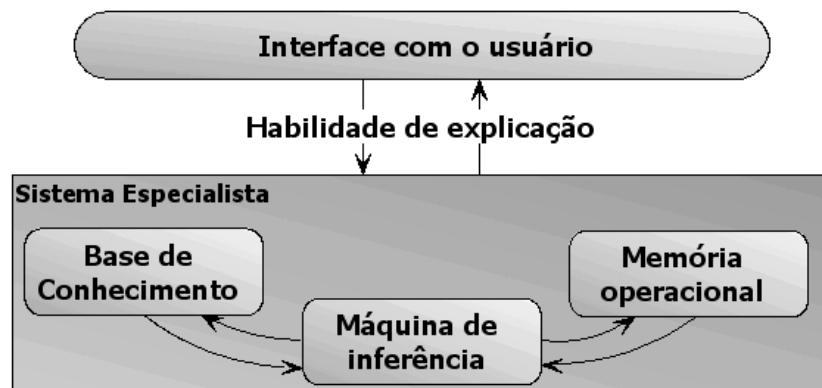


Figura 2.2: Estrutura de um Sistema Especialista (adaptado de GIARRANTANO; RILEY, 1994)

Algumas características fundamentais de um sistema especialista podem ser destacadas na definição anteriormente citada. Primeiramente, é citado o uso de “conhecimento e procedimentos de inferência” para a resolução de problemas; para possuir conhecimento e realizar inferências, dois componentes são essenciais a um SE: a *base de conhecimento* e a *máquina de inferência*. A base de conhecimento é a parte do programa que contém o domínio de conhecimento do problema, que deve ser codificado de maneira inteligível para ser facilmente modificado e/ou reutilizado. O conhecimento é de natureza predominantemente heurística e pode ser representado como regras, conceitos (objetos ou quadros - *frames*) e relacionamentos (redes semânticas). A forma de representação do conhecimento no sistema especialista, conforme item 2.3.6, dependerá da análise do domínio considerado. Por sua vez, a escolha da ferramenta de desenvolvimento depende da forma de representação definida.

Filosoficamente, inferência representa o ato pelo qual o espírito humano associa as idéias e as sanções (AULETE, 1986). Nos sistemas especialistas, ela pode ser entendida como o processo para se chegar a uma solução, resposta ou conclusão, a partir de um determinado conhecimento inicial (GONZALEZ; DANKEL, 1993). A máquina de inferência é, portanto, o componente que permite que o SE realize inferências decidindo quais regras são satisfeitas por fatos (isto é, dados relativos ao problema abordado) ou objetos, priorizando as regras atendidas, e executando seqüencialmente as regras de maior prioridade. Chama-se de *agenda* a lista de regras criada pela máquina de inferência; esta lista é dinâmica, isto é, muda de acordo com novos fatos e objetos que surgem no decorrer do processo de solução do problema.

Para guardar as informações relevantes ao problema (os fatos), o sistema especialista deve possuir uma *memória operacional*; a depender da ferramenta de desenvolvimento escolhida, a memória operacional é modelada por funções pré-definidas, o que torna mais fácil a criação do sistema. Aqui, uma analogia com um ser humano pode ser feita: a memória operacional do sistema seria a *memória de curto prazo* do especialista humano, enquanto a base de conhecimento poderia ser considerada a *memória de longo prazo* do indivíduo. Esta comparação ajudou o início do desenvolvimento dos sistemas especialistas na área da Inteligência Artificial.

Voltando à definição citada para sistemas especialistas, é interessante destacar também a afirmação de que estes sistemas são criados para resolver problemas os quais necessitam de “significativa experiência humana em sua solução”. Certamente, a viabilidade de desenvolvimento de um SE deve considerar que os seus objetivos são relevantes para uma organização, por razões de custo/benefício envolvidas, sendo ainda fundamental a experiência e conhecimento de especialistas no domínio de problema considerado. Estes pontos devem ser analisados antes da criação de um sistema especialista.

A fim de emular um especialista humano, o SE deve possuir um componente que o permita interagir com o operador do programa. Esta parte do sistema especialista é a *interface com o usuário*, que deve ser o mais “amigável” possível (por meio de menus, gráficos, linguagem familiar ao usuário, entre outras características) a fim de facilitar a tarefa de quem utiliza o sistema. A interface pode ser utilizada para diversos fins, tais como (GONZALEZ; DANKEL, 1993):

- Possibilitar ao sistema fazer perguntas ao usuário sobre o problema considerado;
- Fornecer explicações sobre a razão das perguntas realizadas;
- Possibilitar ao usuário questionar o sistema sobre as conclusões indicadas;
- Visualizar os resultados obtidos, fornecendo explicações e informações relevantes;
- Permitir ao usuário gravar ou imprimir resultados.

Observa-se nestes fins uma característica fundamental para os sistemas especialistas: a *habilidade de explicação* do programa, em relação às etapas de solução e às conclusões obtidas. Esta capacidade de explicação deve ser sempre buscada pelos engenheiros de conhecimento, para o sistema ser capaz de justificar as perguntas e respostas formuladas pelo sistema para o usuário, facilitando o entendimento deste sobre os questionamentos realizados e resultados alcançados. Outros pontos mostram a importância da capacidade de explicação de um SE (SILVA, 1998): durante a fase de desenvolvimento, pode servir para corrigir erros de

sintaxe ou conceitos mal entendidos pelo engenheiro do conhecimento; e também para o entendimento sobre o funcionamento do sistema, por parte dos envolvidos no desenvolvimento do SE, o que é difícil de ser feito somente através da leitura do código computacional do programa.

A maior ou menor capacidade de explicação de um sistema especialista estará sujeita ao seu público-alvo: dependendo do nível de entendimento do usuário final sobre o domínio de conhecimento, um sistema deverá ser mais ou menos minucioso nas suas explicações e questionamentos. Porém, deve-se lembrar que mesmo para um público já experiente no domínio de problema diferenças de terminologia, simbologia e outros pontos podem ocorrer; isto também deve ser considerado com cuidado no desenvolvimento do sistema especialista.

Por fim, um último componente que um SE pode ter é um mecanismo de *aquisição de conhecimento*, que permite ao usuário adicionar conhecimento diretamente ao sistema, sem a necessidade de implementação pelo engenheiro do conhecimento. Contudo, Giarratano e Riley (1994) afirmam que as regras geradas por indução através de exemplos criados por informações de tabelas tendem a ser menos complexas do que aquelas criadas por engenheiros de conhecimento.

Outros fundamentos a respeito do desenvolvimento de um SE, que envolve aquisição e representação de conhecimento por meio de regras, objetos, redes semânticas etc., estão apresentados posteriormente neste capítulo.

2.3.2. Vantagens dos Sistemas Especialistas

A literatura ilustra diversas vantagens da utilização de sistemas especialistas para solução de problemas em domínios restritos. Segundo Giarrantano e Riley (1994), alguns destes benefícios, relevantes à pesquisa em projeto de unidades de potência hidráulica, são:

- *Aumento da disponibilidade de conhecimento*: a experiência pode tornar-se disponível pela sistematização do seu conhecimento em um sistema baseado em conhecimento;
- *Permanência*: a experiência e conhecimento de especialistas estarão sempre disponíveis para consultas futuras, mesmo se o especialista não estiver mais disponível por alguma razão;
- *Múltiplas especialidades*: diversos especialistas podem contribuir para a base de conhecimento de um SE, de modo que o conhecimento de todos eles possa trabalhar simultânea e continuamente em um problema, a qualquer tempo;

- *Aumento da confiabilidade*: as respostas de um SE são baseadas em uma base de conhecimento permanente, que usa sempre as mesmas condições para se chegar a um resultado confiável, a menos que erros tenham sido cometidos durante o desenvolvimento do sistema. Não há problemas de cansaço ou situações de estresse como os que podem fazer um especialista humano errar.
- *Explicação*: a capacidade de explicação do sistema especialista pode aumentar a confiança do usuário na solução obtida. Especialistas humanos podem, por várias razões, não prover explicações sobre as razões adotadas para se chegar a uma conclusão.
- *Respostas rápidas*, que permite ao usuário agilizar o seu trabalho;
- *Respostas completas e consistentes*: além de garantir qualidade, aumentam a confiança nas soluções encontradas;
- *Alto desempenho*: o SE deve obter respostas em um nível de competência igual ou superior a um especialista no domínio de conhecimento considerado, para que seja considerado bem sucedido.

2.3.3. Desvantagens dos Sistemas Especialistas

Algumas das desvantagens mais críticas no desenvolvimento e na aplicação de sistemas especialistas estão mostradas a seguir (GONZALEZ; DANKEL, 1993), e devem ser analisadas na aplicação desta técnica:

- Existe uma certa dificuldade em mapear conhecimento de senso comum, chamado também de conhecimento genérico, o que pode comprometer a base de conhecimento e conseqüentemente as respostas do sistema especialista;
- Devido à natureza predominantemente heurística da base de conhecimento do SE, as respostas podem não estar sempre corretas: os especialistas humanos estão sujeitos a erros nas suas concepções. Existe ainda a possibilidade de que uma consideração inicial mal feita se propague por todo o processo de solução do problema. Tais problemas, além de comprometer os resultados finais do sistema especialista, podem atrapalhar a utilização do SE por usuários inexperientes;
- A atividade de aquisição do conhecimento através de especialistas pode se tornar complicada ou impossível caso o especialista não saiba como explicitar o seu conhecimento ou simplesmente não queira fazê-lo.

2.3.4. Desenvolvimento de Sistemas Especialistas

Tal como em um programa, o processo de desenvolvimento de um sistema especialista é comumente dividido em etapas definidas pelos engenheiros de conhecimento de acordo com os recursos e natureza do problema. Utilizado nas pesquisas de Silva (1998) e Alves (2001), e recentemente adotado no desenvolvimento do sistema SEGRed⁶, o modelo de *desenvolvimento incremental* foi o escolhido para ser usado neste trabalho. A idéia básica deste modelo é desenvolver um programa de computador através de incrementos de sua funcionalidade, o que pode ser traduzido para o contexto de sistemas especialistas principalmente como um acréscimo de conhecimento na sua base, ampliando a sua capacidade de realização de uma determinada tarefa. Estes incrementos são mais fáceis de testar, verificar e validar do que o desenvolvimento em grandes estágios de programação, e se ajustam melhor à aquisição gradual de conhecimento para sistemas especialistas. Outras considerações sobre como foi previsto o desenvolvimento do protótipo de SE desta pesquisa estão feitas no capítulo 4.

Uma definição mais completa sobre desenvolvimento incremental, aplicado à criação de sistemas especialistas, foi feita por Gonzalez e Dankel (1993): é o processo iterativo de *aquisição, representação e confirmação de conhecimento* em uma parte limitada do domínio do problema, com o objetivo de construir de maneira incremental a base de conhecimento do sistema especialista. Portanto, as fases de desenvolvimento de um SE são:

- Aquisição de conhecimento;
- Representação do conhecimento;
- Implementação; e
- Verificação e validação do conhecimento implementado.

De acordo com a idéia de desenvolvimento incremental do sistema, cada “pacote” de conhecimento necessário para a realização de determinadas funções ou tarefas é adquirido, representado, implementado computacionalmente, verificado e validado. Como na criação de sistemas especialistas geralmente não se sabe *a priori* a extensão de conhecimento necessário para o domínio de conhecimento do problema, o modelo incremental mostra-se mais indicado no desenvolvimento de SEs.

⁶ <http://www.laship.ufsc.br/segred>

2.3.5. Aquisição do Conhecimento

A primeira das fases citadas, a aquisição do conhecimento, é possivelmente a fase mais complicada para o desenvolvimento de sistemas especialistas. Hubert e Stuart Dreyfus (1998) afirmam inclusive não ser possível capturar, com as técnicas atualmente usadas, o que um especialista conhece porque simplesmente ele não pensaria em termos de regras na resolução de problemas. Saber como lidar com especialistas do domínio, para adquirir o conhecimento necessário à realização de uma tarefa, é de vital importância para o sucesso da criação do sistema.

A fase de aquisição começa na definição de fontes de conhecimento disponíveis (livros, catálogos de fabricantes, artigos, especialistas, entre outros). Para especialistas da área, deve-se verificar se são acessíveis, em termos de tempo, custos envolvidos e outras variáveis; caso seja possível contar com o especialista, o conhecimento pode ser obtido com entrevistas formais ou não estruturadas, com observações de como ele trabalha para a solução de um problema e de como ele se comporta em tarefas difíceis, entre outras possibilidades. As idéias sobre a aquisição de conhecimento nesta pesquisa estão abordadas na subseção 4.2.2.

2.3.6. Representação do Conhecimento

Existem diversas formas de representação do conhecimento adquirido na base de conhecimento do sistema especialista. A escolha de uma determinada representação depende fundamentalmente da avaliação do domínio de conhecimento considerado; a seleção de uma determinada ferramenta para a criação do SE é feita de acordo com a representação escolhida.

Ferramentas de desenvolvimento como o *shell* CLIPS suportam representações do conhecimento por meio de *regras*, *objetos* e *redes semânticas*, que, devido às suas características, servem para modelar o conhecimento necessário para a solução de problemas complexos em engenharia, como é o caso do projeto de unidades de potência hidráulica. Estes três tipos de representações estão definidos a seguir.

2.3.6.1. Regras

Regras são procedimentos do tipo “se-então”, onde duas partes se destacam: a condição, que são as premissas que devem ser satisfeitas para que a regra tenha efeito, e o efeito, que define os procedimentos a serem realizados quando a condição for atendida. Por

exemplo, para a escolha de uma bomba, um dos componentes de unidades de potência hidráulicas, uma regra simples tirada da literatura é (von LINSINGEN, 2001):

SE é necessária alta pressão no sistema

E é necessário alto rendimento volumétrico

ENTÃO a escolha de uma bomba de pistões é aconselhável

Apesar de modelar com suficiente adequação a forma de raciocínio que um especialista usa para chegar a um resultado, a representação por regras não é suficientemente poderosa na solução de problemas complicados, pois não tem uma grande capacidade de representar entidades complexas (DYM; LEVITT, 1991). Por isso, quando o problema a ser resolvido é complexo, geralmente o engenheiro do conhecimento opta por usar, juntamente com regras, outras formas de representação, como os objetos e redes semânticas. As regras usadas na base de conhecimento do protótipo PHIDR podem ser vistas esquematicamente na seção 4.3.

2.3.6.2. *Objetos, Classes e Instâncias*

Objetos são “pacotes” de informação que contém uma coleção de dados (os *atributos* ou *variáveis*) e de procedimentos (os *métodos*) relacionados, por exemplo, a uma determinada divisão de um sistema real. No contexto de unidades de potência hidráulica, possíveis objetos são bombas hidráulicas, reservatórios, filtros etc.

O conceito de objeto é simples, mas poderoso. Objetos são módulos de programação ideais porque podem ser definidos e mantidos independentemente de qualquer outro, com cada objeto formando um universo fechado. Tudo o que o objeto “sabe” é expresso em suas variáveis; tudo o que pode fazer é expresso em seus métodos (TAYLOR, 1990).

Devido ao fato de que vários objetos do mesmo tipo podem ser necessários na solução de um problema, as linguagens orientadas a objetos trazem a possibilidade de criação de *classes* de objetos, ou seja, modelos que definem os métodos e variáveis de um determinado tipo de objeto. Classes mais específicas, chamadas de *subclasses*, também podem herdar atributos e procedimentos de outras classes (as *superclasses*), uma característica poderosa (a *herança*) de linguagens orientadas a objeto. As subclasses também podem definir seus próprios procedimentos e atributos, e redefinir, se for o caso, os métodos e variáveis herdados. Esta propriedade, que permite a uma subclasse comportar-se diferentemente da(s) sua(s) superclasse(s), é chamada de *polimorfismo*. Com as classes, é simplificada a modularização

do código do programa, sendo facilitada a inserção de novos componentes, ou a modificação dos já existentes. Na versão atual do protótipo de sistema especialista desenvolvido neste trabalho (seção 4.2) foram implementadas duas classes, uma para as unidades de potência hidráulica e outra para os subtipos de bombas hidrostáticas, de acordo com o seu princípio de deslocamento, conforme descrito na seção 3.2.1.

As *instâncias*, por fim, são objetos de classes com valores particulares para os seus atributos, que são criadas durante uma interação do sistema com o usuário. Assim, voltando ao caso de unidades de potência hidráulicas, se existisse uma classe *bomba* cujo um dos atributos fosse o seu princípio de deslocamento, seriam diferentes objetos desta classe as bombas de engrenagens, as de palhetas, as por parafusos e as de pistões. Instâncias seriam bombas de determinado tipo que tivessem valores distintos para, por exemplo, seus deslocamentos volumétricos. Certamente, em uma classe para representar bombas existem muitas outras variáveis importantes, como as pressões e vazões de trabalho, a presença/ausência de compensação interna de forças e vazamentos, a possibilidade de variação de pressão ou vazão de trabalho, entre outros. O importante aqui é ilustrar como instâncias diferem-se entre si.

Além da *herança* e do *polimorfismo*, outras propriedades das linguagens orientadas a objeto são importantes para a modelagem computacional de sistemas complexos: o *encapsulamento* e a *abstração* (GONZALEZ; DANKEL, 1993). Encapsulamento refere-se a ocultar seqüências de procedimentos em módulos do código; abstração, a ignorar aspectos de alguma entidade que não são relevantes ao problema em questão. A compreensão destas características auxilia o trabalho de desenvolvimento do sistema especialista, e a sua aplicação torna a técnica de orientação a objeto uma metodologia poderosa para representação do conhecimento (SILVA, 1998).

2.3.6.3. *Redes Semânticas*

Inicialmente desenvolvidas para uso em modelos psicológicos da memória humana, as redes semânticas se transformaram em uma forma padrão de representação de conhecimento para sistemas especialistas.

As redes semânticas representam o conhecimento por meio de nós e arcos. Os primeiros representam objetos, situações ou conceitos relacionados ao domínio considerado; os arcos, por sua vez, descrevem as relações ou associações entre os nós, conectando-os assim em uma “rede”. Os tipos mais comuns de ligações são “faz parte de” e “é um(a)”.

As redes semânticas facilitam a visualização de como os objetos, conceitos ou situações estão inter-relacionados. Como consequência, elas são úteis para representação do conhecimento em domínios que usam uma classificação bem estabelecida para simplificar a resolução de problemas (GIARRATANO; DANKEL, 1994). No contexto de unidades de potência hidráulica, um exemplo simples de rede semântica é: o reservatório *faz parte da* unidade de potência hidráulica. No protótipo PHIDR, as redes semânticas relacionam as classes com seus objetos e as classes entre si, conforme descrito na seção 4.2 desta dissertação.

2.3.7. Implementação

A fase de implementação corresponde à etapa de codificação do conhecimento adquirido para o desenvolvimento do sistema especialista. Para a implementação, escolhe-se um modelo e uma ferramenta de desenvolvimento. Como já foi contextualizado, na pesquisa o modelo adotado foi o incremental, onde a aquisição de conhecimento ocorre paralelamente à implementação de conhecimento já adquirido e adequadamente representado. Ferramentas de desenvolvimento serão abordadas na próxima subseção.

É na implementação onde se modela computacionalmente a estrutura do programa definida na fase de representação do conhecimento, integrando conhecimento de diversas fontes, resolvendo possíveis contradições encontradas, entre outras atividades.

2.3.8. Ferramentas de Desenvolvimento

Ferramentas para desenvolvimento de sistemas especialistas podem ser desde linguagens de programação a programas especialmente desenvolvidos para a este fim. A escolha de uma determinada ferramenta depende de fatores como adequação com a representação de conhecimento desejada, disponibilidade, confiabilidade, treinamento para o seu uso e custo, e costuma-se afirmar que a sua seleção é difícil e fundamental para o sucesso de desenvolvimento de um SE.

Certamente, existem vantagens e desvantagens em cada uma das ferramentas de desenvolvimento disponíveis; por exemplo, o uso de uma linguagem de programação orientada a objetos implica no desenvolvimento da máquina de inferência do sistema especialista. Por questões de tempo e custo envolvidos, foi decidido não adotar o uso de tais linguagens nesta pesquisa.

Os programas especialmente desenvolvidos para a criação de sistemas especialistas já possuem a máquina de inferência implementada, e geralmente o treinamento é mais rápido e o uso é mais fácil. Como exemplos destas ferramentas, podem ser citados o *shell* KAPPA PC, da IntelliCorp⁷, e o CLIPS⁸, desenvolvido pela NASA para a criação de sistemas especialistas e utilizado para a criação de protótipos em pesquisas recentes realizadas na UFSC (SILVA, 1998; ALVES, 2001; BORGES, 2002). A ferramenta utilizada neste trabalho e os motivos que levaram ao seu uso estão apresentados no quarto capítulo.

2.3.9. Verificação e Validação

À primeira vista, um sistema baseado em conhecimento é um programa “convencional”, isto é, desenvolvido com uma abordagem algorítmica: são criados com uma ferramenta de desenvolvimento, como uma linguagem de computador, em um modelo definido (por exemplo, o modelo incremental), e assim por diante. Para assegurar qualidade de um programa qualquer, aqueles que o desenvolvem usam testes, métricas e outros recursos que comprovam que o programa alcança os resultados esperados.

Contudo, um sistema especialista difere de um programa convencional primeiramente pelo tipo de conhecimento empregado: um conhecimento essencialmente heurístico, que pode ser muitas vezes incerto e não levar a uma resposta satisfatória, ou mesmo completamente errada. Um exemplo de heurística implementada no protótipo PHIDR é evitar o uso de bombas com sistema de compensação de pressão em circuitos hidráulicos com ciclos intermitentes e tempos de parada rápidos; tais bombas tendem a falhar prematuramente nestas condições. Por causa da natureza do conhecimento heurístico, as fases de verificação e validação são fundamentais no desenvolvimento de um SE, pois elas assegurarão qualidade, e conseqüentemente confiabilidade, das respostas apresentadas. Deve-se ter em mente que, no modelo incremental, a verificação e a validação são realizadas em cada nova versão desenvolvida do sistema especialista.

A verificação de um sistema especialista tem como objeto garantir que exista uma correspondência correta entre as especificações do sistema e o que este realmente executa. Isso é realizado através da detecção de erros de semântica (modificações indevidas no conhecimento do especialista, que também são detectados na validação) e de sintaxe (erros na

⁷ <http://www.intellicorp.com>

⁸ <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>

codificação computacional do conhecimento adquirido). Nesta pesquisa, a verificação foi realizada pelo engenheiro do conhecimento do protótipo criado.

A validação, por sua vez, envolve a determinação da eficácia do sistema em relação às necessidades e requisitos do usuário. Em outras palavras, validar é averiguar se a base de conhecimento que o sistema possui representa e simula corretamente o domínio de conhecimento considerado, chegando a resultados adequados na solução de um problema. A validação é, desta forma, o controle de qualidade do SE. Para o protótipo desenvolvido neste trabalho, as idéias para a sua validação estão discutidas na subseção 4.2.1 deste texto.

A fase de validação é certamente mais complicada do que a de verificação. Segundo (GIARRATANO; DANKEL, 1994), três aspectos, dentre vários possíveis, deveriam ser considerados na validação:

- *Robustez*: saídas corretas para entradas corretas, sistema confiável contra travamentos etc.;
- *Expansibilidade*: capacidade e facilidade de crescimento da base de conhecimento do programa; e
- *Modularidade*: relativo à estruturação e representação do conhecimento.

Para a análise, métricas são definidas, de acordo com as especificações desejadas. Algumas possíveis métricas são (SILVA; BACK, 2000): saídas corretas para entradas corretas; saídas completas para entradas corretas; saídas consistentes para mesmas entradas; utilizável e preferencialmente amigável ao usuário; de fácil manutenção e melhoramento; comprovado que satisfaça as necessidades do usuário; facilidade de explicação; código compreensível, sistema preciso; base de conhecimento verificável; e código reutilizável para outras aplicações. Outras considerações sobre verificação e validação estão tratadas nos capítulos 4 e 5.

2.4. Sistemas de Ensino Inteligentes (SEI)

Os sistemas baseados no conhecimento voltados ao ensino, uma das suas possíveis aplicações, podem ser chamados de “Sistemas Tutores Inteligentes” (STI). Esta designação é bastante usada na literatura, mas, por questões de significado (tendência a pensar o aprendizado por um tutor como ensino em uma só direção, o estudante recebendo passivamente informações), será adotada aqui a expressão “Sistemas de Ensino Inteligentes” para estes sistemas.

Apesar de não diretamente aplicado neste trabalho, pelas possibilidades que os SEIs podem oferecer, como estudos de estratégias de ensino e usos do computador na educação, é importante fazer uma introdução sobre estes sistemas. Cabe ressaltar que não se pretende aqui esgotar todos os assuntos envolvidos com educação e sistemas de ensino inteligentes, de grande amplitude e complexidade; isso acabaria divergindo muito dos outros objetivos desta pesquisa.

2.4.1. Conceitos Preliminares

Os Sistemas de Ensino Inteligentes são definidos por John Self (1995, p. 1, tradução nossa) como “qualquer sistema de aprendizado por computador que tenha algum grau de tomada de decisões autônomo com respeito a determinado aspecto da sua interação com os usuários”, aonde esta tomada de decisão seja necessariamente realizada durante a interação, isto é, levando em conta as ações e entendimentos de cada estudante. Como consequência, afirma Self, o sistema precisa ter acesso a vários tipos de conhecimento e processos de raciocínio para permitir que tais decisões possam ser realizadas.

Por que é necessário, a um sistema de ensino inteligente, esta interação com o usuário? Porque se entende que o conhecimento não é um bem que possa ser transmitido, que possa ser simplesmente transferido ao estudante: ele é fruto de reflexões e críticas dos alunos sobre determinadas afirmações e informações disponíveis (SELF, 1990). A metacognição (ou seja, a reflexão sobre o que fazemos, o conhecimento de nossas operações mentais - percepção, atenção, memorização, leitura, escrita, compreensão, comunicação, entre outras) é fundamental para o aprendizado, e a melhor maneira de promovê-la é pela discussão, modelagem e sua prática explícita (SELF, 1991). Como o conhecimento é resultado de reflexões e críticas, cada aluno acaba aprendendo de uma maneira particular, de acordo com as suas idiossincrasias; portanto, um educador deve ser capaz de agir de modos diferentes de acordo com cada aluno, possibilitando desta forma um ensino personalizado.

Para os sistemas inteligentes aplicados à aprendizagem, Self propôs a criação de um campo de pesquisas teóricas chamado “Matética Computacional”⁹ (do grego "manthanein" = aprender), cujo objetivo é “o estudo de assuntos relacionados à aprendizagem, e como ela pode ser promovida pelo uso das técnicas, conceitos e metodologias da ciência da computação e da inteligência artificial” (SELF, 1995, p. 20, tradução nossa). Se fosse criado, tal campo

⁹ Conforme tradução para o termo “Computational Mathetics” (SELF, 1995) presente em VICCARI, Rosa M.; GIRAFFA, Lucia Maria M. **Introdução aos Sistemas Tutores Inteligentes**. Curso de Pós-Graduação em Ciências da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apostila.

auxiliaria no desenvolvimento de sistemas de ensino inteligentes, promovendo uma integração dos estudos sobre aprendizagem; infelizmente, ainda não há uma organização coerente de tais pesquisas.

A tarefa de desenvolvimento de um sistema de ensino inteligente é certamente complexa: ela envolve vários campos de conhecimento, e áreas como Educação e Psicologia ainda não oferecem teorias computáveis que possam ser aplicadas diretamente na criação destes sistemas (VICCARI; GIRAFFA, 1999). Porém, não se deve igualar complexidade a impossibilidade: a pesquisa e o desenvolvimento de SEIs são importantes, entre outros pontos, para a busca e o entendimento de estratégias educacionais adequadas à nossa realidade e para a utilização de computadores em tarefas nobres como educação.

No que diz respeito ao uso de sistemas especialistas para usos educacionais, a primeira tentativa de adaptação de um SE foi realizada por Clancey (1987), que utilizou a base de conhecimento do sistema MYCIN, criado para auxiliar a identificação de meningite e para indicar o tratamento adequado, em conjunto com um módulo tutor responsável pela didática do programa. Apesar de contar com uma base de conhecimento já testada e validada, este trabalho acabou mostrando que a falta de representações complexas e diversificadas para o conhecimento em conjunto com a falta de um modelo de estudante mais elaborado são entraves no desenvolvimento de sistemas educativos eficientes e efetivos. Por isso, apesar de poder levar a reflexões sobre os resultados apresentados, sistemas especialistas criados sem preocupações educacionais têm capacidades pedagógicas restritas.

2.4.2. Abordagens Educacionais

Clancey posteriormente adotou uma outra forma de entender como o conhecimento é formado, negando a possibilidade de uma “transferência de conhecimento” (o que ele atribui, em (CLANCEY, 1987), ao seu sistema tutor) e adotando uma postura situacionista para o aprendizado (CLANCEY, 1995, 1998). Além do *situacionismo*, outras naturezas do conhecimento seriam o *objetivismo*, o *construtivismo* e o *conexionismo*; as características destas naturezas, apresentadas a seguir, estão presentes em (SELF, 1995).

No objetivismo, afirma-se que existe conhecimento correto, único e independente do indivíduo, sendo a aprendizagem a reprodução desse conhecimento na mente dos estudantes. Para o construtivismo, o conhecimento é construído pelas pessoas, não existindo no mundo independente dos indivíduos; aprender é explorar ambientes ou situações para a criação de conhecimento individual. O situacionismo segue uma linha de pensamento parecida com o construtivismo, dizendo que não há conhecimento independente da mente de uma pessoa;

porém, para os situacionistas, o conhecimento não é um conjunto de descrições, objetos, procedimentos e outros tipos de estruturas criadas na mente: ele é uma capacidade de coordenar e um comportamento seqüenciador que permitem ao indivíduo se adaptar às circunstâncias que se modificam no mundo real. Neste caso, o aprendizado ocorre em todas as atividades humanas, em todo o tempo. Por fim, para o conexionismo, o conhecimento é implicitamente representado em pesos e ligações entre os vários nós de uma rede neural; essa natureza de conhecimento está mais preocupada com representações na memória e não com as situações que indivíduos podem enfrentar.

Para Self (1995), as naturezas de conhecimento são uma das questões relevantes no campo de sistemas inteligentes na educação; outros assuntos de importância são como conhecimento poderia ser apreendido, de que forma os sistemas deveriam educar (deveriam funcionar como um instrutor, um tutor ou um guia?), como novas tecnologias deveriam ser usadas na educação, e de que forma poderia ser medida a efetividade dos sistemas de ensino inteligentes. Englobando alguns desses pontos, Andriessen e Sandberg (1999) descrevem três diferentes cenários educacionais (isto é, descrições de arranjos onde os papéis dos participantes são definidos de acordo com o paradigma educacional suportado), que são o de *transmissão*, o de *estúdio* e o de *negociação*. Estes cenários, não exclusivos na sua aplicação em sistemas de ensino inteligentes, estão descritos a seguir. Outras discussões sobre cada uma das questões são muito extensas para serem tratadas resumidamente neste texto.

2.4.2.1. Cenário de Transmissão

Como o nome sugere, neste cenário o conhecimento seria diretamente transmitido aos estudantes por um sistema de lições, livros-texto e testes. Individualmente, o conhecimento pessoal é tratado neste arranjo como uma réplica do conhecimento científico, considerado correto e único: o papel do professor é, portanto, “implementar” tal conhecimento na mente do estudante. Este é o modelo tradicional de educação, onde a estratégia didática é ouvir as lições e estudar em livros; segundo este conceito, os alunos devem estar preparados para ouvir o instrutor e estruturar e integrar a informação aos seus próprios conceitos, o que, na opinião de muitos, depende da cultura pessoal e do meio onde o estudante atua.

Esta concepção não está de acordo com a idéia de que o conhecimento é fruto de reflexões e críticas dos alunos (discutida em 2.4.1), com a qual o autor deste trabalho concorda, pois se além a transmitir conhecimentos ditos corretos aos estudantes. Certamente existem domínios – como nas áreas exatas - onde há um conhecimento definido como correto a ser ensinado; porém, em uma mera transmissão de conhecimento, não existe interação entre

educador e aluno, essencial para uma educação efetiva. Neste cenário também não existe uma preocupação com o ambiente no qual o estudante está inserido, não havendo, desta forma, um grande interesse em associar o que é ensinado à realidade, ao meio ou à cultura geral.

Por fim, de acordo com Andriessen e Sandberg (1999), o cenário de transmissão não abrange as tendências atuais para o desenvolvimento de sistemas de ensino inteligentes: é preferencialmente aplicado a domínios fechados, segue passos pré-definidos e fixos para o aprendizado, não há colaboração entre os estudantes, e não se preocupa em explorar bancos de dados para construção de conhecimento, isto é, fatos e habilidades são sistematicamente “oferecidos” ao aluno.

2.4.2.2. Cenário de Estúdio

O cenário de estúdio afirma que a responsabilidade de aprender deve residir mais no estudante do que no educador: quanto mais esforço construtivo o aluno tiver, maior será o seu aprendizado. Essa idéia não pode ser conciliada ao cenário de transmissão, pois o aprendizado não é mais considerado um simples procedimento seqüencial, e sim dependente do conhecimento pessoal e de habilidades de metacognição de cada estudante. Então, no cenário de estúdio a educação deve lidar com diferenças pessoais, permitindo ao aluno proceder de acordo com suas próprias maneira e velocidade de aprendizado.

Sistemas educacionais que seguem esta perspectiva atendem às tendências citadas no cenário de transmissão: possibilitam espaço para domínios abertos (aonde o estudante pode explorar várias maneiras de chegar aos objetivos) e ambientes educacionais mais abrangentes, atuam na colaboração entre estudantes e educadores, e permitem a exploração de bancos de dados para a construção de conhecimento. Estudantes aprendem como aprender ao invés de apenas absorver fatos e habilidades, sendo capazes de aplicar o que estudaram na prática e se adaptar a novas situações apresentadas.

Os obstáculos atuais para implementação do cenário de estúdio estão situados na própria educação corrente. Professores e alunos devem se adaptar a novos papéis que o cenário oferece: o estudante deve ser mais ativo e ser capaz de iniciar um novo aprendizado por si só, e os professores devem auxiliá-lo a explorar caminhos distintos para alcançar determinados objetivos, seja mostrando alternativas possíveis, seja “provocando” o aluno a refletir sobre o problema, do que meramente transmitir conhecimento ao aluno.

2.4.2.3. *Cenário de Negociação*

Neste cenário, parte-se do princípio de que não se espera de nenhum instrutor um conhecimento completo sobre um domínio de conhecimento; ainda, a natureza de alguns domínios, como várias áreas das ciências sociais, é tal que não se espera a existência de um conhecimento correto sobre ele. Nestes casos, segundo Andriessen e Sandberg (1999), o objetivo da educação não seria propriamente a aquisição de conhecimento, mas o aprendizado da flexibilidade de participar de discussões em comunidades de prática, isto é, grupos específicos de profissionais atuando e se comunicando de maneiras específicas. Negociação implica em comunicação e debates de pontos de vista entre indivíduos a fim de alcançar concordância ou entendimento sobre determinado assunto.

Também neste cenário pedagógico a simples transmissão de conhecimento não é desejada: o professor deve procurar construir a solução do problema junto ao aluno. Aprender em um cenário de negociação é aprender, usando a linguagem específica da comunidade de prática, a produzir e compreender discursos por meio de diálogos e debates, de colaboração em projetos e discussões posteriores dos resultados com outros estudantes, de leituras e de reflexão pessoal, de acordo com as referências e interesses pessoais.

O cenário de negociação atende às tendências citadas anteriormente, mas de uma maneira diferente do cenário de estúdio: neste, o objetivo do aprendizado é dado e é bem definido, e os estudantes devem alcançá-lo usando diferentes caminhos, os quais são criados pelo próprio aluno. No modelo de negociação, o objetivo não está bem definido: o objetivo inicial do aprendizado, que forma o ponto de partida da discussão e negociação, pode acabar se convertendo em assunto do processo de negociação. Assim, diferentes caminhos podem ser trilhados, mas o resultado final pode ser diferente do inicialmente especificado.

Os exemplos de aplicação computacional de cenários de negociação citados referem-se principalmente a sistemas profissionais de comunicação, que não possuem uma “inteligência” computacional associada. De acordo com Andriessen e Sandberg (1999), o principal obstáculo para a implementação de sistemas educacionais que seguem esse cenário é a falta de conhecimento preciso sobre os prós e contras de discussões eletrônicas, especialmente para fins educacionais. Para o desenvolvimento de cenários de negociação em sistemas educacionais, sugerem os pesquisadores, é crucial realizar pesquisas mais aprofundadas sobre o uso de discussões orais, escritas e eletrônicas dentro de comunidades de prática.

2.4.3. Arquitetura Computacional para um SEI

A arquitetura clássica dos sistemas tutores inteligentes consiste em um conjunto de componentes com conhecimento sobre o assunto a ser estudado, sobre o estudante e sobre técnicas de ensino utilizadas (SELF, 1991). Uma divisão deste tipo serve para facilitar o desenvolvimento dos sistemas, já que separa o conhecimento necessário ao aprendizado em dois blocos distintos, um sobre o domínio e outro sobre como ensiná-lo. Esta estrutura clássica, Figura 2.3, que continua servindo de base para a criação de sistemas de ensino inteligentes, vem sendo modificada pelo uso de novas técnicas, como agentes pedagógicos, redes e hipermídia (VICCARI; GIRAFFA, 1999). Os componentes estão apresentados com mais detalhes a seguir.

Quais são as características de um sistema de ensino inteligente que englobam as idéias discutidas na introdução? Cho et al. (1999) apresentam algumas capacidades desejáveis: o sistema deve ser capaz de planejar dinamicamente o ensino (ou seja, decidir o que, quando e como ensinar um próximo tópico do assunto) e de gerar planos de ensino personalizados, monitorando a sua execução e re-planejando a estratégia de ensino quando necessário. Sendo concordante e também complementando essas capacidades, Self (1990) sugere que o estudante deve se sentir “no comando” do sistema, e este deve ser um “colaborador” no aprendizado, oferecendo conselhos e informações sobre um determinado assunto e não indicando um caminho único e padrão para o ensino. Desta forma, afirma Self, o aluno é incentivado a aprender por suas próprias reflexões, através da metacognição. É necessário, porém, ser cuidadoso na elaboração de um SEI com tais características, pois os resultados podem ser muito ruins se o sistema de ensino inteligente fornecer informações e conselhos mal direcionados ao aluno.

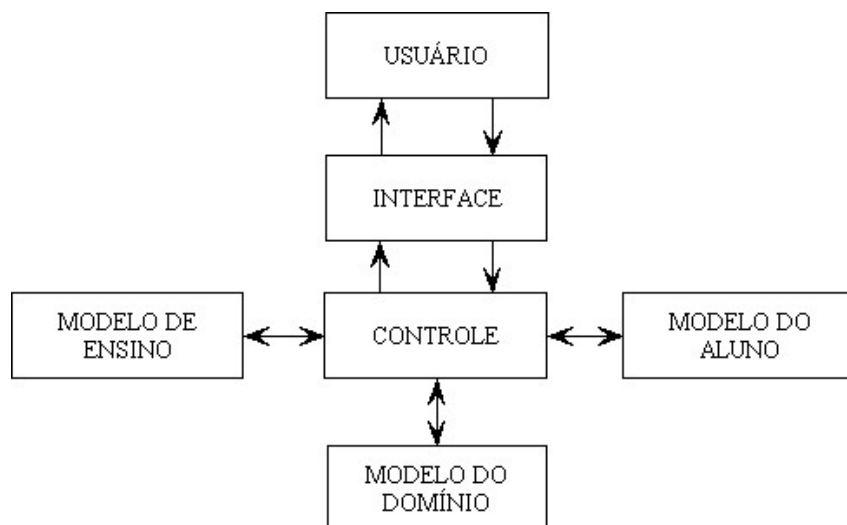


Figura 2.3: Arquitetura tradicional de sistemas tutoriais inteligentes (GIRAFFA, 1999)

2.4.3.1. Conhecimento sobre o Domínio

Na arquitetura tradicional de sistemas tutores inteligentes, o conhecimento específico a ser ensinado está presente em um componente isolado, chamado aqui de *modelo de domínio*. Este conhecimento pode ser modelado por redes semânticas, objetos, scripts, regras de produção ou qualquer representação que se mostrar adequada ao domínio considerado.

No modelo de domínio está representado o material instrucional, ou seja, o conteúdo que o sistema de ensino inteligente deve ministrar. Este componente deve possuir explicações, hipóteses e sugestões ricas e diversificadas, para que o aluno possa ter vários pontos de vista disponíveis para refletir, chegar a conclusões corretas e aprender efetivamente o assunto abordado.

O uso de bases de conhecimento de sistemas especialistas em sistemas de ensino inteligentes deve ser feito de maneira cuidadosa. Como SEs não são desenvolvidos para fins educacionais, a estruturação de conhecimento na base não é feita para prover explicações, hipóteses e sugestões de uma forma que permita o ensino do domínio abordado pelo sistema especialista. Como exemplo, não existe uma preocupação em personalizar as explicações de acordo com o usuário, ou sugerir caminhos alternativos para a solução de um problema. Por isso, bases de conhecimento já existentes devem ser modificadas (a depender do caso, totalmente reformuladas) para permitir sua utilização em SEIs.

2.4.3.2. Modelo de Ensino

O *modelo de ensino* abrange as estratégias e as táticas de ensino responsáveis pela capacidade didática do sistema de ensino inteligente. As estratégias pedagógicas modelam o conhecimento sobre como ensinar e as táticas pedagógicas contêm as ações, ou seja, os comportamentos do sistema frente ao aluno, que efetivam a(s) estratégia(s) usadas(s) (GIRAFFA, 1999). Uma ou mais estratégias de ensino são adotadas de acordo com o domínio de conhecimento representado no SEI, o objetivo imaginado para o educador virtual, o nível de conhecimento do estudante e a sua motivação, entre outros pontos.

Segundo Giraffa e Viccari (1999), as estratégias pedagógicas podem ser classificadas em *socrática*, *reativa*, de *treinamento* (ou *coaching*), e *assistente* (ou *colaborativa*). Estas estratégias não são mutuamente exclusivas: vários sistemas de ensino inteligentes foram criados com mais de uma destas estratégias para o aprendizado. Os motivos para tal prática são vários: os projetistas tiveram mais de uma meta para o desenvolvimento do sistema,

vários métodos para a representação do conhecimento são adotados simultaneamente, vários formatos de ensino são utilizados para diferentes áreas de conhecimento, entre outros.

A estratégia socrática considera que o material apresentado é projetado para auxiliar os estudantes a identificar enganos e interpretações errôneas a respeito do conteúdo ensinado; para chegar ao seu objetivo, é feita uma série de perguntas encadeadas baseadas nos erros e acertos do estudante, que aprende pela reflexão de tais questões. Na estratégia reativa, as lições “reagem” às perguntas do estudante, simulando os efeitos e implicações das idéias do aluno por meio de regras previamente definidas; assim, aprende-se refletindo sobre as implicações e efeitos não adequados a alcançar o objetivo proposto.

Por sua vez, na estratégia de treinamento o sistema utiliza um conjunto de regras para escolher a forma mais adequada de instrução para um determinado estudante, que pode incluir orientação para novas tarefas, transições entre tópicos e interação com o estudante para encontrar opções mais apropriadas no contexto. Finalmente, a estratégia colaborativa pressupõe que o educador virtual comporte-se como um participante em um diálogo com o estudante sobre um determinado assunto, auxiliando-o a compreender que está sendo discutido e, como consequência, ajudando-o na construção de conhecimento sobre o conteúdo em questão.

Voltando às idéias de Self (1990), o sistema de ensino inteligente deve ser um colaborador no aprendizado, permitindo ao aluno seguir caminhos diversos, fornecendo dicas, explicações ou sugestões quando necessário; respeitando as habilidades do estudante, que pode ser realizado em conjunto ao *modelo do aluno*, a ser visto em seguida; proporcionando um certo grau de controle por parte do aluno; possibilitando vários graus de representação do conhecimento ao estudante; entre outras características. Uma ou mais estratégias educacionais escolhidas para o sistema deve abordar estas características.

Atualmente, algumas pesquisas estão obtendo sucesso com o uso de agentes pedagógicos, que podem ser definidos como entidades independentes cujo objetivo é comunicar-se com o estudante a fim de melhorar a função educacional do sistema de ensino inteligente. Viccari e Giraffa (1998) afirmam que o uso de agentes permite resolver antigos problemas em aberto, como a melhoria da interação entre o tutor e o aluno e a possibilidade de investigação de estados mentais, como crenças, desejos e intenções, a níveis mais estratificados; neste segundo caso, cada estado é representado por agentes autônomos que interagem entre si, comunicando-se através de mensagens. Uma aplicação do uso de agentes pode ser encontrada na tese de Giraffa (1999).

2.4.3.3. Modelo do Aluno

O *modelo do aluno* é o componente do sistema de ensino inteligente que armazena características sobre o comportamento do aluno diante do educador virtual, guardando informações relativas a respostas inseridas, erros e acertos obtidos etc. O objetivo do modelo do aluno pode ser reconhecer planos ou caminhos de solução realizados pelo estudante, avaliar o desempenho do aluno ou capacidade de resolução de problemas, descrever restrições violadas pelo estudante, entre outros (ZHOU; EVENS, 1999). Assim, é possível realizar planos individuais de ensino para o aluno, procurando emular como o educador procura agir de acordo com a forma de aprendizagem de cada indivíduo. Sobre este ponto, convém rever o texto sobre individualização e aprendizagem, apresentado na subseção 2.4.1.

Modelos sobre como o estudante se comporta, os seus processos mentais e as suas expectativas e necessidades ainda são objetos de estudo na pesquisa de sistemas de ensino inteligentes. Os sistemas atuais procuram responder a perguntas como “quais aspectos do estudante deveriam ser modelados no meu sistema?”, “quais detalhes são necessários?” ou “quanto individualizado (para o estudante) meu modelo deve ser?”, para que o modelo do aluno seja adequado à estratégia de ensino adotada pelo SEI. Dentro destas questões, informações sociais dos estudantes, como cultura e ambiente locais, devem ser levadas em conta na elaboração de modelos do aluno e de ensino dos educadores virtuais.

2.4.4. Sugestões para um SEI para ensino de projetos de UPHs

Baseados nos conceitos apresentados nesta seção, quais podem ser as características de um sistema de ensino inteligente voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica (o domínio de problema deste trabalho)? Infelizmente, esta pergunta só pode ser aqui respondida em parte, pois, conforme discutido no capítulo introdutório desta dissertação, o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento voltado ao domínio de problema desta pesquisa depende primeiramente (mas não somente) de uma abrangente sistematização do processo de projeto de UPHs.

Desta forma, não será discutida em detalhes a modelagem dos componentes de um sistema de ensino inteligente, apresentados na subseção anterior. As sugestões que serão feitas para o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica são fundamentadas principalmente em características conceituais das naturezas de conhecimento e dos modelos de ensino que podem ser usados nestes sistemas.

Para iniciar, deve-se ter em mente que o projeto de UPHs pode ser associado à natureza objetivista de conhecimento, com certa razão: existe conhecimento que é definido como objetivo (no sentido descrito em 2.4.2) sobre esta atividade, como equações de cálculos de requisitos de projeto e de dimensionamento de componentes, e a própria sistematização de projeto sugerida nesta pesquisa pode ser interpretada como uma organização a ser seguida em projetos de sistemas hidráulicos. Porém, mesmo admitindo que exista conhecimento objetivo em um determinado domínio de problema, como é o caso de projeto de unidades de potência hidráulica, pelas discussões feitas ao longo da seção 2.4 entende-se que ensinar não é somente transmitir conhecimento, e sim possibilitar ao aluno a construção do conhecimento por meio de reflexões e críticas sobre o conteúdo a ele apresentado.

Reafirmando esta constatação de que uma mera transmissão de conhecimento não é adequada para um aprendizado efetivo, exclui-se o uso do cenário de transmissão em um sistema de ensino inteligente baseado em projetos. Assim, dentre os modelos educacionais apresentados na subseção 2.4.2, sugere-se iniciar o desenvolvimento de um SEI baseado em projeto de UPHs em um cenário de estúdio, onde a meta é a colaboração entre o sistema educacional e o aluno durante o processo de aprendizagem. Posteriormente, pode-se pensar na migração para um cenário de negociação, onde seria considerado, além da parte técnica relativa ao projeto, as influências e interferências da tecnologia na sociedade.

Algumas das táticas e estratégias que podem ser adotadas no modelo de ensino de um sistema de ensino inteligente foram vistas em 2.4.3.2; analisando-as em um sistema voltado ao ensino de projeto de unidades de potência hidráulica, observa-se que a estrutura computacional da base de conhecimento do protótipo criado nesta pesquisa (a ser descrita no capítulo 4) é limitada para fins educacionais: não há preocupação com uma interação maior com o usuário do sistema especialista, na forma de perguntas, sugestões de caminhos alternativos para os resultados finais e outras táticas educacionais, que possam levar o aluno a uma reflexão mais aprofundada sobre o projeto de unidades de potência hidráulica. Por esse motivo, no desenvolvimento de um sistema de ensino inteligente sobre projeto de UPHs, mudanças devem ser feitas na estruturação computacional do conhecimento realizada na criação do protótipo desta pesquisa. Estas modificações dependem fundamentalmente das estratégias e táticas educacionais que podem ser escolhidas para o SEI.

Mesmo reconhecendo que qualquer proposta feita sem uma abrangente organização do conhecimento sobre o projeto de unidades de potência hidráulica está sujeita a limitações e modificações, uma primeira idéia para a criação de um sistema de ensino baseado em projeto de UPHs, com base na seqüência sugerida nesta pesquisa, é:

1. Apresentação do problema inicial ao estudante, contextualizado o sistema hidráulico no qual será aplicada a UPH. Na apresentação, os dados referentes ao problema poderiam ser apresentados de duas formas:
 - a. Na forma de requisitos de projeto do sistema hidráulico: características das cargas do sistema, velocidade necessária aos atuadores etc.
 - b. Como dados de projeto da unidade de potência hidráulica: pressões do sistema, vazão máxima, nível de contaminação, entre outros.
2. Auxílio ao estudante na escolha dos tipos de componentes mais adequados à unidade de potência hidráulica. Algumas possibilidades:
 - a. Deixando o aluno escolher determinados componentes, pedindo algumas razões para a escolha e sugerindo em seguida, por meio de perguntas (estratégia socrática) ou afirmações (estratégia de treinamento), mudanças para outros tipos de componentes;
 - b. Guiando o estudante na escolha de cada componente, mostrando as características que influenciam cada escolha, as interações entre os componentes, e outros detalhes de seleção.
3. Ajuda ao estudante na seleção dos subtipos de componentes
 - a. Por meio de perguntas (estratégia socrática); de interação com afirmações (estratégia de treinamento); por busca em catálogos, informando as razões da escolha e discutindo cada um destes motivos; entre outras alternativas possíveis.
4. Montagem da unidade de potência hidráulica ou escolha de uma UPH de um conjunto fechado, e posterior dimensionamento dos componentes.

A partir das fases acima apresentadas, com adaptações e modificações que se mostrarem necessárias, um sistema de testes pode ser criado para a análise das estratégias e táticas educacionais mais adequadas para o ensino de projeto de unidades de potência hidráulica. Posteriormente, outros estudos podem ser feitos para verificar se as táticas e estratégias educacionais para projetos de UPHs também são aplicáveis ao ensino de outras atividades de projeto, o que pode ampliar as possibilidades de desenvolvimento de sistemas de ensino inteligentes para a Engenharia.

Em virtude das limitações desta pesquisa, certamente existem aqui muitas questões em aberto sobre o desenvolvimento de um sistema de ensino inteligente para o projeto de UPHs, tais como:

- Qual ou quais naturezas de conhecimento podem ser associadas ao conhecimento subjetivo relativo ao projeto de unidades de potência hidráulica? E à atividade de projeto em geral?
- Como elaborar estratégias e táticas de ensino para serem aplicadas em sistemas de ensino inteligentes baseados em projeto, que promovam a interatividade e a personalização do ensino desejáveis ao aprendizado?
- De que forma deve ser realizada a organização computacional de um modelo de domínio de um sistema de ensino inteligente baseado em projeto de UPHs (por exemplo, que outras representações de conhecimento são necessárias)? Um ambiente de desenvolvimento como o CLIPS é adequado para a criação destes sistemas?
- Como podem ser aplicadas técnicas mais recentes, como o uso de redes de computadores e agentes pedagógicos, no desenvolvimento de um sistema de ensino sobre projeto de unidades de potência hidráulica?
- Em diferentes ambientes de uso, como uma indústria e uma instituição de ensino superior, quais devem ser as modificações necessárias em um sistema de ensino voltado ao projeto de UPHs?
- Como modelar o estudante em um sistema de ensino inteligente, de modo a obter, em conjunto com as táticas e estratégias pedagógicas, a interação com o aluno e a individualização do ensino?
- Como considerar o coletivo, as interações e influências da tecnologia na sociedade, em um SEI baseado em projeto?

Tais questões poderão ser respondidas tanto pela pesquisa mais aprofundada sobre as áreas de conhecimento envolvidas na criação destes sistemas quanto pela organização mais ampla do conhecimento sobre o processo de projeto de sistemas hidráulicos. Sugestões para trabalhos futuros relacionados a sistemas baseados em conhecimento voltados à educação estão feitas no último capítulo desta dissertação.

3. Unidades de Potência Hidráulica

No capítulo anterior mostrou-se que um sistema especialista é desenvolvido para a solução de um problema específico de um determinado domínio de conhecimento. Nesta pesquisa a Hidráulica foi a área escolhida para a criação do protótipo PHIDR, a ser apresentado no capítulo 4. Este capítulo trata assim do domínio de problema - o projeto de unidades de potência hidráulica – do SE desenvolvido neste trabalho. Na introdução, seção 3.1, é apresentada uma definição deste circuito hidráulico, sendo suas características e seus componentes tratados na seção 3.2. A seção seguinte aborda o que se entende sobre projeto na Hidráulica, em especial em aplicações industriais; por fim, os componentes principais da UPH são tratados na seção 3.4.

3.1. Introdução

Um sistema hidráulico, Figura 3.1, é um conjunto de elementos físicos (também chamados de componentes) associados para permitir a transmissão e o controle de forças e movimentos, utilizando um fluido (geralmente óleo) como meio de transferência de energia (von LINSINGEN, 2001). Esta definição refere-se aos sistemas que realizam algum trabalho (sistemas hidrostáticos), como laminação e prensagem, e não aos sistemas hidrodinâmicos que meramente transportam fluido de um local para outro (ESPOSITO, 2000). Assim, o sistema hidráulico pode ser considerado “o meio através do qual uma forma de energia de entrada é convertida e condicionada, de modo a se ter como saída energia mecânica útil” (von LINSINGEN, 2001), na forma de torque, se o atuador for um motor hidráulico, ou de força, se for um cilindro.

Segundo Esposito (2000), sistemas hidráulicos requerem seis elementos básicos: um ou mais *reservatórios*, para armazenar fluido; uma ou mais *bombas*, para prover vazão de fluido ao sistema; uma *fonte de energia*, como um motor elétrico, para acionar a bomba; *válvulas*, para controle energético do fluido (direção, pressão e vazão); um ou mais *atuadores*, para converter energia associada ao fluido em energia mecânica; e um *sistema de canalização*, para conduzir o fluido de um lugar a outro. Vários destes componentes, como será visto a seguir, compõem a unidade de potência hidráulica do sistema.

Várias são as possibilidades de aplicação para sistemas hidráulicos. Linsingen (2001) divide os usos em seis grupos: a *Hidráulica Industrial*, como prensas hidráulicas, máquinas operatrizes e máquinas injetoras; a *Siderurgia, Engenharia Civil, Geração de Energia e*

Extração Mineral, abrangendo laminadores, comportas, mancais e controladores de turbinas, entre outros; a *Hidráulica Móvil*, em máquinas de terraplanagem, máquinas agrícolas etc.; a *Hidráulica para Aplicações Navais*, em controladores de lemes e guindastes de convés, por exemplo; *Aplicações Técnicas Especiais*, especialmente a área aeroespacial; e *Aplicações Gerais*, em equipamentos médicos, processadores de lixo urbanos, e outros. Outras classificações possíveis, como a divisão em *máquinas-ferramentas*, *setor de transporte e elevação* etc. (GÖTZ, 1991), abrangem equipamentos de uma das áreas descritas por Linsingen.

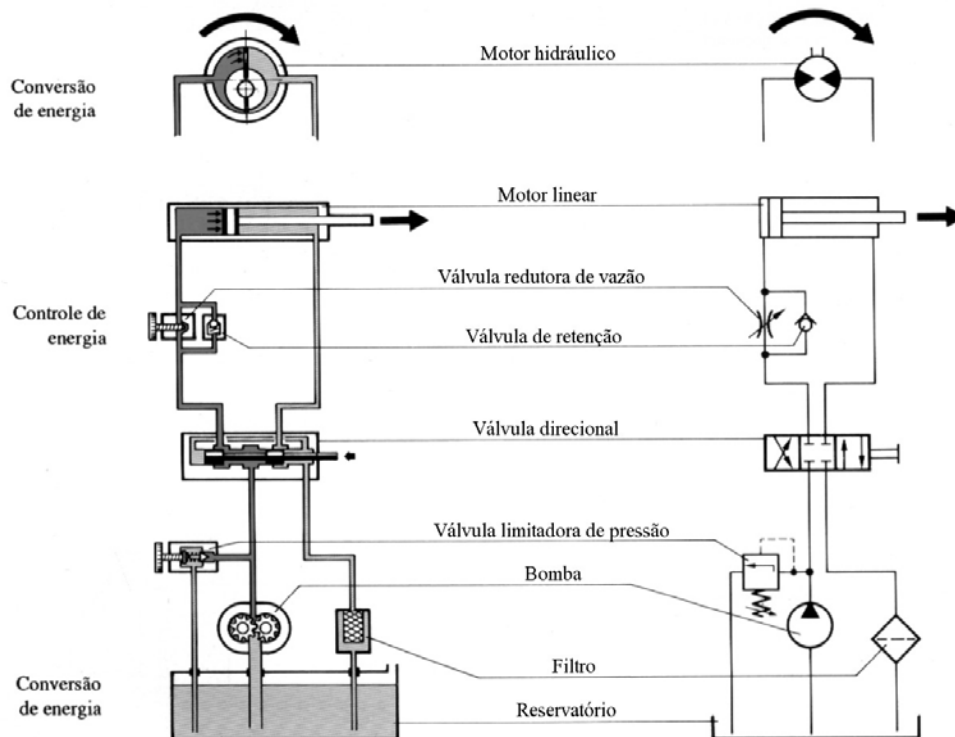


Figura 3.1: Componentes de um sistema hidráulico (GÖTZ, 1991)

Para a realização de algum trabalho específico, todo sistema hidráulico deve possuir componentes que convertam energia mecânica em energia associada ao fluido; essa transformação é basicamente feita pela bomba hidrostática e fonte de energia associada, porém outros elementos são necessários para promover algumas características desejáveis ao sistema, como limpeza do fluido, segurança, diminuição de pulsação etc. O conjunto assim formado pode ser denominado de *unidade de potência hidráulica* (UPH), e a escolha e o dimensionamento corretos dos componentes é de extrema importância para um bom funcionamento do sistema hidráulico.

Dentro desta idéia, a unidade de potência hidráulica é considerada um circuito do sistema hidráulico, ou seja, um conjunto de componentes do sistema que exercem uma função

específica (SILVA, 1998). UPHs encontradas no mercado, como a mostrada na Figura 3.2, são usadas em sistemas hidráulicos pequenos (com vazões e/ou pressões não muito elevadas). Para sistemas maiores, os componentes podem não estar fisicamente agrupados: por exemplo, o reservatório pode não estar próximo da bomba, ou os acumuladores podem estar localizados perto dos atuadores do sistema.

Estando ou não proximamente localizados, os elementos que compõem a unidade de potência hidráulica devem trabalhar como um conjunto, e não serem considerados peças isoladas do sistema. O projeto da UPH também não costuma ser realizado separadamente, preferindo-se projetar o sistema hidráulico como um todo, sem prejuízos aos resultados finais dos projetos. Nesta pesquisa, contudo, optou-se por analisar isoladamente o projeto da unidade de potência, um problema restrito que pode ser aplicável no desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista.

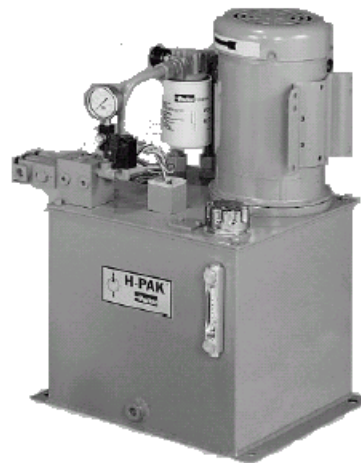


Figura 3.2: Pequena unidade de potência hidráulica (PARKER HANNIFIN, 2002)

Além da criação do protótipo, que pode ser integrado em outro sistema especialista desenvolvido na UFSC (SILVA, 1998), a sistematização do projeto de unidades de potência hidráulica pode auxiliar na compreensão de como projetos de sistemas hidráulicos são realizados. As idéias sobre estruturação do projeto de UPHs em aplicações industriais estão mostradas no próximo capítulo.

Um bom projeto deve atender satisfatoriamente as especificações desejadas para o sistema hidráulico. As várias áreas de aplicação demandam diferentes necessidades: por exemplo, uma unidade de potência hidráulica presente em máquinas siderúrgicas exige trocadores de calor eficientes, enquanto em aplicações móveis e aeronáuticas a UPH deve ser projetada respeitando espaços e pesos restritos. Desta forma, uma sistematização geral para projeto de circuitos hidráulicos, se possível de ser realizada, deve levar em conta as várias aplicações (ou seja, seus requisitos e especificações) existentes. Por questões práticas, esta

pesquisa se limitou ao estudo do projeto de unidades de potência hidráulica em aplicações industriais. Uma discussão mais ampla sobre projeto é apresentada na seção 3.3; no próximo capítulo, estão expostas as considerações para projeto de UPHs feitas no desenvolvimento do protótipo de sistema especialista.

3.2. Características

Em comparação a sistemas mecânicos, elétricos ou pneumáticos, a Hidráulica apresenta uma série de vantagens, tais como (von LINSINGEN, 2001):

- Transmissão de grandes forças e torques elevados com dimensões relativamente reduzidas;
- Respostas rápidas à partida e inversão de movimento sob carga, devido aos baixos momentos de inércia envolvidos;
- Possibilidade de variação contínua de força e velocidade nos atuadores lineares e de torque e rotação nos atuadores rotativos, por meio de controles e ajustes;
- Segurança eficaz contra sobrecargas pelo uso de válvulas limitadoras de pressão;
- Capacidade de armazenamento de energia de forma relativamente simples, por meio de acumuladores hidropneumáticos;
- Possibilidade de utilização em condições ambientais adversas.

Em geral, sistemas hidráulicos são mais simples, isto é, possuem menos partes móveis, e por isso mais econômicos em operação e manutenção, do que sistemas mecânicos ou elétricos comparáveis (ESPOSITO, 2000). Contudo, sistemas hidráulicos apresentam limitações, como (LINSINGEN, 2001; SILVA, 1998):

- Custo mais elevado para aquisição, se comparado a sistemas mecânicos e elétricos compatíveis;
- Queda no rendimento do sistema devido a dissipações energéticas por atrito viscoso nas tubulações e componentes e a perdas por vazamentos internos e possibilidade de vazamentos externos;
- Geração de ruído nas bombas, que pode alcançar um nível significativo em sistemas de alta pressão;
- Elevada dependência da temperatura do fluido de trabalho, que geralmente faz requerer o uso de trocadores de calor nos sistemas.

Em relação à funcionalidade do sistema hidráulico, o projeto deve prever, no mínimo, que a unidade de potência hidráulica tenha componentes para fazer a conversão primária de energia (energia mecânica em energia associada ao fluido), para promover segurança, como em caso de crescimento elevado da pressão no sistema, para armazenar o fluido de trabalho e para mantê-lo em condições adequadas de temperatura e de nível de contaminação. Estas características podem ser realizadas por diferentes componentes: o reservatório, por exemplo, serve para armazenar fluido e também, em vários sistemas, para resfriá-lo. Uma unidade de potência, usada em circuitos abertos e que atende as características citadas, Figura 3.3, possui uma bomba de deslocamento fixo, uma válvula de segurança, uma válvula de descarga, um reservatório e um filtro de retorno. Esta unidade pode ser considerada uma UPH básica, pois é formada pelos componentes mais simples encontrados no mercado. A depender das necessidades e das condições de operação, outros elementos podem ser utilizados, como acumuladores e trocadores de calor para o fluido.

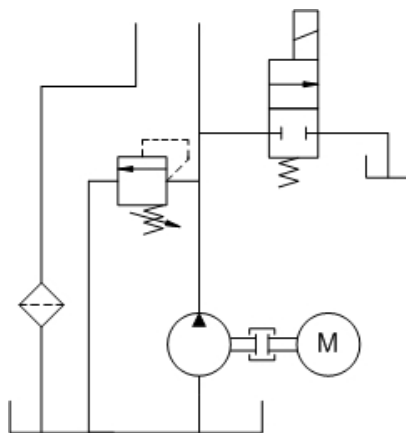


Figura 3.3: Unidade de Potência Hidráulica - Componentes Básicos

Outras possíveis configurações de unidades de potência estão apresentadas na Figura 3.4 (SILVA; BACK, 2000). Estes quatro circuitos estão presentes no protótipo desenvolvido na tese de Silva (1998). Pode-se observar o uso de diferentes componentes da unidade mostrada na Figura 3.3: bombas de deslocamento variável em (a) e (c), acumuladores em (b) e (c), filtros de sucção também em (b) e (c). Para exemplificar a adoção de um ou outro componente, acumuladores são usados para diminuir ou eliminar picos de pressão que o sistema hidráulico possa estar sujeito, prevenindo assim choques e aumentando a vida útil de componentes do sistema (TRINKEL, 1996). Certamente, diferentes configurações da UPH implicam em custos variados, maior ou menor segurança do sistema, entre outros pontos, que devem ser considerados na adoção de um determinado circuito para a unidade de potência do sistema hidráulico. As quatro UPH são descritas com mais detalhes em 4.3.1.3.

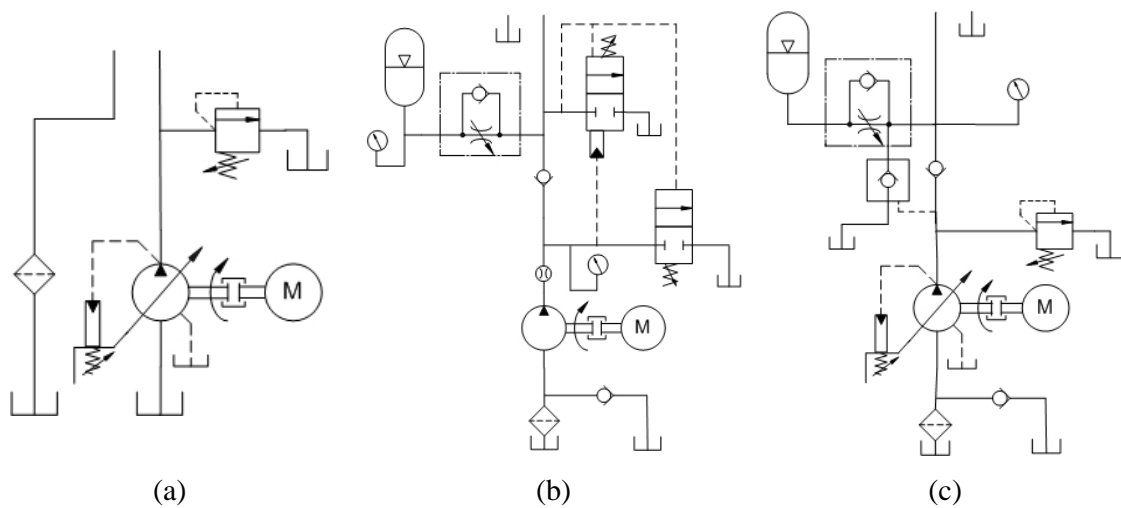


Figura 3.4: Outras configurações possíveis para unidades de potência hidráulica

3.3. Projeto

Como explicado na introdução deste capítulo, a discussão sobre projeto de circuitos hidráulicos desta seção está principalmente voltada para a hidráulica industrial, objeto de estudo desta pesquisa. Referências sobre outras áreas de aplicação, quando feitas, estão explicitamente citadas no texto.

Primeiramente, projeto de produto pode ser definido como “uma atividade de planejar, sujeito às restrições de resolução, uma peça ou um sistema para atender de forma ótima necessidades estabelecidas, sujeito, ainda, às restrições de solução” (BACK; FORCELLINI, 1997, p. 1-1). As restrições de resolução incluem a disponibilidade de tempo e de conhecimento no domínio, e o acesso a laboratório e a computadores, enquanto as restrições de solução envolvem aspectos de custo, disponibilidade de materiais, equipamentos de fabricação e uso, manutenção e descarte do produto. Por sua vez, ainda conforme Back e Forcellini (1997), metodologia de projeto refere-se a métodos e procedimentos sistemáticos e racionais para resolver problemas de projeto, por meio de ferramentas conceituais criadas para a organização do processo de projeto de maneira efetiva e eficiente.

Vários são os modelos de processos de projeto existentes, como Pahl & Beitz e Asimov (BACK; FORCELLINI, 1997); em geral, possuem estágios que abrangem etapas de concepção, projeto preliminar e projeto detalhado do produto, conforme ilustrado na Figura 3.5. As ferramentas conceituais usadas incluem a *casa da qualidade* (ou QFD) e o *método da matriz morfológica*.

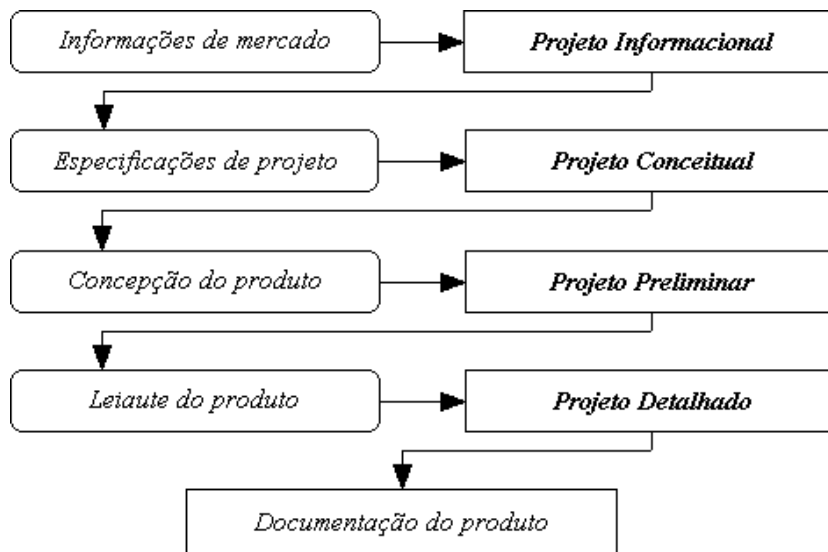


Figura 3.5: Principais fases do projeto de produto (BACK; OGLIARI, 2001)

Dentro do processo de projeto, uma abordagem que está sendo cada vez mais utilizada é a Engenharia Simultânea, que visa considerar todos os aspectos do ciclo de vida de um produto, deste a etapa conceitual de projeto até a sua reciclagem ou seu descarte (BACK; OGLIARI, 2001). Desta forma, com a Engenharia Simultânea, procura-se integrar nas primeiras fases do projeto de produto conhecimento, recursos e experiência advindos de áreas como marketing, manufatura e vendas, a fim de alcançar um projeto bem sucedido em relação a custos, qualidade e satisfação dos clientes (SILVA, 1998). Esta integração costuma ser realizada no ambiente de uma empresa pelo paralelismo das fases de desenvolvimento de um produto, conforme ilustrado na Figura 3.6.

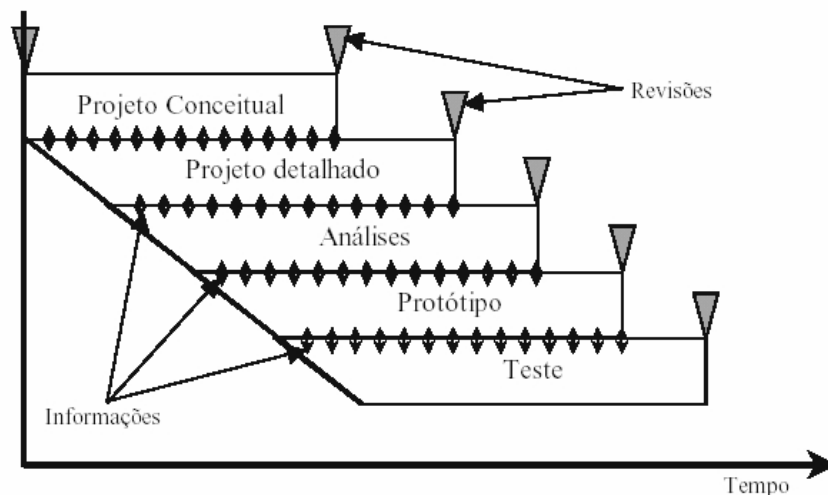


Figura 3.6: Modelo de Engenharia Simultânea para desenvolvimento de produto (YAZDANI; HOLMES, 1999, conforme BACK; OGLIARI, 2001)

Por sua vez, o enfoque de Engenharia no Conhecimento em um sistema baseado no conhecimento voltado ao projeto de um determinado produto é feito através da consideração de fatores do ciclo de vida do produto, como custos, produção, manutenção e montagem, nas regras de projeto presentes na base de conhecimento do SBC (Figura 3.7), a fim de se obter uma melhor qualidade nos resultados finais do sistema. No próximo capítulo, será mostrado como algumas destas variáveis foram consideradas na organização de projeto de unidades de potência hidráulica para o desenvolvimento do protótipo de sistema especialista.

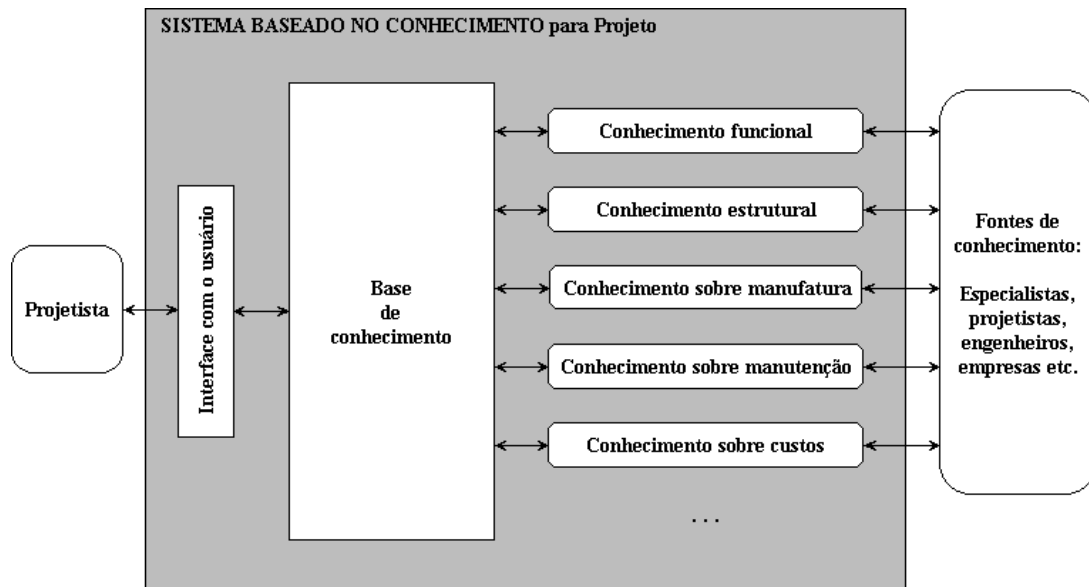


Figura 3.7: Enfoque de Engenharia Simultânea em SBC para projeto (adaptado de PERERA, 1997, conforme BACK; OGLIARI, 2001).

Sistemas hidráulicos industriais são produtos, por assim dizer, diferenciados: são geralmente criados de acordo com as necessidades de um único cliente (cada sistema é “personalizado”), e projetados por poucos indivíduos com vasta experiência prática na hidráulica. O projeto depende fundamentalmente dos fornecedores existentes no mercado, sendo adaptados de acordo com os componentes disponíveis, e é freqüente o aproveitamento de soluções já utilizadas em outros sistemas hidráulicos, limitando desta forma a busca de propostas inovadoras. O processo de projeto na hidráulica industrial pode seguir etapas conceituais, preliminares e detalhadas; porém, a literatura em geral não mostra o uso de ferramentas conceituais e de modelos de processos em projetos na hidráulica industrial. É mais comum o uso de seqüências de projeto, como a apresentada a seguir (SILVA, 1998):

1. Definição geral do circuito, incluindo requisitos de carga, para definir a necessidade de diferentes circuitos;

2. Determinação das condições ambientais e operacionais, incluindo tolerâncias para tipos de erros (posição, velocidade e força) e para faixas de eficiência;
3. Definição da pressão máxima necessária, baseada em guias de projeto;
4. Determinação do sistema completo e seus circuitos;
5. Seleção e dimensionamento do(s) atuadores(s);
6. Seleção e dimensionamento da unidade de potência hidráulica, incluindo faixa de filtração;
7. Dimensionamento das válvulas, tubulações, reservatórios e sistemas de filtração;
8. Seleção do fluido;
9. Plano de manutenção.

Para as unidades de potência hidráulica, a abordagem sobre projeto na literatura especializada (como LINSINGEN, 2001 e TRINKEL, 1996) é feita principalmente pela seleção e dimensionamento de cada um dos componentes que compõem este circuito; é mostrado o funcionamento de cada elemento e de alguns sistemas hidráulicos existentes, e são fornecidas algumas orientações e recomendações para a escolha do componente (de acordo com os requisitos que se deseja para o sistema hidráulico), bem como algumas equações para o seu dimensionamento. Apresentar cada componente individualmente é importante para o ensino, e serve para oferecer boas indicações de projeto; porém, entende-se que é necessário tratar o projeto da UPH como um circuito, pois os seus componentes estão inter-relacionados e a seleção e o dimensionamento dependem das relações entre os elementos que compõem a unidade de potência.

Por que então livros não adotam esta postura? Fora razões como o objetivo da publicação ou interesses corporativos (proteção de segredos industriais, por exemplo), entende-se que um forte motivo é a complexidade (ou até impossibilidade) de mostrar as possíveis soluções para unidades de potência hidráulica nas várias áreas de aplicação existentes. O interessante aqui, contudo, é notar que essa abordagem reflete como são realizados projetos neste domínio: são feitos por especialistas nas diversas áreas de aplicação, que entendem como funcionam os sistemas hidráulicos e conhecem soluções para problemas diversos (mas não demonstram como as alcançam), e que possuem diferentes convicções e por isso podem ter diferentes concepções de UPHs para determinadas necessidades de um sistema. Resumindo, a prática atual de projeto na hidráulica industrial não está sistematizada em livros ou artigos, mas restrita a alguns indivíduos com experiência na área.

A organização de um procedimento de projeto para unidades de potência hidráulica deve então ser feita a partir da experiência dos especialistas no domínio. Neste sentido, a

aquisição de conhecimento de especialistas para o desenvolvimento de um SE pode possibilitar uma boa sistematização de projetos em hidráulica, sendo este um dos motivos para a escolha deste domínio de problema nesta pesquisa. Outras razões para a escolha da Hidráulica como domínio de conhecimento neste trabalho foram (SILVA, 1998):

- Boa fundamentação teórica para modelagem e análise de sistemas hidráulicos;
- Sistemas hidráulicos são definidos pelos seus componentes, que exercem funções específicas no sistema. Esse aspecto facilita a aplicação de técnicas de orientação a objeto, discutido no capítulo anterior;
- Requisitos de projeto importantes para a área, como custos, montagem e segurança, podem ser modelados no sistema especialista diretamente ou considerados através de guias pelo programa.

Seguindo a seqüência apresentada anteriormente (SILVA, 1998), o circuito da UPH é definido e seus elementos são selecionados e dimensionados após a determinação dos requisitos do sistema hidráulico; sendo assim, espera-se que o especialista já possua dados sobre as variáveis do sistema (pressão, vazão, nível de contaminação aceitável do fluido etc.) no momento que for projetar uma unidade de potência. Outras considerações sobre projeto de unidades de potência foram deixadas para o próximo capítulo, que apresenta uma primeira estruturação criada para tal problema incluindo regras, retiradas de livros e artigos, para seleção de alguns dos componentes do circuito. Também estão abordados os problemas e as dificuldades enfrentadas durante a pesquisa na sistematização do projeto de UPHs.

3.4. Componentes

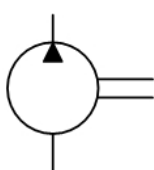
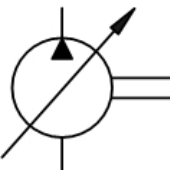
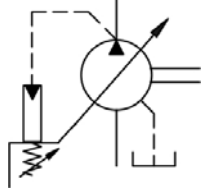
Os principais componentes presentes nas configurações apresentadas na seção 3.2 estão descritos a seguir. Para alguns elementos, são apresentadas equações para dimensionamento e regras simples de seleção encontradas em literatura especializada. As regras são referentes a circuitos abertos, nos quais o fluido de retorno do(s) atuador(es) é direcionado ao reservatório do sistema hidráulico; nos circuitos fechados, o óleo retorna do(s) atuador(es) diretamente para a entrada de sucção da bomba hidrostática. A simbologia mostrada segue a normas NBR 8896, NBR 8897, NBR 8898 e ISO 1219-1.

3.4.1. Bombas Hidrostáticas

Bombas hidrostáticas, também chamadas de bombas de deslocamento positivo, são responsáveis pela conversão primária de energia de um sistema hidráulico, transformando energia mecânica em energia associada ao fluido. Ao contrário das bombas hidrodinâmicas, usadas em sistemas de transporte de fluido, as bombas hidrostáticas transferem energia ao óleo principalmente na forma energia de pressão; a parcela de energia cinética transferida é desprezível (von LINSINGEN, 2001). Porém, deve-se entender que a bomba não produz pressão; a resistência à vazão é que vai definir a pressão nos elementos do sistema (ESPOSITO, 2000).

As bombas hidrostáticas estão divididas em dois grandes grupos: as de deslocamento fixo, onde o volume deslocado por rotação é constante, e as de deslocamento variável, nas quais é possível variar a vazão em uma determinada rotação. As bombas também se diferenciam pelo princípio de deslocamento utilizado e pela presença ou ausência de mecanismos de compensação de pressão. De acordo com o princípio de deslocamento, no primeiro grupo enquadram-se bombas de engrenagens, de parafusos, de palhetas e de pistões, enquanto as bombas de deslocamento variável podem ser de palhetas ou de pistões. A Tabela 3.1 mostra os símbolos utilizados em diagramas de sistemas hidráulicos; por sua vez, a Tabela 3.2 ilustra esquematicamente as bombas de deslocamento positivo.

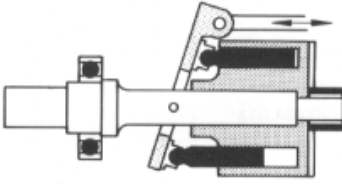
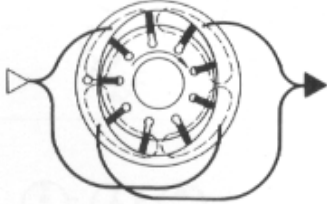
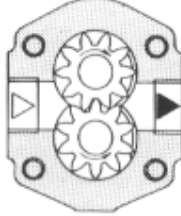
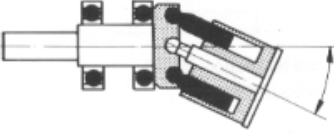
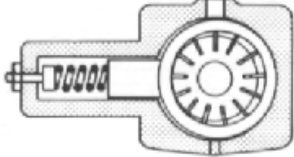


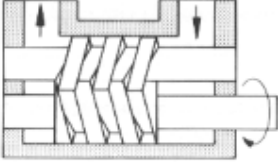

Tabela 3.1: Simbologia para bombas hidrostáticas

<i>Deslocamento Fixo</i>	<i>Deslocamento variável</i>	<i>Deslocamento variável com compensação de pressão</i>
		

As duas primeiras variáveis usadas para a seleção da bomba são a pressão máxima na qual ela pode operar e a vazão que pode fornecer, que devem ser suficientes para as necessidades do sistema hidráulico. Se apenas uma bomba for usada em um sistema sem acumulador e com várias funções simultâneas, ela deverá ser dimensionada para prover a soma de cada uma das vazões necessárias às funções presentes (HYDRAULIC SUPERMARKET, 2000b). Outros critérios utilizados podem depender da área de aplicação, englobando informações sobre custo inicial, durabilidade esperada, nível de ruído, nível de pulsação, eficiência e tipo de deslocamento (GÖTZ, 1991), bem como podem ser

considerados rendimento volumétrico, peso, dimensão, tipos de conexões e de acoplamentos disponíveis, disponibilidade e serviços oferecidos no mercado (HENKE, 1970).

Tabela 3.2: Esquemática de diversas bombas hidrostáticas (GÖTZ, 1991)

 <p>Bomba de pistões axiais de prato inclinado</p>	 <p>Bomba de palhetas</p>	 <p>Bomba de engrenagens externas</p>
 <p>Bomba de pistões axiais de eixo inclinado</p>	 <p>Bomba de palhetas com compensação de pressão</p>	 <p>Bomba de engrenagens internas</p>
 <p>Bomba de pistões radiais</p>	 <p>Bomba de parafuso</p>	 <p>Bomba gerotor</p>

A seção 4.3 do próximo capítulo mostra a forma de seleção das bombas hidrostáticas adotada neste trabalho. Dentre os critérios listados, são usados dados sobre pressões e vazão do sistema hidráulico, e rendimento volumétrico, tamanho e nível de ruído ou de vibração necessários à bomba. São ainda considerados, mesmo que indiretamente, os custos de aquisição e de operação da UPH.

Características individuais das bombas presentes no protótipo, de acordo com os seus princípios de deslocamento, estão apresentados a seguir.

3.4.1.1. Bomba de Engrenagens Externas

Estas bombas possuem uma solução mais simples se comparadas às demais: são compostas por um par de engrenagens idênticas, envolvidas por uma carcaça com vedação lateral por tampas. Por seu princípio construtivo, não existem bombas de engrenagens

externas de deslocamento variável; alguns modelos podem apresentar sistemas de compensação de forças e vazamentos, aumentando seus limites operacionais de vazão e pressão (von LINSINGEN, 2001). As pressões máximas em regime dependem das vazões empregadas no sistema, atingindo um máximo de 210 bar em bombas com compensação de forças radiais e axiais; as vazões admissíveis variam entre 5 e 150 lpm.

Por possuir apenas duas peças móveis (as engrenagens), a grande vantagem das bombas de engrenagens externas é sua robustez. Outras características positivas destas bombas são: baixo custo em pressões e vazões adequadas, boa tolerância a partículas contaminantes, facilidade de montagem em qualquer posição, e grande faixa de rotações possíveis em regime contínuo. Contudo, o uso deste tipo de bomba está restrito a baixas ou médias vazões e pressões não muito elevadas, e em algumas aplicações as pulsações de bombeamento e o nível de ruído gerado podem ser demasiadamente elevados, sendo necessária a adoção de outro tipo de bomba ou de outros componentes, como acumuladores, no sistema hidráulico.

3.4.1.2. Bomba de Parafusos

O princípio de funcionamento das bombas de parafusos se assemelha ao da bomba de engrenagens: dois ou três fusos são montados em uma carcaça, e o movimento relativo entre eles promove o bombeamento do fluido no sistema hidráulico. Estas bombas são apenas de deslocamento fixo, e são recomendadas para altas rotações (de até 5000 rpm), fornecendo fluido a pressões de até 200 bar, em deslocamentos volumétricos que variam de 2 a 800 cm³/rot.

A vantagem principal das bombas de parafusos é a ausência, em termos práticos, de pulsação de bombeamento. Outras vantagens são o baixo nível de ruído e a facilidade de balanceamento de forças hidráulicas (neste caso, somente axiais) existentes em funcionamento. Como pontos negativos, podem ser citados: alto custo de aquisição e baixo rendimento, devido ao atrito elevado em operação. Dificuldades na aquisição de bombas de parafusos no mercado nacional também devem ser consideradas em projetos de unidades de potência hidráulica.

3.4.1.3. Bomba de Palhetas

As bombas de palhetas são constituídas basicamente por um rotor cilíndrico com ranhuras radiais ou levemente inclinadas nas quais se encaixam palhetas retangulares móveis;

este conjunto, por sua vez, gira dentro um anel estator, montado em uma carcaça com fechamento lateral por tampas ou placas laterais.

Devido às características construtivas, este tipo de bomba pode ser de deslocamento fixo ou variável, e podem ou não apresentar sistemas de compensação de pressão. As bombas sem compensação de pressão são recomendadas para pressões máximas de 100 bar, em baixas a médias vazões. Por sua vez, bombas que possuem sistemas compensadores de pressão podem ser usadas em pressões de até 175 bar, e vazões mais elevadas (de até 150 lpm).

Como pontos positivos das bombas de palhetas, podem ser destacados: boa confiabilidade, bom rendimento volumétrico, baixo nível de ruído e pulsação, e custos comparáveis aos das bombas de engrenagens. As principais desvantagens são a baixa tolerância à contaminação do fluido e a sensibilidade às condições do fluido na sucção (INDUSTRIAL TRAINING ZONE, 2002).

3.4.1.4. Bomba de Pistões

Existem dois tipos de bombas de pistões, as *axiais* e as *radiais*, cujos nomes correspondem à posição de trabalho dos pistões em relação ao eixo do tambor cilíndrico que os contém. Em ambas, o princípio de funcionamento é o mesmo: pistões de movimentos alternativos, que succionam e descarregam o fluido de trabalho. As bombas de pistões axiais, por sua vez, se dividem em máquinas *de prato inclinado* e *de eixo inclinado*.

As bombas de pistões podem ser de deslocamento fixo ou variável, e podem possuir sistemas de compensação de pressão. São máquinas duráveis, recomendadas para operar em altas pressões (de 210 a 700 bar, dependendo da vazão exigida), onde outros tipos de bombas não podem ser usados, com vazões de até 210 lpm. Os rendimentos volumétricos são elevados (entre 95 e 98%) e os níveis de pulsação são baixos, para um número adequado de pistões; contudo, são bombas de alto custo de aquisição, níveis de ruídos mais elevados e de baixa tolerância à contaminação por partículas sólidas do fluido.

3.4.2. Reservatórios

O emprego primário do reservatório, Figura 3.8, é no armazenamento do fluido utilizado no sistema hidráulico. Outras funções deste componente são: dissipação de calor gerado no sistema hidráulico, remoção de ar do fluido, assentamento de partículas contaminantes e, em alguns casos, suporte da bomba, motor de acionamento e outros componentes de controle e segurança. Os aspectos construtivos para a realização destas

funções incluem paredes separadoras, drenos, filtros de ar, ímãs e fundos inclinados, devendo ser seguidas algumas recomendações de posicionamento destes componentes, como não localizar o duto de sucção próximo ao duto de retorno. Reservatórios podem ou não ser pressurizados, sendo que os primeiros não são muito usados em sistemas abertos.

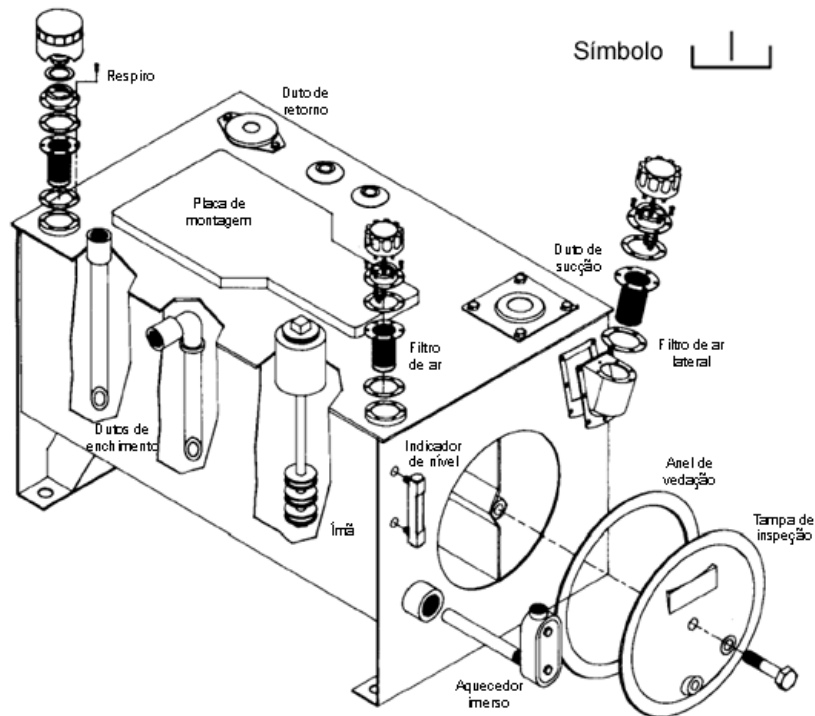


Figura 3.8: Reservatório retangular e acessórios (VESCOR, 1997)

O volume de óleo armazenado no reservatório deve suprir tanto as necessidades mínimas como as máximas do equipamento; por exemplo, em um sistema com vários cilindros, quando todos eles estiverem estendidos, o tanque deve manter uma quantidade mínima de fluido para evitar cavitação, e no momento em que os atuadores estiverem retraídos, ele deve armazenar todo o óleo de retorno. O tamanho do reservatório dependerá, contudo, do espaço disponível e de considerações sobre seu peso total, especialmente em aplicações móveis e aeroespaciais.

Como regra prática, o reservatório deve ser dimensionado para armazenar de 3 a 5 vezes o volume máximo bombeado por minuto pela bomba do sistema, com uma folga de 10% para criar uma “almofada” de ar no tanque (HYDRAULIC SUPERMARKET, 2000a). Devido a restrições de espaço e peso, em sistemas móveis recomenda-se que a capacidade não exceda 1,5 vezes o volume bombeado (HENKE, 1970). O uso de trocadores de calor diminui a necessidade de reservatórios de tamanhos muito maiores do que o volume bombeado pela bomba; assim, o método mais preciso para o dimensionamento do reservatório é determinar o calor gerado no sistema hidráulico que é absorvido pelo óleo e o calor que pode ser dissipado

no espaço disponível para o reservatório, calculando em seguida o tamanho do trocador de calor necessário e a capacidade adequada para o reservatório (VESCOR, 1997). A determinação acurada do calor gerado pelo sistema e dissipado pelo tanque, contudo, não é trivial.

Considerações sobre a localização do reservatório são importantes para o projeto do sistema hidráulico. Como exemplo, recomenda-se que este componente deve estar em um local devidamente ventilado (INDUSTRIAL TRAINING ZONE, 2002) e longe de fontes de calor, como caldeiras e linhas de vapor (VESCOR, 1997). Em ambientes externos, o reservatório deve ser protegido do sol direto e de chuvas e vento. Por fim, a pintura do tanque também deve ser analisada: as tintas não devem reagir com o fluido, e são recomendadas cor preta para ambientes internos e branca para ambientes externos.

3.4.3. Acumuladores

Um acumulador hidráulico é um componente que armazena fluido sob pressão, por meio de forças dinâmicas provenientes da gravidade, de molas ou de gases comprimidos (ESPOSITO, 2000). De acordo com a força empregada, os acumuladores podem ser classificados como *de peso morto*, *de mola* ou *a gás*, cujos símbolos estão apresentados na Tabela 3.3. Este último tipo ainda é dividido de acordo com a separação existente entre o gás e o fluido, tendo com subtipos acumuladores *sem separador gás/líquido*, *com separador de pistão* e *com separador flexível* (diafragma ou bexiga). Os mais comuns no mercado são os acumuladores a gás com separador flexível, Figuras 3.9 e 3.10.

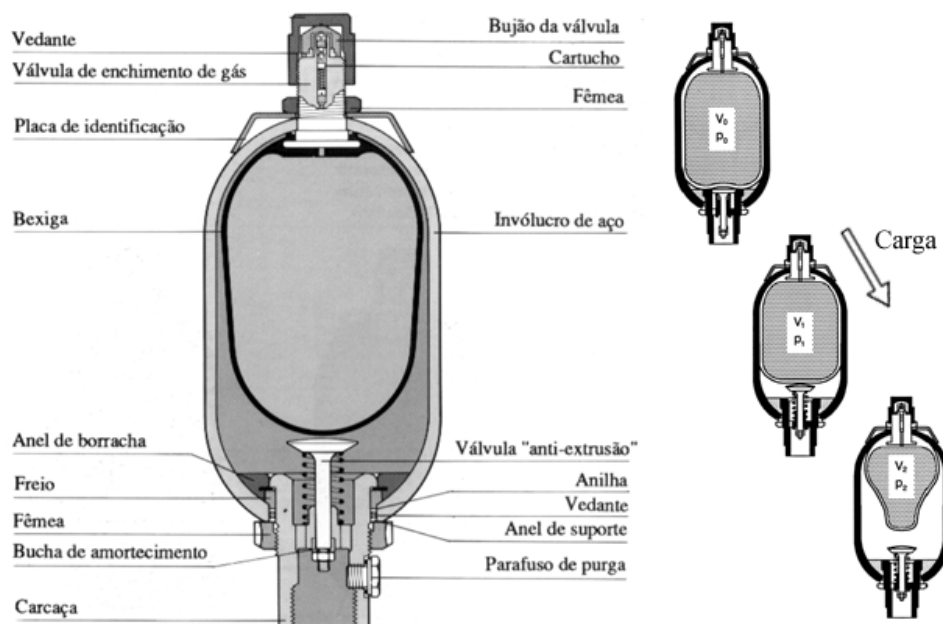


Figura 3.9: Acumulador de bexiga (GÖTZ, 1991; BOSCH, 2002)

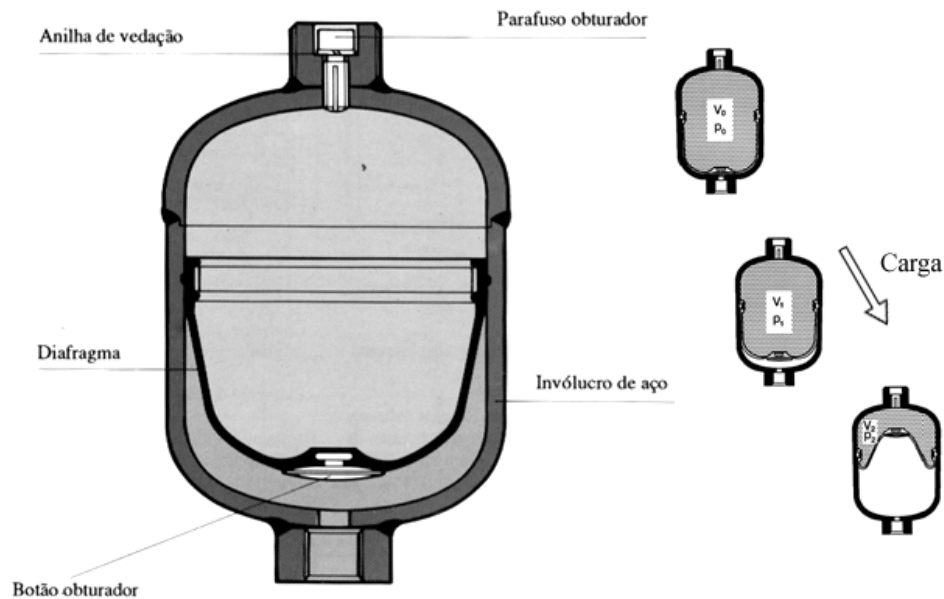


Figura 3.10: Acumulador de diafragma (GÖTZ, 1991; BOSCH, 2002)

Tabela 3.3: Simbologia para acumuladores hidráulicos

<i>Genérico</i>	<i>A gás</i>	<i>De peso morto</i>	<i>De mola</i>

Os acumuladores são empregados geralmente em circuitos hidráulicos que desempenham as seguintes funções (TRINKEL, 1996):

- Suplementar vazão da bomba em sistemas hidráulicos com médios a longos intervalos entre ciclos de trabalho;
- Manter pressão em um cilindro enquanto a bomba está parada ou descarregando para o reservatório;
- Manter um suprimento de fluido pressurizado para situações de emergência;
- Reduzir choques hidráulicos ou absorver pulsação produzida por bombas hidráulicas.

Outros usos incluem compensação de expansão térmica em sistemas fechados, elementos de suspensão em veículos e diminuição do nível de ruído gerado pelo sistema.

A seleção e o dimensionamento dos acumuladores dependem de vários aspectos, como aplicação desejada, pressões máximas e mínimas do sistema, e volume a ser armazenado no componente. No protótipo desenvolvido nesta pesquisa, a seleção do uso de um acumulador na UPH ocorre concomitantemente à escolha do tipo de bomba hidrostática a ser adotada; as regras implementadas para seleção são mostradas na seção 4.3 do próximo capítulo.

Cada emprego do acumulador delimita um conjunto de informações necessárias para o seu dimensionamento; por exemplo, para compensação de expansão térmica, é necessário no mínimo saber o tipo de fluido utilizado, o material da tubulação, o volume de fluido no trecho considerado, as temperaturas normal e máxima do fluido, e as pressões normal e máxima de operação (NFPA, 1997). Algumas equações para dimensionamento de acumuladores a gás são encontradas na literatura especializada (como HYDRAULIC SUPERMARKET, 2000a e von LINSINGEN, 2000). Para a escolha de acumuladores a gás, a Bosch traz em seus catálogos ábacos que usam dados de pressões (de pré-carga do acumulador, e mínima e máxima de operação do sistema) e de volume necessário para o componente; já a Parker Hannifin oferece aos seus clientes um programa de computador¹⁰ para seleção e dimensionamento de seus acumuladores, de acordo com as necessidades do sistema hidráulico a ser projetado.

Uma última observação refere-se à pressão de pré-carga a ser utilizada nos acumuladores a gás com separador flexível: a Bosch (BOSCH, 2002) recomenda que a pré-carga usada no acumulador seja 90% da pressão mínima do sistema hidráulico; ainda, a pressão máxima do sistema não deve exceder quatro vezes a pressão de pré-carga, para evitar o surgimento de problemas nos elementos flexíveis dos acumuladores. Por sua vez, as recomendações feitas em (HYDRAULIC SUPERMARKET, 2000a) levam em conta a função desejada para este componente: a pré-carga deve ser 90% da pressão mínima de operação em aplicações de armazenamento de fluido, 60% em absorção de choques e 70% em amortecimento de pulsação. Desta forma, se não houver possibilidades de realizar testes de desempenho do sistema para determinar a pré-carga a ser utilizada, o projetista poderá adotar as recomendações de um ou outro fabricante de acordo com suas convicções ou experiências pessoais.

3.4.4. Válvulas

Uma das principais considerações em projetos de sistemas hidráulicos é a forma utilizada para controle de energia hidráulica, responsável por três importantes funções no

¹⁰ Disponível em <http://www.parker.com/inphormstore/>

sistema: controle de vazão, controle de pressão e direcionamento do fluido. Bombas de deslocamento variável com compensação de pressão podem exercer as duas primeiras funções; aspectos de segurança e velocidade de acionamento, contudo, fazem com que outros componentes sejam adotados. Os elementos mais usados para controle de energia em sistemas hidráulicos são as *válvulas*, que se dividem em três tipos principais: *direcionais*, *de controle de pressão* (limitadoras e redutoras) e *de controle de vazão*. Exemplos de válvulas¹¹ estão ilustrados nas Figuras 3.11 a 3.14.

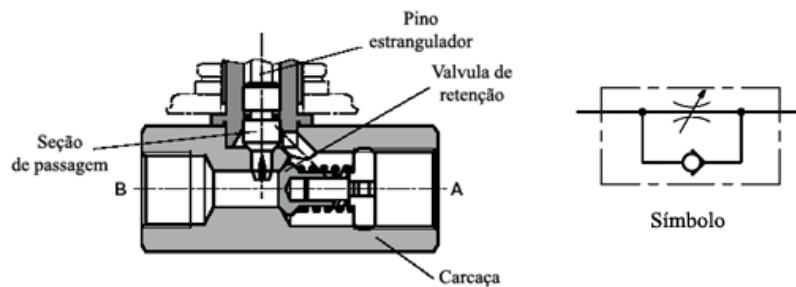


Figura 3.11: Válvula de controle de vazão, com retorno livre por válvula de retenção.

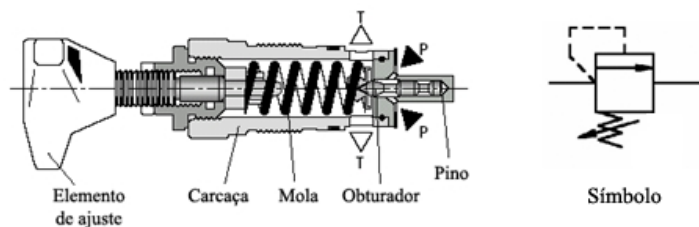


Figura 3.12: Válvula de controle de pressão.

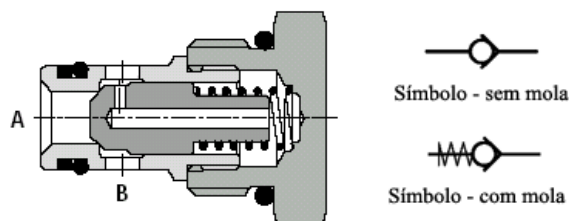


Figura 3.13: Válvula de retenção com mola.

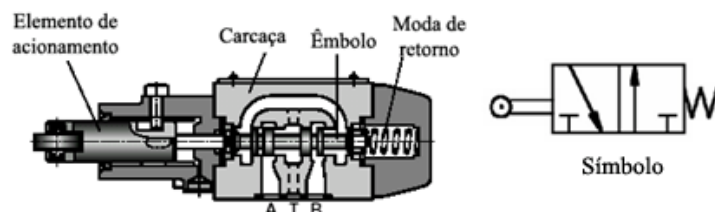


Figura 3.14: Válvula direcional (três vias e duas posições), acionamento por rolete e retorno por mola.

¹¹ De catálogos da Bosch-Rexroth, disponíveis em http://www.boschrexroth.com.br/index_catalogo.htm

Em unidades de potência hidráulica, válvulas de controle de pressão são usadas para segurança, para alívio de pressão ou para descarga da bomba. As de controle de vazão são geralmente associadas a acumuladores hidráulicos, para limitar a velocidade de descarga do fluido armazenado a alta pressão. Por fim, as válvulas direcionais podem ser aplicadas na descarga de bombas ou acumuladores e no bloqueio de fluxo de óleo em um sentido de escoamento (válvulas de retenção); neste último caso, são usadas para isolar partes do circuito hidráulico, proteger filtros, descarregar acumuladores etc.

As considerações para seleção de válvulas dependem primeiramente do seu uso no sistema hidráulico. Por exemplo, na segurança do sistema hidráulico pode ser usada uma válvula limitadora de pressão que permita ajustes para altas pressões, pois a sua pressão de ajuste deve ser um pouco inferior àquela que pode danificar elementos do sistema. Este é o caso das válvulas de controle de pressão usadas nas unidades de potência das Figuras 3.3, 3.4a e 3.4c.

Outros critérios de escolha dependem do tipo de válvula utilizada: para as de controle de vazão, devem ser observados fatores como pressões de operação do sistema, vazão máxima de ajuste, faixas de vazão e precisão de operação da válvula, enquanto nas válvulas de controle de pressão os critérios incluem pressão máxima admissível no sistema, pressão de ajuste, vazão máxima permitida, comportamento em cargas transientes, tempo de resposta, e outros (HENKE, 1970). O ambiente de trabalho e a compatibilidade com o fluido utilizado também devem ser tratados na seleção destes componentes. Os catálogos de indústrias costumam trazer curvas de funcionamento e dados diversos para análise das válvulas disponíveis.

3.4.5. Filtros Hidráulicos

Filtros hidráulicos, Figura 3.15, são os elementos responsáveis pela redução a um nível aceitável do tamanho e da concentração de partículas contaminantes do fluido de trabalho, que acabariam diminuindo a vida útil dos componentes de um sistema hidráulico. A contaminação do fluido ocorre devido a uma ou mais das seguintes razões: partículas acumuladas durante a montagem ou manutenção do sistema, geradas dentro dos componentes durante a operação, ou introduzidas no sistema hidráulico a partir do ambiente externo. Os elementos filtrantes utilizados têm em sua constituição fios metálicos, papel, tecido, fibras orgânicas, resinas, entre outros constituintes.

De acordo com a localização no sistema, os filtros hidráulicos podem ser classificados como *de retorno*, *de sucção* e *de linha de pressão*. Em unidades de potência hidráulica, os

dois primeiros tipos são mais utilizados; os filtros de linha de pressão são usados a montante de componentes, como válvulas direcionais, que necessitem de melhores filtragens durante a sua operação. Filtros também podem possuir válvulas de retenção conjugadas, para aumentar a segurança do sistema hidráulico e/ou evitar problemas em componentes (por exemplo, cavitação em bombas ou quebra do filtro).

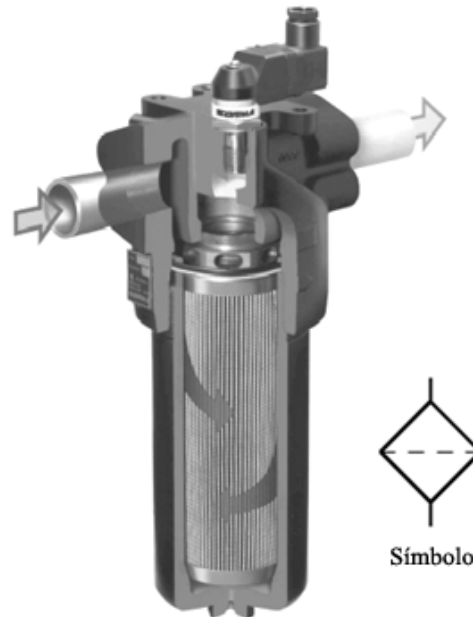


Figura 3.15: Filtro hidráulico (SOFIMA, 2002)

Filtros de sucção geralmente são empregados na retenção de partículas de grandes dimensões, pois elementos filtrantes de baixa porosidade poderiam entupir rapidamente e gerar problemas de cavitação nas bombas. São usados principalmente para reduzir a quantidade de contaminação do fluido na primeira vez que um sistema hidráulico é posto em funcionamento; filtros de retorno só retêm partículas do óleo que já atravessou o sistema e está sendo levado de volta ao reservatório (INDUSTRIAL TRAINING ZONE, 2002).

Fatores para a seleção de filtros incluem capacidade volumétrica, pressão suportada, grau de filtração, queda aceitável de pressão, tempo de serviço, manutenção, tipo de conexão (em linha, montado no reservatório etc.), compatibilidade com o fluido e custo (HENKE, 1970). Outras considerações podem ser feitas para o tipo de indicador de acúmulo de partículas a ser utilizado (simples, mecânico ou elétrico) e os custos e conseqüências de eventuais paradas do equipamento (INDUSTRIAL TRAINING ZONE, 2002).

Em relação ao grau de filtração, fabricantes de componentes hidráulicos adotaram o índice β , que indica quão eficiente é o filtro na retenção de partículas de determinada dimensão. Este índice, obtido em testes de laboratório, é a razão entre o número de partículas maiores que uma dimensão n antes do filtro e a quantidade de partículas também maiores que

o tamanho n depois dele. Para exemplificar, o índice $\beta_{25} = 10$ indica que na entrada do filtro a quantidade de partículas maiores que $25 \mu\text{m}$ é 10 vezes maior que a quantidade presente na saída. A adoção de um determinado grau de filtração dependerá muito dos componentes do sistema hidráulico: como exemplo, caso o componente limitante para a filtração seja a bomba, e sendo as de pistões mais sensíveis a partículas contaminantes do que bombas de engrenagens, aquelas necessitarão de uma melhor filtragem no fluido de trabalho.

4. O Sistema PHIDR

Enquanto os dois capítulos prévios são voltados à base conceitual desta pesquisa, o presente capítulo contextualiza as realizações práticas deste trabalho, isto é, as tarefas para criação de um protótipo de sistema especialista, aqui chamado PHIDR (de Potência HIDRáulica). Estão discutidas a seguir as etapas de desenvolvimento empregada no protótipo (seção 4.2), a proposta inicial de organização para o projeto de UPHs (seção 4.3) e as dificuldades encontradas neste trabalho (seção 4.4).

4.1. Propósitos e Arquitetura do Protótipo PHIDR

Quais são os propósitos para a criação de um protótipo de um sistema especialista? Para Silva (1998), o principal objetivo de um protótipo é possibilitar um aprendizado inicial sobre o domínio de conhecimento considerado. Além deste motivo, duas outras razões justificam o esforço de desenvolvimento do protótipo neste trabalho:

- Ele é considerado a primeira versão do sistema PHIDR, que deve passar por modificações a fim de ampliar a sua funcionalidade;
- Na aquisição de conhecimento (subseção 4.2.2), a criação do protótipo foi idealizada para demonstrar na prática a aplicação da técnica de sistemas especialistas, com o objetivo de estimular a colaboração de especialistas na pesquisa.

O componente mais importante de um protótipo de SE é a sua base de conhecimento, que deve ser suficientemente elaborada para resolver alguns dos subproblemas existentes, mas relativamente pequena para não requerer um grande esforço no seu desenvolvimento (GONZALEZ; DANKEL, 1993). No projeto de unidades de potência hidráulica, por exemplo, um dos subproblemas existentes é a seleção do princípio de deslocamento da bomba hidrostática.

A versão final do protótipo pode realizar a escolha de uma unidade de potência hidráulica dentre quatro usadas em sistemas hidráulicos (subseção 4.3.1.3), que estão presentes no sistema KEOHPS (SILVA, 1998), e do princípio de deslocamento da bomba hidrostática a ser adotada na UPH (subseção 4.3.1.2), de acordo com regras definidas por informações presentes na literatura da área.

Na arquitetura proposta para o sistema PHIDR (Figura 4.1), a interface de entrada de dados do protótipo desenvolvido é totalmente textual: as perguntas e as informações de ajuda são feitas dentro do ambiente CLIPS, escolhido para a criação do sistema especialista, sem a presença de um módulo gráfico externo para a interface.

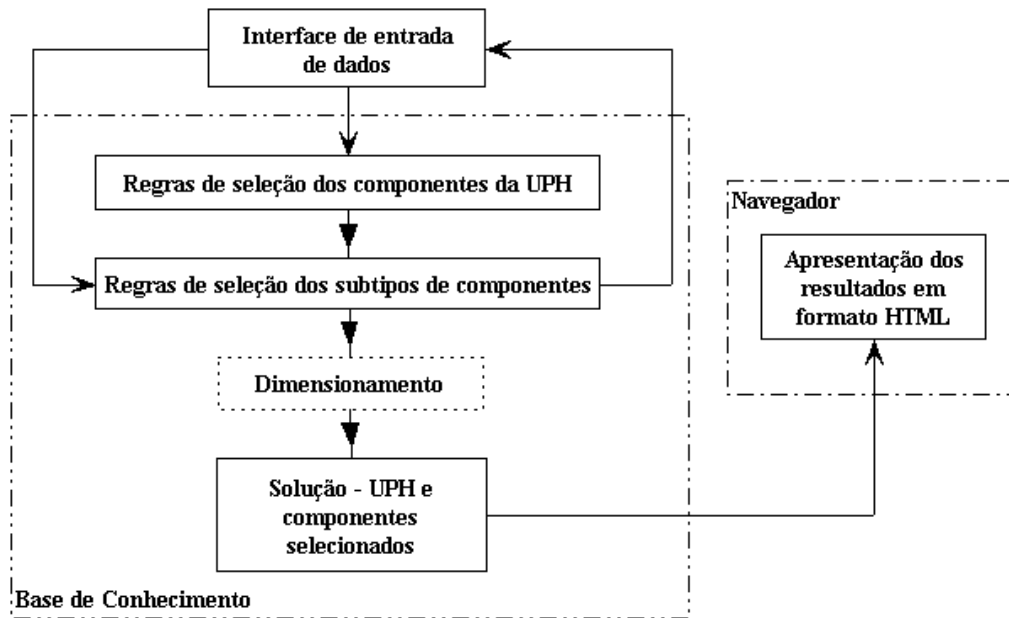


Figura 4.1: Arquitetura do sistema PHIDR

A inserção dos dados do projeto da unidade de potência hidráulica no protótipo PHIDR é simples e direta: todas as perguntas são respondidas por valores ou por opções, ambas inseridas através do teclado; e, quando necessário, uma breve explicação sobre a questão (ver apêndice A) está disponível para consulta. Para exemplificar, a figura 4.2 apresenta a primeira pergunta realizada pelo protótipo PHIDR, a respeito de considerações para a seleção da unidade de potência hidráulica, em que o projetista pode inserir valores dentro de uma faixa pré-estabelecida; já a figura 4.3 ilustra outras duas questões do sistema onde o usuário seleciona uma das opções possíveis. As demais perguntas estão detalhadas no apêndice A deste texto.

Por sua vez, a divisão presente na base de conhecimento do protótipo PHIDR segue as etapas de decisão que estão apresentadas na seção 4.3. Na segunda destas fases, a interação com o usuário do protótipo se deve à necessidade de outros requisitos de projeto, além dos inicialmente inseridos pelo usuário, para a seleção das subclasses dos componentes presentes na unidade de potência hidráulica. Na atual versão do protótipo, não está incluído o dimensionamento dos componentes escolhidos (ver 4.3.1.4 para mais detalhes sobre este ponto).

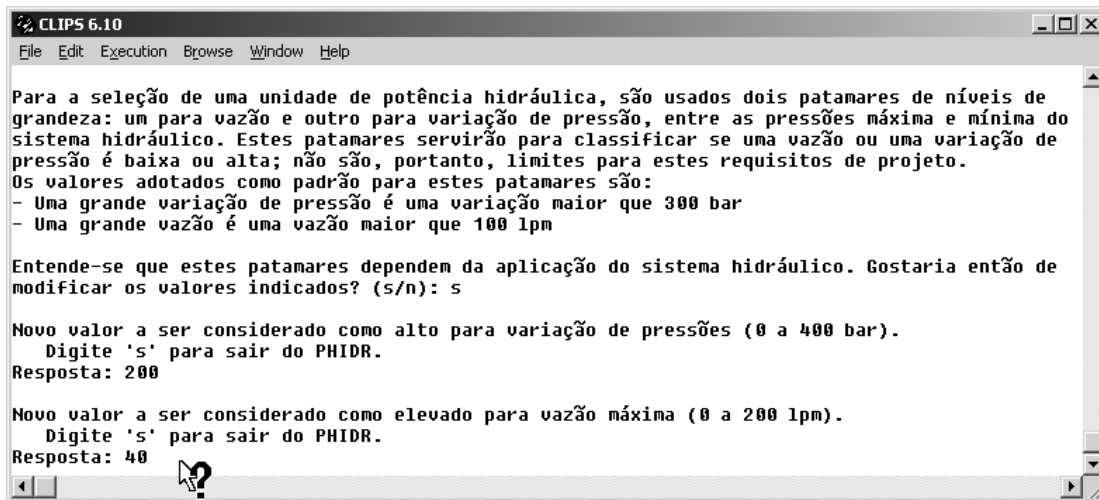


Figura 4.2: Exemplo de entrada com valores do protótipo PHIDR

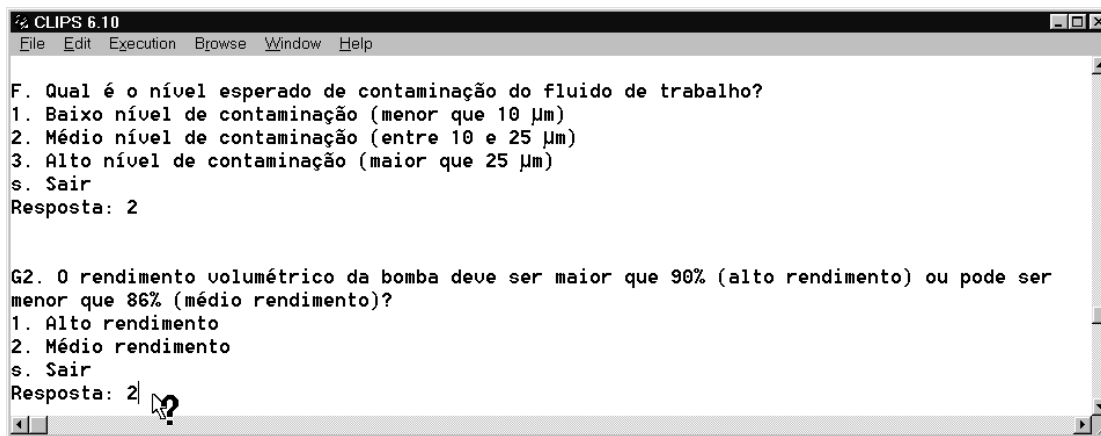


Figura 4.3: Exemplo de entradas com opções do protótipo PHIDR

Após a interação com o usuário, o sistema por fim apresenta os resultados da seleção através de um documento em HTML, que pode ser aberto em qualquer navegador disponível (Explorer, Netscape, Opera, entre outros). Um exemplo de arquivo de resultados efetivamente criado pelo protótipo PHIDR pode ser visto no apêndice B.

4.2. Desenvolvimento do protótipo

Segundo Giarratano e Riley (1994), o projeto de um sistema especialista é iniciado pela determinação da relevância do problema a ser abordado pelo SE, etapa que já foi apresentada no capítulo 3. Discutida a importância do domínio de problema, outras tarefas são realizadas, como a definição de fontes que podem ser consultadas e o planejamento do desenvolvimento do sistema. Nesta seção, o interesse principal é descrever algumas das

tarefas da fase de projeto do sistema especialista: a representação, as estruturas de controle, a estratégia de implementação, o projeto preliminar da interface e o planejamento dos testes necessários. Outras tarefas, referentes às estruturas de controle no sistema e à estrutura interna de fatos, estão implicitamente colocadas na seção 4.3.

Nesta seção ainda é discutida a alternativa realizada para a aquisição de conhecimento sobre projeto de unidades de potência hidráulica, através do desenvolvimento de um protótipo com as informações encontradas em livros, artigos e catálogos de fabricantes. Comentários sobre as dificuldades encontradas no trabalho podem ser encontrados na última seção deste capítulo.

4.2.1. Tarefas de projeto da base de conhecimento

A tarefa de *representação* envolve especificar, de acordo com o domínio de problema escolhido, como o conhecimento deve ser representado na base de conhecimento. Para a implementação da base de conhecimento do PHIDR, foram escolhidas três formas de representação: regras, redes semânticas e objetos. Estas representações já foram apresentadas no segundo capítulo; convém recordar que, em conjunto, elas são adequadas para modelar o conhecimento necessário para a solução de problemas complexos em engenharia, como é o caso de projetos em hidráulica.

Na versão atual do protótipo PHIDR, as regras implementadas podem ser vistas esquematicamente na seção 4.3, figuras 4.5 e 4.6 e tabela 4.4. As classes e objetos são usados para modelar as unidades de potência hidráulica e os seus componentes; na base de conhecimento do protótipo, foram criadas duas classes, uma para as UPHs disponíveis e outra para as subclasses de bombas hidráulicas, conforme mostradas nas tabelas 4.1 e 4.2. Por fim, as redes de inferência são usadas para definir relações (Figura 4.4) entre as classes e os objetos criados, como “bomba de parafusos *é uma* bomba hidrostática”, e entre as classes modeladas, como “bomba hidrostática *faz parte da* unidade de potência hidráulica”.

Parte das *estruturas de controle* de um sistema especialista é determinada pela escolha da forma de raciocínio (ou de inferência, como também é chamada) adotada no SE. São dois os tipos clássicos de métodos de inferência: o *encadeamento direto* e o *encadeamento reverso*. Neste segundo tipo, é feita uma hipótese, que corresponde em geral à resposta de um problema, e são procurados dados que a comprovem ou não; é a forma de raciocínio usada, por exemplo, em problemas de diagnóstico. O encadeamento direto, por sua vez, é feito dos dados de entrada para a solução, sendo apropriado para atividades como projeto e planejamento; portanto, esta forma de raciocínio foi a escolhida para o sistema PHIDR.

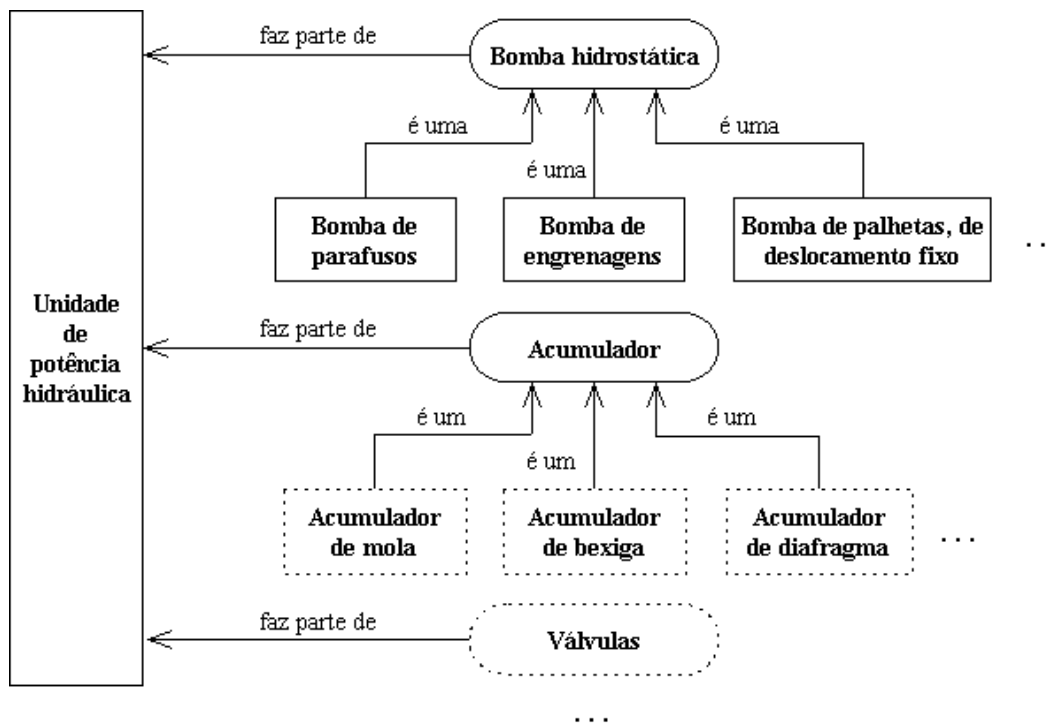


Figura 4.4: Exemplo das redes de inferência presentes no protótipo PHIDR

Tabela 4.1: Classe Unidade de Potência Hidráulica

Variável	Significado
ID	Número de identificação da unidade.
Descricao	Descrição curta da UPH, de acordo com os componentes presentes.
Tipo-de-bomba	Tipo de bomba presente na unidade. Na atual versão do SE, o tipo pode ser de deslocamento fixo ou de deslocamento variável com compensação de pressão.
Acumulador	Indicação da presença ou ausência de acumulador na unidade.
Filtro	Tipo de filtro presente na unidade. Pode ser: só de retorno, só de sucção, ambos os tipos, ou nenhum.
Usos	Descrição das condições de escolha mais adequadas para a unidade, conforme ilustrado nas Figuras 4.3 e 4.4. Usado para apresentação dos resultados no ambiente textual do CLIPS e no arquivo de resultados.
Informacoes-gerais	Informações gerais da UPH, como características de funcionamento e custos de aquisição e de operação. Usado para apresentação dos resultados no ambiente textual do CLIPS e no arquivo de resultados.

Tabela 4.2: Classe Bomba Hidrostática¹²

Variável	Significado
TipoBomba	Descrição curta da bomba, informando seu tipo e princípio de deslocamento.
Deslocamento	Tipo de deslocamento (fixo ou variável).
PressaoMin	Pressão mínima permitida de operação da bomba.
PressaoMax	Pressão máxima permitida de operação.
VazaoMin	Vazão mínima permitida de operação.
VazaoMax	Vazão máxima permitida de operação.
ContaminacaoAceitavel	Nível de contaminação máximo tolerado.
PodeUsar	Variável de controle para segunda etapa de seleção da UPH (conforme subseção 4.3.1.2). Indica que o princípio de deslocamento pode ser usado nos requisitos de projeto.
Escolhida	Variável de controle para a segunda etapa de seleção da UPH. Indica que o princípio de deslocamento foi escolhido dentre aqueles que podem ser usados nos requisitos de projeto.
TextoExplicacao	Descrição dos motivos de escolha do princípio de deslocamento, conforme subseção 4.3.1.2, e de sugestões sobre a porosidade do filtro utilizado na UPH.
Imagem	Nome do arquivo gráfico usado no arquivo de resultados.

O próximo passo no desenvolvimento é escolher a ferramenta para a criação do sistema especialista. Os critérios de seleção de uma determinada ferramenta começam com a sua capacidade de lidar com as representações e o método de raciocínio selecionados, sendo também considerado na escolha fatores como custos envolvidos, suporte técnico, confiabilidade, manutenibilidade e treinamento para o uso da ferramenta.

Como mostrado no capítulo 2, é possível utilizar linguagens de programação, como LISP e PROLOG, no desenvolvimento de sistemas especialistas. Nesta pesquisa, todavia, optou-se pelo uso de programas especialmente desenvolvidos para a criação de sistemas especialistas: foi adotado para o desenvolvimento do PHIDR o ambiente CLIPS (C Language Integrated Production System). Além de permitir o uso das representações e da forma de raciocínio escolhidas, este ambiente foi amplamente testado na criação de diversos sistemas especialistas, pode ser obtido gratuitamente na Internet, é bem documentado (bons manuais e vários fóruns de discussão na rede) e é multi-plataforma (existem versões para Windows, Mac OS, Linux e Unix). A desvantagem mais aparente do CLIPS é a sua interface totalmente

¹² Adaptado da pesquisa de Zimmermann (2003)

textual; conforme será discutido posteriormente, parte desta limitação pode ser elegantemente contornada pelo uso de regras de criação de documentos em formato HTML.

A *estratégia de implementação* define a forma de codificação de conhecimento no sistema especialista; para tanto, é escolhido um modelo de desenvolvimento para o SE. Como já foi discutido no capítulo 2, nesta pesquisa optou-se pelo *modelo incremental*. Dentro desta perspectiva, o protótipo do sistema PHIDR é considerado neste trabalho como o primeiro estágio de um futuro sistema especialista, e não somente um modelo para aprendizado que será descartado no final da sua criação. Incrementos de funcionalidade no protótipo, por meio de acréscimos na base de conhecimento, servirão para desenvolver versões cada vez mais elaboradas de um sistema de auxílio para projeto de unidades de potência hidráulica.

O *projeto preliminar da interface* consiste na especificação das características da interface do SE para uma primeira análise do usuário. A interface é um componente importante do sistema especialista, conforme mostrado no segundo capítulo; porém, no desenvolvimento do protótipo PHIDR, a prioridade foi a criação da base de conhecimento do sistema, para ser validada por especialistas e posteriormente ampliada com novos conhecimentos adquiridos. Desta forma, as alternativas mais complexas para interfaces gráficas (por exemplo, programação em uma linguagem como Visual C++ ou o uso de um ambiente como o wxCLIPS¹³) foram descartadas para o desenvolvimento do protótipo.

A apresentação inicial do protótipo PHIDR e a inserção dos requisitos de projeto necessários à seleção da unidade de potência hidráulica (ver seção 4.3) são feitas pelo ambiente textual do CLIPS: as perguntas são mostradas no próprio *shell* e as respostas são inseridas via teclado por quem usa o sistema. Para a apresentação dos resultados da seleção, contudo, uma interface puramente textual é limitada: projetistas estão habituados a analisar diagramas que auxiliam no entendimento geral dos circuitos do sistema hidráulico. Portanto, para que o sistema PHIDR possa fornecer explicações mais completas sobre os resultados da seleção, a apresentação da solução deve ser ilustrada com os diagramas da UPH e da simbologia dos componentes selecionados.

Não sendo possível a elaboração de uma interface gráfica diretamente no ambiente CLIPS, foi utilizada a alternativa aplicada nos protótipos de Silva (1998) e Alves (2001): a criação de arquivos HTML para apresentar em um navegador (como o Explorer e o Firefox) os resultados obtidos pelo sistema especialista. A característica mais importante de um arquivo HTML para este trabalho é que ele não precisa de nenhuma ferramenta especial para sua criação; um documento em HTML é simplesmente um arquivo de texto comum cujos

¹³ Disponível em <http://www.anthemion.co.uk/wxclips/>

navegadores interpretam e exibem o documento com as formatações definidas por etiquetas, como <P> para parágrafo, presentes no texto. No sistema PHIDR, a apresentação dos resultados é feita por uma regra que recebe os valores de requisitos de projeto e as explicações sobre a escolha da unidade de potência e da subclasse de bomba, e gera um arquivo HTML com textos e imagens da UPH e da bomba hidrostática selecionadas. Um exemplo de arquivo de resultados pode ser visto no Apêndice B.

Para finalizar as tarefas de projeto da base de conhecimento aqui tratadas, o *planejamento dos testes necessários* envolve a determinação de como o código é testado e de como os resultados são analisados. Os testes do código foram realizados pelo engenheiro do conhecimento, que envolveu a verificação da base de conhecimento, ou seja, a averiguação se os resultados do SE correspondiam àquilo que foi implementado. Na verificação, foram testadas todas as possibilidades de saída do protótipo PHIDR, correspondendo a oito combinações possíveis para as escolhas dos componentes da unidade de potência hidráulica (ver 4.3.1.1) e 22 combinações existentes (6 para bombas de deslocamento variável e 16 para de deslocamento fixo) para a escolha da subclasse de bomba hidrostática da UPH, conforme subseção 4.3.1.2. Complementaram estes testes de código a verificação das entradas do protótipo (faixas de valores e opções das questões presentes) e a análise do arquivo de resposta criado pelo sistema especialista, que inclui as explicações sobre a seleção de uma determinada unidade de potência.

Na análise das respostas do protótipo PHIDR, foi escrito um questionário de avaliação (apêndice C) para usuários e projetistas do sistema especialista. Dentre os especialistas contatados para realizar a validação do SE, dois enviaram avaliações do sistema; estes questionários podem ser vistos no apêndice D. As respostas dos especialistas estão analisadas no capítulo 5 deste documento.

4.2.2. Idéias para aquisição de conhecimento

A aquisição de conhecimento para a criação de um sistema especialista começa pela identificação das possíveis fontes de informação e conhecimento disponíveis, seja em material escrito, seja especialistas do domínio considerado. Para o sistema PHIDR, primeiramente foram consultados livros, catálogos de fabricantes e referências na internet, a fim de organizar um conjunto inicial de informações sobre projeto de unidades de potência hidráulica. Em seguida, formulou-se uma lista de questões, com as sete perguntas listadas a seguir, para ser enviada a especialistas em hidráulica e fóruns de discussão da área na internet.

1. O projeto da unidade de potência hidráulica corresponde à análise de todos os componentes necessários para o seu correto funcionamento. Porém, deve haver uma seqüência mais adequada para a análise de cada um dos seus componentes. Para você, quais são os componentes (em ordem de importância) que são analisados prioritariamente (por exemplo, determina-se a bomba, depois o reservatório, e assim por diante)? Quais as razões para se empregar tal seqüência?
2. Ainda em relação a pergunta anterior: descreva com detalhes os procedimentos de dimensionamento para os três principais componentes da unidade de potência.
3. A fim de definir o grau de relevância que um sistema especialista poderá ajudar no projeto de unidades de potência: quanto tempo estima-se que é utilizado para a seleção e dimensionamento para cada componente da unidade de potência? Há algum motivo para se gastar mais tempo em um determinado componente?
4. Em princípio, o protótipo do sistema especialista deverá abranger os principais componentes da unidade de potência hidráulica. Quais são considerados os componentes acessórios (aqueles que nem sempre são utilizados) em uma unidade de potência?
5. São várias as aplicações que um sistema hidráulico pode ter, e em cada uma delas existem diferentes necessidades para o projeto da unidade de potência. Sendo assim, quais características principais (ou necessárias) são analisadas para diferentes aplicações de unidades de potência (por exemplo, em hidráulica móbil, industrial, entre outras)?
6. Do que depende a escolha dos filtros para uma determinada unidade de potência hidráulica? Filtros de ar são sempre usados, ou são considerados dispensáveis em algumas aplicações? Por quais razões?
7. A temperatura do óleo é uma variável importante para o correto funcionamento de um sistema hidráulico. Porém, sempre se mostra necessário o uso de trocadores de calor (devido a custos envolvidos, manutenção necessária, e outros fatores) para controlar a temperatura? Comente porque adotar ou não esses componentes em um sistema hidráulico.

Esperava-se que houvesse um grande retorno para esta lista de perguntas, o que permitiria obter novas informações sobre projeto de UPH e também identificar especialistas interessados em colaborar com o desenvolvimento do sistema PHIDR. Contudo, apenas um

especialista em hidráulica para siderurgia¹⁴ respondeu as questões acima citadas. Algumas considerações retiradas do questionário enviado por este especialista, que foram aplicadas nas etapas de projeto a ser apresentada na seção 4.3, são:

- Alguns requisitos de projeto para a unidade de potência hidráulica, como vazão e pressão, são calculados através de dados obtidos no projeto informacional do sistema hidráulico: forças, áreas, velocidades, espaço disponível etc.;
- O dimensionamento e a seleção de componentes para uma unidade de potência hidráulica devem depender da área de aplicação considerada, e em cada uma delas “o projeto da UPH terá sua peculiaridade e também prioridades diferentes”. Este foi um dos fatores para a escolha da hidráulica industrial como área a ser estudada nesta pesquisa, conforme explicado no capítulo anterior;
- Alguns dos componentes que nem sempre são usados na unidade de potência hidráulica são: registro de sucção, visor de nível, termômetro, termostato, indicador de nível, pressóstato, filtro de ar, bomba de recirculação, e trocadores de calor;
- Algumas das características analisadas em diferentes áreas da hidráulica são: tipo de circuito (aberto ou fechado), nível de filtragem, tipo de reservatório (redondo ou retangular), tipo de óleo, pressão, e tipo de bomba (fixa ou variável).

Como o retorno da lista de questões foi pequeno, tentou-se então uma nova abordagem para a aquisição de conhecimento para projeto de unidades de potência hidráulica: a partir das informações obtidas na literatura especializada e das considerações retiradas do questionário recebido, foi criado um protótipo de sistema especialista, com o objetivo de mostrar na prática a técnica envolvida nesta pesquisa e criar um maior interesse na colaboração para o desenvolvimento de outras versões do sistema PHIDR.

Para a distribuição deste protótipo, foi feita em inglês uma página na internet¹⁵, que contém informações sobre a pesquisa, as instruções de funcionamento e os arquivos de instalação do PHIDR. Por sugestões, foi desenvolvida posteriormente uma versão em português do protótipo, para ser distribuída a possíveis colaboradores nacionais. Não se mostrou necessário, entretanto, tornar disponível o sistema na página citada.

¹⁴ Fernando Luiz Furst

¹⁵ Em <http://www.laship.ufsc.br/hpudesign>

Utilizando o protótipo PHIDR, um especialista pode analisar a seqüência adotada para projeto de UPHs, validar o conhecimento codificado, sugerir modificações no sistema e colaborar com novos pacotes de conhecimento para o problema abordado. Para padronizar a análise inicial do protótipo, foi escrito um questionário de avaliação, conforme mostrado no apêndice C, com perguntas sobre as entradas e os resultados do programa, e sobre características gerais do protótipo. Tal qual a primeira lista de questões mostrada, esperava-se a partir deste questionário coletar informações dos especialistas e identificar possíveis colaboradores para a pesquisa. E, assim como na primeira alternativa, o retorno obtido foi pequeno (dois especialistas responderam a avaliação).

Não foi possível obter novos questionários ou tentar uma diferente abordagem para aquisição de conhecimento, limitando-se a base do protótipo PHIDR ao conhecimento obtido na literatura e no questionário enviado pelo especialista em hidráulica para siderurgia. À parte deste fato, foi prevista como etapa seguinte de desenvolvimento do protótipo a aquisição de conhecimento, por meio de novos questionários, para a ampliação da base do sistema especialista e a criação de uma nova versão do protótipo PHIDR.

Conforme o modelo incremental, esta nova versão deve passar pelas etapas de verificação e validação, para que possa ser repetido novamente o ciclo iterativo de aquisição → representação → verificação → validação, a fim de criar novas versões melhoradas do sistema especialista. O próximo capítulo retomará estas considerações, com o objetivo de propor futuros trabalhos nesta área.

4.3. Proposta de organização para projeto de UPHs

Definidas as características de desenvolvimento do protótipo, esta seção discorre sobre como foi tratado, na criação do SE, o domínio de problema escolhido para a pesquisa. Primeiramente, é interessante recordar alguns pontos discutidos no terceiro capítulo: o projeto de unidades de potência hidráulica envolve a seleção e o dimensionamento dos vários componentes empregados, sendo importante analisar as inter-relações existentes entre os elementos. Várias são as funções realizadas pelos componentes constituintes da UPH, mas no mínimo este circuito deve transformar energia mecânica em energia associada ao fluido, com segurança e com meios para estocar e manter o fluido em condições adequadas de uso.

Como a gama de elementos que podem compor a unidade de potência hidráulica é muito grande, decidiu-se pesquisar primeiramente os componentes considerados essenciais em uma UPH. Levando em conta as suas funções, citadas no parágrafo anterior, e algumas

orientações feitas pelo especialista em aplicações siderúrgicas que podem ser aplicadas na hidráulica industrial, a bomba hidrostática, o reservatório, válvulas e filtros foram escolhidos para serem estudados na parte inicial desta pesquisa.

Um exemplo da necessidade de analisar as relações existentes entre os diversos componentes da unidade de potência surgiu quando foi iniciado estudo sobre a aplicação das bombas em sistemas hidráulicos: observou-se que o uso de acumuladores pode modificar fundamentalmente o tipo e a capacidade da bomba que pode ser utilizada em uma unidade de potência. Desta forma, acumuladores foram incluídos entre os elementos estudados na primeira versão do PHIDR.

A respeito da seleção de unidades de potência hidráulica, foram imaginadas duas possibilidades que podem ser aplicadas no desenvolvimento de um sistema especialista voltado ao projeto de UPH:

1. Não existem circuitos de potência prontos, e o SE deve montar a unidade de potência com os componentes selecionados a partir dos requisitos de projeto;
2. Existe um conjunto pré-definido de UPHs do qual o sistema especialista irá escolher um ou mais circuitos que incluam os componentes considerados ideais aos requisitos de projeto inseridos.

Nesta pesquisa, considerou-se mais viável optar pela segunda alternativa, principalmente por dois motivos: a impossibilidade de estudar todos os componentes aplicáveis em unidades de potência hidráulica no tempo disponível para a pesquisa, e a possibilidade de ampliação da base de conhecimento do sistema pela adição de outras UPHs, o que aumentaria as alternativas para escolha de unidades mais adequadas aos requisitos de projeto. Perde-se certamente em soluções inovadoras de circuitos, mas ganha-se em modularidade e permite-se seguir o modelo de desenvolvimento incremental (ver capítulo 2) escolhido para a criação do protótipo.

Ver-se-á a seguir como é a forma de seleção de unidades de potência hidráulica do sistema PHIDR.

4.3.1. Etapas de seleção de UPHs

Baseada na seqüência apresentada na seção 3.3 (SILVA, 1998), as etapas de projeto de unidades de potência hidráulica idealizadas para o desenvolvimento de um sistema especialista voltado a este problema são as seguintes:

1. Escolha dos componentes a serem usados na UPH, de acordo com os primeiros dados inseridos pelo usuário. Na versão atual do protótipo, define-se nesta etapa o tipo de bomba (de deslocamento fixo ou variável com compensação de pressão) e a necessidade ou não de um acumulador no circuito;
2. Seleção, para cada componente escolhido, da subclasse mais adequada (quando for o caso). Outros dados de projeto podem ser necessários nesta etapa. No estágio atual de desenvolvimento do PHIDR, o protótipo pode selecionar o princípio de deslocamento mais recomendado para a bomba;
3. Seleção da(s) unidade(s) de potência hidráulica mais adequada(s), de acordo com os componentes escolhidos e outros requisitos de projeto;
4. Dimensionamento dos componentes da UPH.

O projeto da unidade de potência hidráulica, de acordo com a seqüência de Silva (1998), é realizado após o projetista definir os requisitos do sistema hidráulico; deste modo, ainda de acordo com o capítulo anterior, espera-se que o responsável pelo projeto já possua informações sobre pressão, vazão, nível de contaminação do fluido, entre outros, no momento da seleção e dimensionamento do circuito da UPH. Partindo deste pressuposto, considerou-se no desenvolvimento do protótipo PHIDR que o usuário já conhece ou ao menos tem uma adequada estimativa dos valores para tais dados, não sendo de interesse outros dados de projeto de sistemas hidráulicos, como velocidade e força de atuadores, que definem as variáveis abordadas no protótipo.

As etapas de projeto estão apresentadas individualmente a seguir. Por se tratar de um trabalho inicial de aquisição de conhecimento para projeto de unidades de potência hidráulica, a atual versão do protótipo PHIDR não aborda todos os critérios de escolha possíveis para os componentes da UPH. Pelo modelo de desenvolvimento incremental, é esperado um crescimento da base de conhecimento em versões subseqüentes deste sistema especialista.

4.3.1.1. Escolha dos componentes a serem usados na UPH

Nesta etapa, ao invés de tentar abordar todos os possíveis elementos da UPH na primeira versão do PHIDR, optou-se por analisar a princípio dois componentes da unidade de potência: a bomba hidrostática e o acumulador. Como a diferença mais característica entre as UPHs disponíveis para seleção (as quatro mostradas no capítulo 3) é o tipo de bomba empregada (de deslocamento fixo ou de deslocamento variável com compensação de pressão) e da presença ou ausência de um acumulador no sistema hidráulico, a escolha destes dois

componentes determinam perfeitamente qual unidade de potência é a mais adequada aos requisitos de projeto do sistema hidráulico. Os demais elementos presentes nas UPHs disponíveis no PHIDR realizam as funções mínimas desejáveis a este circuito, como segurança e armazenamento de fluido.

Dentro deste quadro, a escolha do tipo de bomba a ser utilizada na unidade de potência e a necessidade ou não de um acumulador é realizada ao mesmo tempo no protótipo PHIDR. Como mencionado no início da seção 4.3, o uso de acumuladores pode modificar o tipo e a capacidade da bomba adotada em um sistema hidráulico, sendo esta a razão para analisar os dois componentes concomitantemente no projeto de UPHs.

Na atual versão do PHIDR, a primeira etapa para a seleção de unidades de potência requer que o usuário informe os seguintes requisitos de projeto:

- Tipo de *ciclo de trabalho* do sistema hidráulico (contínuo ou intermitente). Se o ciclo for intermitente, ainda é necessário informar o *tempo de parada* existente;
- *Pressões* do sistema: *máxima*, *mínima*, e *média de operação*;
- *Vazão máxima* necessária;
- *Nível de contaminação* do fluido de trabalho.

Com exceção do nível de contaminação do fluido, que é usado durante a seleção da subclasse de bomba (ou seja, do seu princípio de deslocamento), todas estas entradas são utilizadas para escolher o tipo da bomba (de deslocamento fixo ou de deslocamento variável com compensação de pressão) e a necessidade ou não de um acumulador na UPH. Baseados nas pressões e vazões máximas permitidas para bombas hidrostáticas, encontradas em livros e catálogos de fabricantes, as faixas adotadas no PHIDR para pressão e vazão foram, respectivamente, 0 a 700 bar e 0 a 300 lpm. O tempo de parada e o nível de contaminação são tratados como dados qualitativos pelo SE: o primeiro pode ser um tempo longo, médio ou curto, enquanto para o segundo o usuário escolhe entre um baixo (partículas contaminantes de dimensões menores que 10 μm), médio (partículas entre 10 e 25 μm) ou alto (partículas maiores que 25 μm) nível de contaminação do fluido de trabalho.

Para as perguntas sobre ciclo de trabalho e tempo de parada, o usuário pode recorrer a uma breve explicação sobre como são entendidos estes dois requisitos na base de conhecimento do protótipo. O ciclo de trabalho é considerado contínuo quando um ou mais atuadores param somente por um curto período de tempo necessário para trocar a sua direção; desta forma, durante todo o tempo de funcionamento do sistema hidráulico o(s) atuador(es) requerem vazão fornecida pela bomba. No ciclo intermitente, o(s) atuador(es) param por

períodos maiores de tempo para realizar um trabalho ou movimento específico, como em uma prensa hidráulica, onde se deve manter pressão durante um determinado tempo.

Quando o ciclo é intermitente, considera-se o tempo de parada como o período em que um ou mais atuadores do sistema hidráulico permanecem parados após alcançarem um ponto específico; por exemplo, um cilindro que se desloca até atingir a carga de trabalho em uma prensa hidráulica. Como a definição do tempo de parada depende da aplicação do sistema hidráulico, não foram estabelecidos valores absolutos para determinar se um tempo de parada é curto, médio ou longo; desta forma, esta consideração fica dependente do usuário do protótipo PHIDR.

Ainda sobre requisitos de projeto para a escolha de tipos de bombas, no estudo da literatura especializada sobre o assunto foi observado que outros fatores ou são de abordagem complexa, como custos envolvidos (de aquisição, de manutenção, de operação etc.) ou são secundários na escolha de um determinado tipo de bomba, tais quais os tipos de conexão e de acoplamentos disponíveis no mercado, e as características de peso em aplicações industriais. Apesar dos custos não serem considerados como um dado de entrada para o sistema PHIDR, eles são tratados de maneira indireta na atual sistematização de projeto, como na escolha de uma bomba de deslocamento variável com compensação de pressão em sistemas com grandes variações de pressão e grandes vazões, para diminuir os custos de operação do sistema hidráulico.

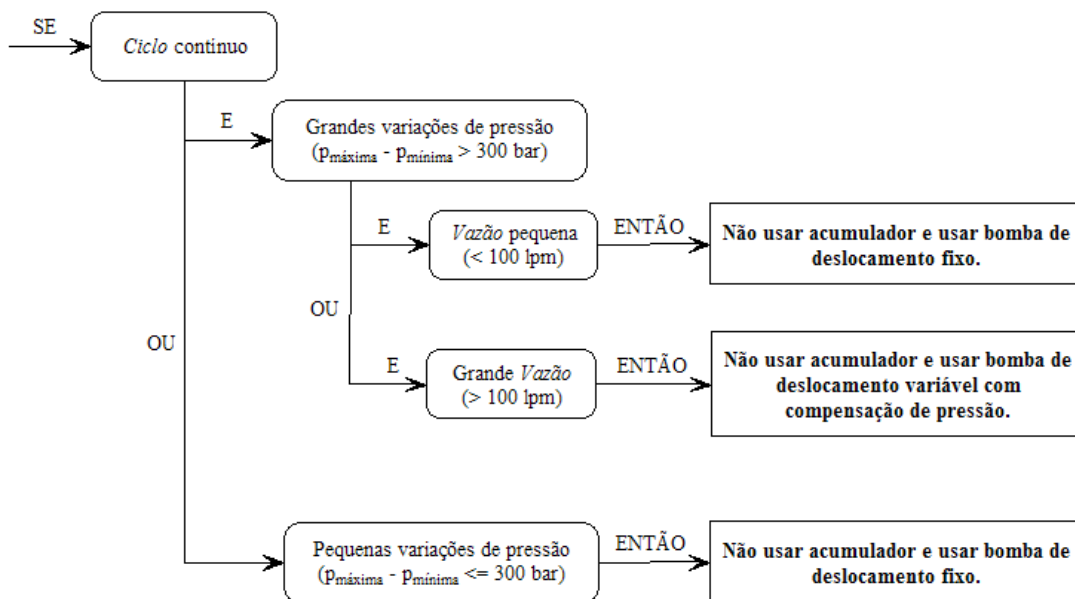


Figura 4.5: Fluxograma de decisão para ciclos contínuos, com valores-padrão para grandes variações de pressão e grandes vazões

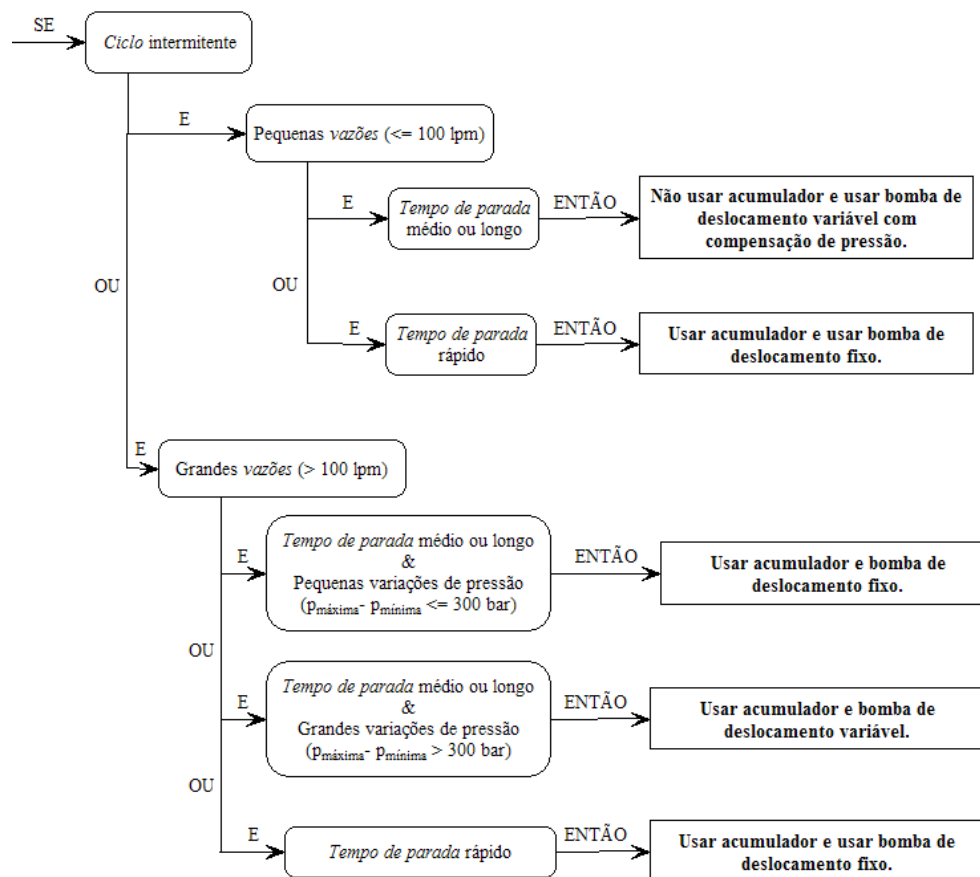


Figura 4.6: Fluxograma de decisão para ciclo intermitente, com valores-padrão para grandes variações de pressão e grandes vazões

Para criar as estruturas de decisão apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6, foram usados os seguintes critérios de seleção, baseados na literatura especializada:

- Em ciclos de operação contínuo, geralmente são usadas bombas de deslocamento fixo; em ciclos intermitentes, bombas de deslocamento variável. Porém, se em ciclos intermitentes o tempo de parada for rápido, bombas com sistemas de compensação de pressão não são recomendadas, por tenderem a falhar prematuramente (TRINKEL, 1996);
- Acumuladores podem ser usados para reduzir a capacidade necessária de vários componentes do sistema hidráulico (incluindo a bomba hidrostática), em sistemas com ciclos de trabalho intermitentes;
- A potência de acionamento das bombas é calculada pelo produto da vazão e da pressão de regime do sistema hidráulico. Como bombas de deslocamento variável com compensação de pressão permitem a variação da vazão de acordo com a

pressão de regime do sistema, pode-se usar este tipo de bomba em sistemas com grandes variações de pressão e grandes vazões para reduzir os custos de operação;

- Se a variação entre pressões máxima e mínima é pequena, e supondo que a variação da vazão de regime não seja elevada, o uso de um tipo de bomba mais cara (de deslocamento variável com compensação de pressão) pode não ser compensador, se forem comparados os custos de aquisição com a redução de custos de operação do sistema hidráulico.

Para finalizar esta etapa de projeto, são geradas explicações sobre os motivos de escolha dos componentes a serem usados na unidade de potência, para serem apresentadas pelo sistema PHIDR ao final do projeto da UPH.

4.3.1.2. Escolha das subclasses dos componentes empregados na UPH

Definidos os componentes e seus tipos que serão empregados na unidade de potência hidráulica, a segunda fase da seqüência de projeto adotada prevê a seleção das subclasses de cada componente escolhido. O capítulo 3 apresentou resumidamente as principais subclasses dos elementos principais de uma UPH (bomba, acumulador, válvulas, reservatórios e filtros de fluido).

Na atual versão do protótipo PHIDR, é tratada apenas a escolha do princípio de deslocamento mais adequado ao tipo de bomba hidrostática selecionada. Para tanto, foi adaptada no PHIDR a base de conhecimento da primeira versão do protótipo de sistema especialista desenvolvido por Zimmermann (2003), em cuja pesquisa o engenheiro de conhecimento contribuiu no início da estruturação de conhecimento sobre bombas hidrostáticas. Tal qual o protótipo deste trabalho, o SE criado por Zimmermann pretende ser o início de um estudo mais aprofundado sobre o domínio de problema abordado; por isso, a versão atual do seu protótipo não procura explorar todas as possíveis variáveis envolvidas na escolha de um determinado tipo e subclasse de bomba hidrostática.

A seleção do princípio de deslocamento inicia-se com a determinação de todos os princípios possíveis de serem adotados na unidade de potência hidráulica, de acordo com o tipo de bomba selecionada e com os requisitos de projeto informados na primeira etapa de projeto. Os dois dados usados nesta escolha são a vazão máxima necessária ao sistema hidráulico e a pressão média de operação; se estes requisitos estiverem dentro das faixas permitidas para uma determinada subclasse de bomba, então ele pode ser adotado na UPH.

Aqui, deve-se considerar um comentário feito por um dos especialistas¹⁶ que avaliaram o SE (ver página 115 do apêndice): o uso da pressão média de operação para a escolha da bomba hidrostática pode resultar em um sub-dimensionamento deste componente no sistema hidráulico. Novas interações com especialistas, para futuras implementações do PHIDR, deverão observar atentamente este ponto.

As faixas de valores possíveis de pressão e vazão para cada princípio de deslocamento, de acordo com as informações colhidas por Zimmermann em livros e catálogos de componentes hidráulicos, estão apresentadas na Tabela 4.3.

Selecionados os princípios de deslocamento que podem ser adotados, em seguida escolhe-se aquele mais adequado para o sistema hidráulico. Como em alguns casos existe mais de um princípio possível de ser usado (em certos pares vazão x pressão, é possível utilizar todas as subclasses listadas), outros requisitos de projeto são necessários. Zimmermann definiu três informações adicionais, que são solicitadas ao usuário nas situações onde mais de uma subclasse pode ser adotado: o nível de ruído ou de pulsação da bomba, o seu tamanho físico e o seu rendimento volumétrico. Todos estes dados são tratados qualitativamente pelo protótipo PHIDR.

Tabela 4.3: Faixas de valores para bombas em Hidráulica Industrial

Princípio de deslocamento	Pressão mínima [bar]	Pressão máxima [bar]	Vazão mínima [lpm]	Vazão máxima [lpm]
Deslocamento fixo				
Parafusos	10	200	5	300
Engrenagens	10	210	5	150
Palhetas	10	210	10	260
Pistões axiais	40	450	20	160
Pistões radiais	50	700	1	35
Deslocamento variável				
Palhetas	10	210	10	260
Pistões axiais	20	280	35	210
Pistões radiais	50	700	1	35

O nível de contaminação do fluido de trabalho é considerado na sugestão da porosidade do filtro a ser utilizado na unidade de potência hidráulica, não entrando como um

¹⁶ Irlan von Linsingen, Dr. Edu., é professor da UFSC e faz parte do Laboratório de Sistemas Hidráulicos (LASHIP) do Departamento de Engenharia Mecânica

fator determinante na escolha de um determinado princípio de deslocamento para a bomba hidrostática. De uma maneira geral, atendidos os requisitos de vazão e pressão necessárias, as regras de escolha de um princípio de deslocamento de bombas seguem os seguintes critérios:

- Bombas de parafusos só serão escolhidas se somente bombas de engrenagens ou de parafusos possam ser adotadas (caso 1 da tabela 4.4); neste caso, a de parafusos é selecionada se for preciso um baixo nível de pulsação ou de ruído para a bomba.
- Entre bombas de engrenagens e de palhetas ou de pistões, as primeiras são escolhidas se não for necessário um baixo nível de ruído ou de pulsação;
- Entre bombas de engrenagens ou de palhetas e bombas de pistões, estas últimas são selecionadas se for exigido um elevado rendimento volumétrico para a bomba;
- Entre bombas de pistões axiais e de pistões radiais, escolhe-se a primeira se o tamanho físico (o volume construtivo) da bomba não for importante para a unidade de potência hidráulica.

Obedecendo estes critérios, as situações onde pode ser adotada uma ou mais subclasses de bomba são solucionadas de acordo com a Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resolução de conflitos entre subclasses de bombas hidrostáticas

Conflito existente	Solução
1. Parafusos x Engrenagens	Dado solicitado: nível de pulsação ou de ruído. Seleção conforme critério apresentado.
2. Parafusos x Palhetas de deslocamento fixo	Escolhe-se bombas de palhetas, pois também possuem características de baixo nível de pulsação e de ruído
3. Engrenagens x Pistões Radiais de deslocamento fixo	Dado solicitado: rendimento volumétrico. Se o rendimento precisa ser alto, escolhe-se a bomba de pistões radiais; caso contrário, escolhe-se a de engrenagens.
4. Palhetas x Pistões Axiais ou Radiais, deslocamento fixo ou variável	Dado solicitado: rendimento volumétrico. Se o rendimento precisa ser alto, escolhe-se a bomba de pistões; caso contrário, escolhe-se a de palhetas.
5. Pistões Axiais x Pistões Radiais, deslocamento fixo ou variável	Dado solicitado: se o tamanho físico da bomba é importante. Seleção conforme critério apresentado.
6. Parafusos x Engrenagens x (Palhetas ou Pistões), de deslocamento fixo	Dado solicitado: nível de ruído ou de pulsação. Se o nível de ruído precisa ser baixo, então a bomba de pistões ou de palhetas é selecionada. Caso contrário, escolhe-se de engrenagens.

Tabela 4.4, Cont.

Conflito existente	Solução
7. Parafusos x Palhetas x Pistões Axiais, de deslocamento fixo	Dado solicitado: rendimento volumétrico. Se o rendimento precisa ser alto, a bomba de pistões axiais é selecionada; caso contrário, escolhe-se a de palhetas.
8. Engrenagens x Palhetas x (Pistões Axiais ou Radiais), de deslocamento fixo	Dado solicitado: rendimento volumétrico. Se o rendimento precisa ser alto, escolhe-se bombas de pistões; caso contrário, seleciona-se a de engrenagens, consideradas mais baratas que as de palhetas.
9. Todas as subclasses de deslocamento fixo, exceto de parafusos	Primeiramente, é solicitado o rendimento volumétrico necessário à bomba. Se o rendimento precisa ser alto, bombas de pistões são recomendadas; então, é solicitado se o tamanho da bomba é importante para a UPH, escolhendo-se assim entre de pistões radiais ou de axiais. Caso o rendimento não precise ser alto, então bombas de engrenagens são selecionadas, por serem consideradas mais baratas que bombas de palhetas.
10. Todas as subclasses de deslocamento fixo, exceto de pistões radiais ou de pistões axiais	Dado solicitado: rendimento volumétrico. Se o rendimento precisa ser alto, bombas de pistões são recomendadas. Neste caso, somente é possível selecionar uma das subclasses de pistões (radiais ou axiais). Caso o rendimento não precise ser alto, seleciona-se bombas de engrenagens, por serem consideradas mais baratas do que bombas de palhetas.
11. Todas as subclasses de deslocamento fixo	Segue as regras de escolha do nono conflito.

Seguindo estas regras, o sistema especialista seleciona por fim o princípio de deslocamento mais adequado aos requisitos de projeto informados pelo usuário, e gera explicações com os motivos da seleção que são apresentados nos resultados finais do protótipo. Para os demais componentes a serem usados na unidade de potência hidráulica, em futuras versões do PHIDR sugere-se implementar estruturas de decisão parecidas com a usada para as subclasses de bombas.

4.3.1.3. Seleção da unidade de potência hidráulica mais adequada

A terceira fase de seleção de unidades de potência hidráulica realiza efetivamente a escolha, no conjunto de UPHs disponíveis, da unidade mais adequada aos requisitos de projeto do sistema hidráulico. Na versão atual do protótipo PHIDR a escolha de uma UPH das quatro disponíveis depende basicamente do tipo de bomba adotada e da presença e ausência

de acumulador, conforme discutido na subseção 4.3.1.1. Os diagramas destas quatro unidades de potência hidráulica podem ser vistas nas figuras 4.7 e 4.8.

Com a inserção de outros circuitos de potência na base de conhecimento, será necessário o uso de outras informações de projeto (como custos, necessidade ou não de reserva na unidade, facilidade de manutenção, fluido hidráulico utilizado etc.) para a seleção de uma determinada UPH. Maiores possibilidades de escolha também permitirão, em futuras versões do PHIDR, selecionar mais de uma unidade de potência, criando de acordo com os requisitos de projeto informados uma lista ordenada dos circuitos de potência que podem ser adotados.

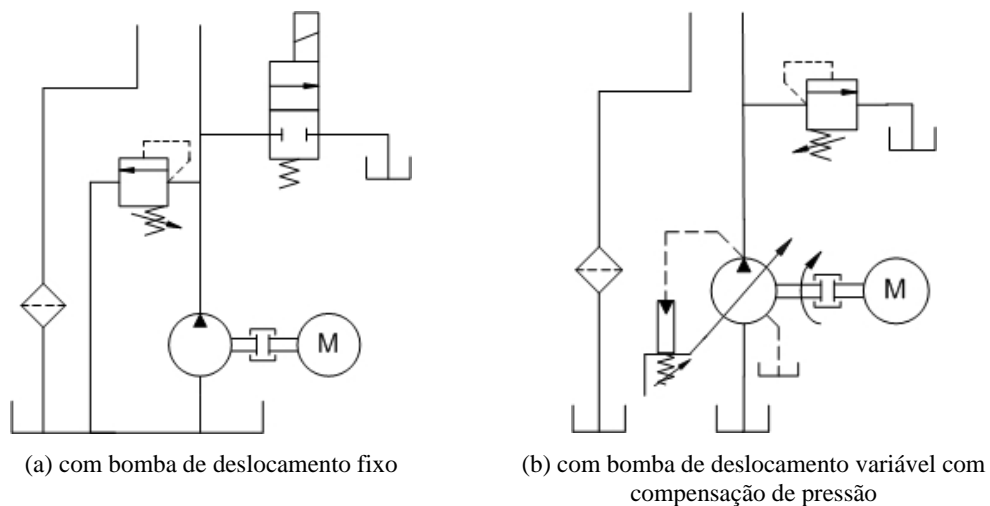


Figura 4.7: Unidades de potência hidráulica sem acumulador

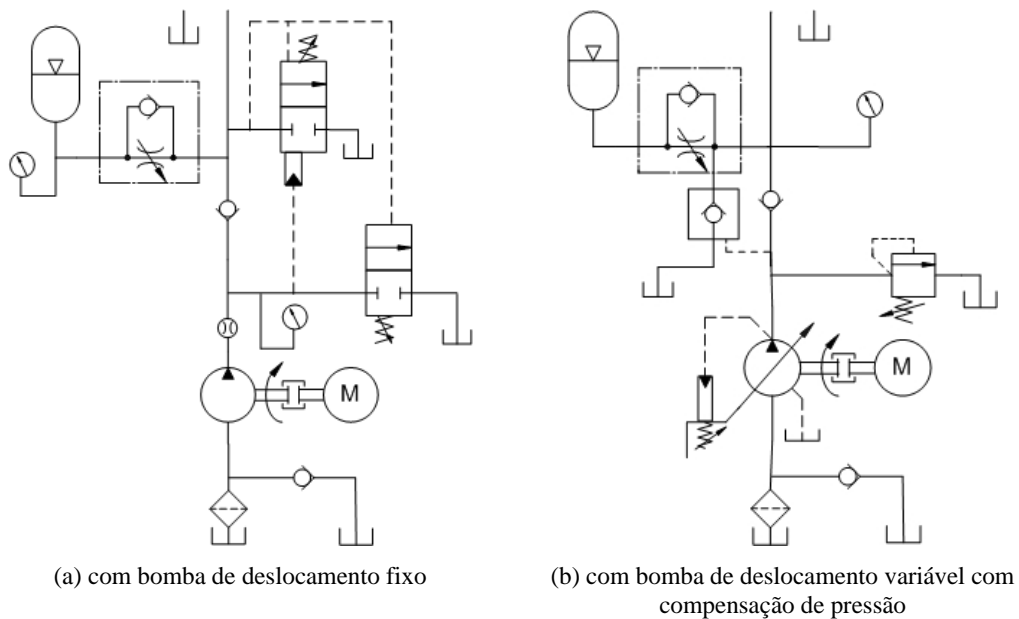


Figura 4.8: Unidades de potência hidráulica com acumulador

Também é gerada nesta fase de projeto explicações com os motivos de escolha da unidade de potência hidráulica, para ser apresentada, juntamente às explicações sobre a seleção dos tipos e subclasses dos componentes, aos usuários do PHIDR. Como na atual versão do protótipo a escolha da unidade de potência não necessita de nenhuma informação extra além das exigidas pela primeira etapa de seleção, os motivos são baseados somente nos dados de tipo de ciclo, de pressão e de vazão inseridos pelo usuário. As explicações fornecidas pelo protótipo PHIDR estão mostradas no Apêndice A. Algumas características gerais das unidades presentes na base de conhecimento são apresentadas a seguir.

A UPH ilustrada na figura 4.7a é o circuito mais simples, portanto mais barato, dentre os quatro disponíveis; é composto por uma bomba de deslocamento fixo sem compensação de pressão, duas válvulas - uma direcional e uma de controle de pressão – e um filtro de retorno. Esta unidade é recomendada para sistemas hidráulicos com ciclos contínuos de trabalho, que demanda vazão de fluido durante a maior parte da sua operação. Nas rápidas paradas do sistema, a válvula direcional da UPH pode servir para descarregar em baixa pressão a vazão fornecida pela bomba, diminuindo assim os custos de operação do sistema hidráulico. A válvula de controle de pressão não é usada para descarregar óleo ao tanque; sua função é promover segurança ao sistema em aumentos excessivos de pressão. Se esta unidade for utilizada adequadamente, a energia perdida por geração de calor é mínima.

Em uma situação de operação em ciclo contínuo com altas vazões e grandes diferenças de pressões de regime, bombas de deslocamento fixo sem compensação de pressão acabam consumindo mais energia do que as de deslocamento variável com compensação de pressão, cuja vazão bombeada decresce com o aumento da pressão do sistema. Por isso, mesmo adotando uma bomba mais cara, a unidade de potência hidráulica mostrada na figura 4.7b é recomendada para sistemas hidráulicos que operam nestas condições. Como o controle de vazão é feito pela bomba, uma válvula de descarga não é necessária; a válvula de controle de pressão permanece fechada durante a operação, servindo como válvula de segurança para a UPH. Este circuito de potência também é usado em sistemas hidráulicos onde é necessário manter pressão por um determinado período de tempo ou deseja-se controlar a velocidade do atuador presente no sistema.

A terceira unidade de potência disponível (Figura 4.8a) se diferencia das duas anteriores principalmente pela presença de um acumulador no circuito. Entre os usos deste componente, descritos na subseção 3.4.3, estão o de suplementar a vazão da bomba e o de manter pressão no atuador enquanto o sistema hidráulico está parado; por isso, esta UPH é recomendada para sistemas com ciclos de trabalho intermitentes. Sem a presença de controles de vazão, o óleo armazenado em altas pressões no acumulador poderia ser descarregado quase

que instantaneamente no sistema hidráulico. Como em várias aplicações isso não é desejado, sistemas com acumuladores geralmente possuem válvulas de controle de vazão (TRINKEL, 1996).

As válvulas direcionais presentes nesta unidade de potência servem para descarregar em baixa pressão a bomba de deslocamento fixo, quando a pressão do sistema alcança a de ajuste da válvula, e o acumulador, nas paradas da bomba. Desta forma, diminui-se a energia perdida quando não é necessária vazão da bomba, e melhora-se a segurança de operação da UPH pela descarga do acumulador.

Por fim, a última unidade presente na base de conhecimento do protótipo PHIDR é a ilustrada na figura 4.8b. A diferença mais importante entre esta e a UPH anterior é a bomba adotada, de deslocamento variável com compensação de pressão. São também recomendadas para sistemas hidráulicos com ciclos de trabalho intermitentes, mas com variações de pressão mais elevadas e vazões mais altas. Desta forma, os maiores custos de aquisição desta unidade, se comparado à anterior, podem ser compensados pela redução dos seus custos de operação.

Como nesta UPH o controle de vazão é feito pela bomba, não é mais necessário o uso de uma válvula direcional para descarregá-la; por sua vez, o acumulador é descarregado por uma válvula de retenção pilotada. Para garantir a segurança do sistema hidráulico, adota-se nesta unidade de potência uma válvula limitadora de pressão, perto da saída da bomba hidrostática.

4.3.1.4. Dimensionamento dos componentes da UPH

O projeto da unidade de potência de um sistema hidráulico é finalizado, de acordo com a seqüência adotada, com o dimensionamento dos componentes da UPH selecionada. Equações de dimensionamento obtidas de fontes como livros, fabricantes e fornecedores de componentes hidráulicos, bem como práticas usadas por projetistas da área - por exemplo, a regra prática para o tamanho do reservatório, apresentada na subseção 3.4.2 - são usadas nesta etapa de projeto. A atual versão do protótipo PHIDR, entretanto, não realiza o dimensionamento dos componentes selecionados de uma unidade de potência: optou-se por postergar a implementação de um módulo de dimensionamento para futuras versões do protótipo.

Para ilustrar como as inter-relações entre componentes podem influenciar no dimensionamento da UPH, analisemos a adoção de acumuladores em um circuito hidráulico. O uso destes elementos pode reduzir a capacidade necessária das bombas a serem aplicadas na unidade de potência; como a vazão máxima que deve ser fornecida pela bomba é um dado

importante para o dimensionamento de vários componentes da UPH, então o tamanho dos acumuladores, quando usados, irá influenciar o cálculo das capacidades ou dimensões de vários elementos do circuito.

4.4. Comentários sobre aquisição de conhecimento para o PHIDR

De acordo com as idéias discutidas no segundo capítulo, um sistema especialista é desenvolvido para a solução de problemas específicos a partir de conhecimento adquirido sobre o domínio considerado, que pode estar presente em material escrito (livros, catálogos, artigos etc.). Entretanto, como foi mostrado no capítulo 3, na área de projetos em hidráulica industrial os especialistas deste domínio são a fonte principal de conhecimento que deve ser consultada.

A dificuldade encontrada na aquisição de conhecimento nesta pesquisa deve-se em grande parte às características do profissional que lida com projetos de sistemas hidráulicos: a maior parte dos especialistas desta área está concentrada em indústrias e empresas fornecedoras de componentes hidráulicos, o que dificulta ou impossibilita interações para trabalhos como o aqui apresentado, por falta de disponibilidade do especialista para entrevistas, de interesse da empresa, entre outros pontos.

Outras características que podem dificultar a aquisição de conhecimento em projetos de sistemas hidráulicos foram apontadas por Silva (1998): os especialistas em hidráulica são profissionais cujo conhecimento provém de anos de trabalhos práticos na indústria, ao invés de pesquisa acadêmica, que têm se familiarizado gradualmente com tecnologias computacionais para o auxílio em projetos e que têm pouco ou nenhum conhecimento de aplicações de Inteligência Artificial. Isto pode ser causa de dúvidas e ceticismo quando ao valor do uso da IA para o auxílio de projetos em hidráulica. Desta forma, o engenheiro de conhecimento deve procurar explicar e exemplificar a técnica de SEs, tanto quanto for possível, para um melhor entendimento dos especialistas da área.

As tentativas realizadas para a aquisição de conhecimento mostradas na seção 4.2.2 (lista de questões para ser enviada a fóruns de discussão de hidráulica e criação de um protótipo para apresentação a especialistas) acabaram sendo menos eficazes do que o esperado. Uma forma possível para a procura de novos especialistas é divulgar as idéias deste trabalho em congressos e publicações da área. A apresentação da proposta deste trabalho, bem como o protótipo em si, diretamente a empresas envolvidas com projetos de sistemas hidráulicos também deve ser considerada na continuação do desenvolvimento do sistema PHIDR.

As conseqüências mais marcantes da pequena eficácia das alternativas usadas para a aquisição de conhecimento nesta pesquisa foram limitações na seleção e no dimensionamento de componentes da unidade de potência hidráulica implementadas no protótipo PHIDR, fato ilustrado em algumas das respostas do questionário de avaliação enviadas por um dos especialistas (von Linsingen), conforme será discutido no próximo capítulo. Apenas alguns elementos da UPH foram examinados na sua seleção, sendo também analisados poucos requisitos de projeto dentre os possíveis de serem considerados.

Apesar de se entender que em um protótipo de sistema especialista não é esperada a solução de todos os subproblemas existentes em um domínio de problema, a proposta no início da pesquisa era adquirir conhecimento sobre a seleção e dimensionamento de outros componentes da unidade de potência, o que não foi realizado. Desta forma, para permitir uma fácil e rápida expansão da base de conhecimento do protótipo procurou-se adotar algumas características de codificação durante a implementação do sistema. Por exemplo, ao criar classes para as unidades de potência hidráulica e para os seus componentes (subseção 4.2.1), novas UPHs e outros elementos da unidade podem ser adicionados facilmente à base de conhecimento; as etapas de decisão, divididas de acordo com a subseção 4.3.1, foram também implementadas para tornar mais modular a base de conhecimento, facilitando assim futuras modificações do sistema. Os próximos capítulos apresentarão algumas propostas para novas versões do PHIDR.

5. Validação do Protótipo PHIDR

Como visto no segundo capítulo, a validação de um sistema especialista corresponde à avaliação da base de conhecimento do sistema, para determinar se esta representa de maneira satisfatória o domínio de problema considerado e alcança resultados adequados para a solução dos problemas abordados. Além dos parâmetros já abordados no capítulo 2 (robustez, expansibilidade e modularidade), Gonzalez e Dankel (1993) citam outros dois critérios que devem ser considerados na validação de um sistema especialista: se as respostas são *precisas*, isto é, se os especialistas consideram aceitáveis os resultados do SE; e a *adequação* do sistema, ou seja, quanto do domínio de problema é mapeado pelo SE. Tais parâmetros serão ilustrados oportunamente durante esta seção.

Nesta pesquisa, foi utilizado um questionário de avaliação (apêndice C) para analisar a estrutura do protótipo PHIDR, que engloba a clareza e a relevância das perguntas realizadas, e as respostas alcançadas pelo protótipo, em termos de completude, adequação e relevância dos resultados gerados. A análise da adequação do PHIDR foi estendida também para a estrutura do sistema, como será mostrada nas próximas subseções.

A validação do protótipo foi realizada por dois especialistas, que enviaram análises do sistema através do questionário de avaliação. As respostas enviadas podem ser vistas por completo no apêndice D. A seguir estão discutidos separadamente alguns dos comentários feitos pelos especialistas a respeito da estrutura (seção 5.1) e dos resultados (seção 5.2) do PHIDR. Para um melhor entendimento, as respostas enviadas estarão destacadas em itálico. Os especialistas serão referenciados daqui por diante por primeiro (von Linsingen) e segundo (Furst) especialista. O critério destas nomeações é simplesmente a ordem de apresentação dos questionários no apêndice D.

5.1. Análise da Estrutura do Protótipo

A primeira parte da validação do protótipo PHIDR procurou avaliar a estrutura do sistema criado. Para tanto, foram levadas em consideração análises:

- Das perguntas presentes, no que diz respeito à relevância, às definições, às faixas de valores adotadas, entre outros pontos;
- Do arquivo de resultados gerado pelo protótipo, em relação às informações presentes (relevância, clareza, possível ausência de dados etc.);

- De parâmetros como robustez, expansibilidade e modularidade do sistema.

Para a validação das questões presentes no PHIDR, foi escrita uma questão (o primeiro item da pergunta 1) a ser respondida pelos especialistas. O primeiro especialista, contudo, não respondeu diretamente esta pergunta: as suas observações sobre as entradas do protótipo foram feitas em outros itens do questionário. Por sua vez, o outro especialista iniciou seus comentários sobre as perguntas do protótipo alertando sobre um dos termos usados no PHIDR,

diferença de pressões é um termo usado para indicar o Δp de uma válvula, bloco etc. O termo mais adequado seria a variação de pressão do sistema,

que foi corrigido posteriormente no protótipo.

As questões referentes aos requisitos de projeto da unidade de potência hidráulica - como pressões máxima, média e mínima de operação - não receberam nenhuma crítica dos especialistas, nem foram apontados erros de execução no protótipo durante a entrada dos dados. Conforme será discutido em 5.2, ocorreu somente uma certa dificuldade de interpretação do significado de um dos critérios de seleção, *pressão média*, por parte do segundo especialista.

Diferentemente das questões dos requisitos de projeto, os dois especialistas não concordaram com os valores-padrão estabelecidos para grande vazão e grande variação de pressão, que podem ser modificados nas primeiras perguntas do protótipo PHIDR. Ambos concordaram que o valor-padrão para o patamar de grande vazão (30 lpm, antes da validação) deve ser aumentado para pelo menos 100 lpm, conforme comentário do primeiro especialista:

Por que 30 lpm é considerada uma grande vazão? Não seria acima de 50 lpm, ou mesmo 100 lpm?

A versão final do protótipo foi modificada para atender a este ponto.

Em relação ao patamar de grande variação de pressão, o valor adotado também foi considerado inadequado (muito elevado) para o projeto de unidades de potência hidráulica. Neste caso, porém, não foi determinado um novo valor para ser adotado no protótipo. Conforme citado pelo segundo especialista,

as faixas de valores mencionados para a variação da pressão e da vazão estão baseadas em alguma aplicação,

que é, no sistema PHIDR, a hidráulica industrial. Nos questionários enviados, somente foi citado um valor (50 bar) para grandes variações de pressão na indústria metalúrgica, que

corresponde à hidráulica para siderurgia. Há ainda a questão, levantada posteriormente pelo primeiro especialista, a respeito de um critério mais claro para definir uma grande variação de pressão em um sistema hidráulico industrial: algumas das possibilidades são a variação relacionada a choques hidráulicos que o sistema possa estar submetido, a perdas de cargas em regime permanente, e a limites de pressão suportados pelo circuito hidráulico. Todos estes pontos deverão ser discutidos com especialistas na continuação do desenvolvimento do PHIDR. Não se descarta a possibilidade deste patamar ser semelhante ao apontado para a indústria metalúrgica.

A avaliação das perguntas do protótipo também mostrou que pode ser necessária uma nova classificação para as faixas de vazão e de variação de pressão usadas nas fases de projeto da unidade de potência hidráulica implementadas no PHIDR. Alguns comentários feitos pelo segundo especialista, como

“O sistema considera uma unidade a mais do que 30 l/min uma alta vazão” e “Teste 4 e 5 – por apenas 1 l/min eu mudo de bomba variável para bomba fixa”,

sugerem que usar uma simples divisão como “pequena e grande vazão” pode não ser suficiente na seleção de uma UPH. Em análise posterior à validação pelo questionário, o primeiro especialista também sugeriu a delimitação mais precisa (por exemplo, com intervalos de segundos) dos tempos de parada, de acordo com aplicações industriais mais usuais de sistemas hidráulicos, a fim de evitar erros de interpretação dos usuários do PHIDR. Etapas futuras de aquisição de conhecimento, para novas versões do protótipo, deverão levar em consideração estes dois pontos.

Para encerrar a validação das questões do sistema PHIDR, são pertinentes os comentários do primeiro especialista na quarta pergunta do questionário:

Não se poderia diversificar mais os critérios de escolha, além dos critérios de intensidade de uso, pressão, vazão e nível de contaminação (por exemplo: nível de ruído, ambiente onde o sistema deverá ser instalado e utilizado, temperatura ambiente, se se trata de equipamento móvel ou estacionário...)?

Tal observação mostra que a adequação dos requisitos de projeto de unidades de potência hidráulica, correspondentes às perguntas do SE, é apenas parcial.

A esse respeito, convém recordar que o PHIDR é um protótipo que serve para reforçar a aplicabilidade da técnica de sistemas especialistas em domínios de problema da Hidráulica; portanto, foi previsto que não seria possível abordar todos os possíveis requisitos de projeto na atual versão deste SE, conforme comentado no capítulo anterior. Em termos de

expansibilidade, o código computacional pode ser facilmente modificado para incluir outros critérios de seleção, tais quais os citados pelo primeiro especialista, o que aumentará a adequação dos requisitos de projeto de unidades de potência hidráulica em futuras versões do PHIDR.

Encerrando a avaliação da estrutura do protótipo, os dois especialistas tiveram opiniões contrárias sobre a apresentação do arquivo de resultados: enquanto o segundo achou que *“a apresentação do programa é adequada e bem apresentada”*, o primeiro especialista julgou o arquivo incompleto, no que diz respeito às informações disponíveis, além de não ter considerado adequada a sua estruturação:

Poderia ser mais amigável. Digamos que ele é enxuto e claro, mas poderia possuir um visual mais agradável também em termos estético-funcionais.

As sugestões feitas pelo segundo especialista para modificar as informações presentes no arquivo de resultados foram analisadas; como consequência, foram acrescentados alguns dados à base de conhecimento do protótipo: nos objetos das unidades de potência, foram incluídas novas descrições para as UPHs na variável “Informacoes-gerais” (ver tabela 4.1), usada durante a criação do arquivo de saída; e na etapa de gravação do arquivo de respostas, outras informações a respeito das limitações do protótipo PHIDR. Infelizmente, não foram feitas sugestões sobre possíveis alterações na apresentação visual deste arquivo.

5.2. Análise das Respostas do Protótipo

A análise das respostas do protótipo é, em outras palavras, a validação dos resultados alcançados pelo PHIDR para o projeto de unidades de potência hidráulica. A respeito deles, o primeiro especialista, através das questões 1.b e 2 do questionário de avaliação, afirma que o protótipo é limitado quanto ao número de UPHs presentes para seleção, o que implica em uma restrição nas possibilidades de escolha que o usuário do SE pode fazer. Em termos de adequação, isso significa que apenas uma parte do domínio de problema foi mapeado pelo protótipo.

Efetivamente, a atual versão do PHIDR possui apenas quatro unidades implementadas na base de conhecimento, o que restringe a seleção a apenas uma unidade para qualquer combinação de requisitos de projeto (os comentários do primeiro especialista na questão 2 abordam este ponto), e não abrange todas as possíveis UPHs encontradas em sistemas hidráulicos; porém, isso já era previsto nesta pesquisa. A expansão do sistema abrangerá a naturalmente a implementação de outros circuitos na base de conhecimento do PHIDR.

Dentro deste contexto, consideram-se mais importantes para esta parte da validação as sugestões feitas para modificação e ampliação do sistema especialista do que a adequação completa do domínio de problema na atual versão do protótipo. Como exemplos de sugestões, podem ser citados: inclusão de outros requisitos de projeto, já citada anteriormente, e de unidades de potência com bombas em paralelo; criação de um módulo de cálculo de custos da UPH; e desenvolvimento de um banco de dados de fornecedores de componentes hidráulicos. Outras propostas imaginadas para novas versões do PHIDR estão apresentadas no próximo capítulo.

Quanto à aceitação dos resultados alcançados pelo protótipo, enquanto o segundo especialista considerou que em geral “*as escolhas são satisfatórias, relevantes e os critérios para escolha são adequados*”, o primeiro especialista apontou algumas limitações nas respostas do sistema, conforme pode ser lido no apêndice D. Uma das críticas apresentada nas avaliações, feita pelo primeiro especialista na questão 1.b e já citada no capítulo 4,

[...] Esta pressão, 150 bar, é a pressão média de trabalho escolhida e não a máxima de trabalho (escolhi 210 bar), o que pode levar a um sub-dimensionamento do sistema,

deve ser analisada com muita atenção em novas interações com especialistas na continuação do desenvolvimento do PHIDR. Este especialista também considerou que os resultados alcançados pelo protótipo não são completos. Por falta de uma questão no questionário diretamente voltada a sugestões para o que poderia ser incluído nos resultados do protótipo, nenhum dos dois especialistas indicou possíveis modificações nas respostas do sistema especialista.

Para avaliar as respostas do PHIDR, o segundo especialista fez uma seqüência de testes abrangendo várias possibilidades de combinação de requisitos de projeto. De acordo com o questionário, ele separou os testes em dois blocos: um que chamou de “testes de consistência com dados extremos”, tabela 5.1, e outro cujos critérios de seleção são mais próximos à realidade, de acordo com o seu conhecimento prático (tabela 5.2). As suas críticas sobre os testes que geraram dúvidas estão mostradas após cada tabela; quando necessário, após tais observações são feitos comentários e justificativas do engenheiro de conhecimento a respeito dos erros apontados.

A partir das críticas, uma primeira constatação foi que o segundo especialista teve uma interpretação diferente da imaginada nas primeiras questões do protótipo, sobre os patamares de grande vazão e grande variação de pressão usados na seleção da bomba hidrostática, resultado de uma falha na elaboração dos textos explicativos destas entradas do PHIDR. Além das primeiras questões, o termo “pressão média”, aplicado em um dos requisitos de projeto

abordados pelo protótipo, mostrou-se também inadequado, por também ter sido mal compreendido pelo especialista (ver comentários do Teste 2). A fim de corrigir tais problemas, as explicações das primeiras questões foram reescritas, e o termo “pressão média” foi trocado por “pressão média de operação”. O protótipo foi modificado para receber as alterações necessárias.

Tabela 5.1: Testes de consistência com dados extremos

Teste	1	2	3	4	5
Grande variação de pressão [bar]	> 300	> 300	> 300	> 300	> 300
Grande vazão [lpm]	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30
Tipo de ciclo	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Tempo de parada	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Pressão média [bar]	450	250	700	700	700
Pressão máxima [bar]	700	700	700	700	700
Pressão mínima [bar]	100	100	500	500	500
Vazão máxima [lpm]	20	20	20	31	30
Nível de Contaminação	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)
Bomba	Radial variável	Radial variável	Radial variável	Radial fixa	Radial variável

Comentários do segundo especialista, e justificativas e observações do engenheiro de conhecimento:

Teste 1: eu não conheço bomba radial variável. Existe? A vazão fornecida é menor que a estipulada na segunda pergunta (> 30 l/min).

Existem informações na literatura sobre bombas de pistões radiais de deslocamento variável; porém, o engenheiro de conhecimento não conseguiu averiguar se tais bombas são usadas comumente em projetos de sistemas hidráulicos. Quanto à vazão, não há problema da vazão máxima necessária ser menor do que o patamar de grande vazão indicado nas primeiras questões do protótipo.

Teste 2: pressão média é menor do que a variação de pressão. É possível?

Teste 3: o sistema aceitou uma variação de pressão (p_{max} e p_{min}) menor que a estipulado no início.

Tanto a pressão média de operação quanto a variação de pressão podem ser menores que o patamar de grande variação de pressão. Novamente, esta dúvida foi resultado da inadequada apresentação das primeiras questões do PHIDR. No teste 2 ainda existiu uma dificuldade de interpretação da terminologia usada para o requisito de projeto “pressão média”, que também não se mostrou adequada.

Testes 4 e 5: por apenas 1 l/min eu mudo de bomba variável para bomba fixa.

Esta questão foi abordada na subseção 5.1. A adoção de uma nova classificação para o patamar de grande vazão deve ser considerada em futuras versões do sistema PHIDR.

Tabela 5.2: Testes com dados mais próximos à realidade

Teste	6	7	8	9	10
Grande variação de pressão [bar]	50	70	70	50	40
Grande vazão [lpm]	150	150	150	150	150
Tipo de ciclo	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Tempo de parada	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Pressão média [bar]	100	100	100	100	100
Pressão máxima [bar]	120	120	120	120	120
Pressão mínima [bar]	70	50	50	70	80
Vazão máxima [lpm]	150	150	300	300	150
Nível de Contaminação	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)	Médio (entre 10 e 25µm)
Bomba	Palheta Variável + Acumulador	Palheta variável + Acumulador	?	Parafuso + Acumulador	Palheta variável

Testes 8 e 9: o sistema aceitou uma vazão diferente à estipulada anteriormente. O sistema permite estipular no máximo 150 l/min. Entrei com o valor de 300 l/min e o sistema aceitou.

Mais uma vez, a falha na explicação das duas primeiras questões do protótipo fez com que o especialista indicasse um possível erro de execução no sistema. As modificações nas primeiras perguntas do SE pretendem resolver também este ponto.

Teste 8: o sistema apresenta a seguinte solução: “Nenhuma bomba foi escolhida porque não há bomba capaz de fornecer 300 lpm em uma pressão de 100 bar (pressão de operação do sistema).” Mas no teste 9 ele consegue selecionar uma bomba para os mesmos

parâmetros com exceção da variação de pressão, que é usado como critério para seleção de variável ou fixa.

Conforme os fluxogramas de decisão (figuras 4.5 e 4.6) apresentados no capítulo anterior, os requisitos de projeto inseridos no teste 8 levam o protótipo a selecionar uma bomba de deslocamento variável; como nos dados levantados para bombas de deslocamento variável (tabela 4.3) não há alguma que forneça 300 lpm, então o sistema especialista acaba não selecionando uma bomba para a unidade de potência. Em futuras versões do sistema especialista devem ser previstas soluções para casos semelhantes a este, ou por meio de outros tipos de bombas hidrostáticas ou pela utilização de unidades de potência hidráulica diferentes (por exemplo, com bombas em paralelo).

O grifo do especialista chama a atenção para a forma de apresentação de algumas das soluções do sistema: segundo ele, alguns dos termos usados “*são expressões fortes que além de não dizer a verdade põe em dúvida a credibilidade do sistema*”. A sua sugestão, “*melhor dizer que o sistema ainda não está capacitado para selecionar uma bomba para tais parâmetros*”, bem como uma orientação do primeiro especialista para indicar as limitações do sistema, resultaram modificações importantes na apresentação dos resultados do protótipo: todas as possíveis respostas do sistema que envolviam tais afirmações foram reescritas, passando a incluir expressões como “O protótipo PHIDR não foi capaz de selecionar ...” e “Nesta versão do PHIDR, apenas a bomba de parafusos pode fornecer ...”.

No teste 9, o caso é semelhante ao teste 8: dentre os dados levantados para bombas de deslocamento fixo, apenas a de parafusos poderia fornecer 300 lpm de vazão. A apresentação da solução do nono teste, cujo texto contém a frase “[...] é a única capaz de fornecer...”, foi também motivo de críticas, sendo posteriormente modificada para mostrar as limitações atuais do protótipo.

Ainda no novo teste, o especialista afirmou desconhecer uma bomba de parafusos que trabalhe a 100 bar. Este caso é parecido com o teste 1: segundo algumas referências consultadas, existem bombas de parafusos que operam a esta pressão, porém não foi possível determinar se elas são comumente usadas em projetos de unidades de potência hidráulica.

6. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

Encerrando este texto, o presente capítulo mostra as conclusões da pesquisa e as sugestões para futuros trabalhos em sistemas baseados no conhecimento aplicados à Hidráulica e à engenharia. A seção 6.1 resume as características do protótipo PHIDR. Os resultados e as contribuições deste trabalho são apresentados na seção 6.2. Por fim, na seção 6.3, são sugeridos futuros trabalhos envolvendo o protótipo PHIDR e o desenvolvimento de sistemas de ensino inteligentes para a engenharia.

6.1. Considerações finais sobre o protótipo PHIDR

O protótipo desenvolvido nesta pesquisa procurou sistematizar as fases conceitual e preliminar do projeto de unidades de potência hidráulica, através de regras de escolha dos componentes mais adequados aos requisitos de projeto do sistema hidráulico. A organização do processo de projeto foi realizada a partir de uma seqüência de etapas de seleção, que foi apresentada em 4.3.1, baseada nas fases de projeto de Silva (1998), mostradas no terceiro capítulo.

Na atual versão do protótipo PHIDR, estão implementadas na base de conhecimento um conjunto de quatro unidades de potência hidráulica, que pode ser facilmente ampliado através de inserção de novos circuitos de potência; regras para a seleção do tipo de bomba e da presença ou não de um acumulador no circuito, correspondendo à primeira fase da seqüência de projeto adotada; regras para a seleção do princípio de deslocamento da bomba, que faz parte da segunda etapa de projeto; e regras para a seleção da UPH mais adequada, a terceira fase da seqüência descrita no quarto capítulo. A última etapa de projeto, de dimensionamento dos componentes da unidade, não foi implementada no protótipo, por razões explicadas na seção 4.4.

Além dos componentes já estudados nesta pesquisa, outros elementos também devem ser pesquisados para o projeto de UPHs, como trocadores de calor e tubulações. Também o fluido de trabalho deve ser tratado como um elemento do sistema hidráulico, pois, além de ser considerado na seleção de componentes da unidade de potência, como o filtro de óleo, suas características são importantes para a manutenção do sistema (SILVA, 1998).

Os resultados obtidos pelo protótipo PHIDR, apesar das restrições provenientes das dificuldades apresentadas no quarto capítulo, servem para reforçar a demonstração do potencial de aplicação da técnica de sistemas especialistas em áreas da Engenharia Mecânica.

Mesmo com poucas regras, baseadas principalmente da literatura especializada, o protótipo é capaz de selecionar uma unidade de potência dentre as disponíveis na base de conhecimento, e de escolher o princípio de deslocamento da bomba hidrostática.

6.2. Resultados e contribuições

Os resultados deste trabalho estão na sua maioria relacionados com o desenvolvimento do protótipo de sistema especialista para o projeto de unidades de potência hidráulica, a realização prática da pesquisa.

Primeiramente, entende-se que o levantamento feito na literatura técnica, no segundo capítulo, e a determinação das tarefas para a criação do protótipo, no capítulo 4, alcançaram satisfatoriamente o primeiro dos objetivos citados no primeiro capítulo: o estudo e a definição das tarefas para o desenvolvimento de um sistema especialista.

Por sua vez, a aquisição de conhecimento sobre unidades de potência hidráulica foi feita basicamente na literatura técnica, por causa da pouca interação com especialistas, explicada no capítulo 4. Como as fontes principais de conhecimento deste domínio de problema são os especialistas da área, conforme discutido na seção 3.3, conclui-se que a compilação de conhecimento sobre o projeto de UPHs ficou prejudicada, e aquém da imaginada no início desta pesquisa.

A sistematização de uma seqüência de projeto de unidades de potência hidráulica para posterior implementação em um sistema especialista pode ser considerada a principal contribuição desta pesquisa. Mesmo com as limitações inerentes a pouca interação com especialistas, a organização de projeto apresentada no quarto capítulo procura levar em conta os inter-relacionamentos entre os componentes que compõem a unidade de potência hidráulica, sendo conceitualmente diferente da abordagem encontrada na literatura técnica consultada neste trabalho. Conforme discutido na seção 3.3, as referências estudadas abordam a seleção e dimensionamento de componentes de maneira isolada, não mostrando em geral as relações existentes entre os mesmos em uma unidade de potência hidráulica, o que se entende como necessário para o projeto de UPHs. A sistematização aqui realizada mostra-se também adequada para futuros trabalhos na área, como a continuação do desenvolvimento do sistema especialista PHIDR e o desenvolvimento de um sistema de ensino inteligente voltado ao conhecimento organizado na pesquisa.

Resumidamente, a sistematização de uma seqüência de projeto realizada nesta pesquisa pode ser vista na figura 6.1. Convém lembrar que as regras referenciadas no

fluxograma, bem como outros detalhes sobre cada etapa em particular, podem ser vistos no capítulo 4.

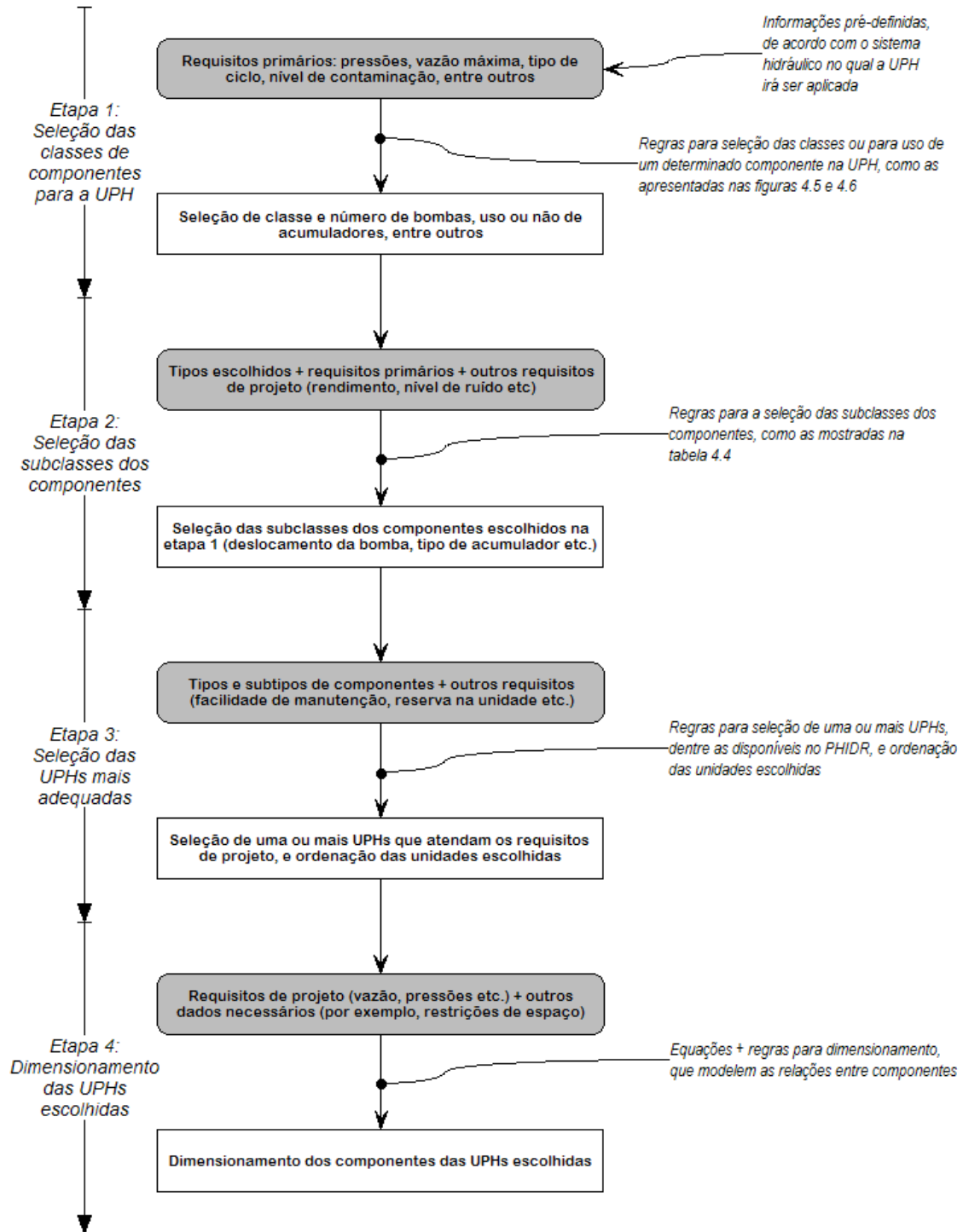


Figura 6.1: Resumo da sistematização de projeto de UPHs

Do último dos objetivos relacionados ao desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista, a verificação do conhecimento implementado foi abordada na seção 4.2, e a

validação foi discutida com detalhes no capítulo anterior. Levando-se em consideração a proposta do protótipo PHIDR, em geral a validação mostrou uma análise positiva com relação a parâmetros como adequação e aceitação dos resultados gerados. Algumas mudanças sugeridas pelos especialistas puderam ser prontamente implementadas no protótipo; outras, entretanto, envolvem novas etapas de aquisição de conhecimento, e por isso foram adicionadas às sugestões para futuros trabalhos envolvendo o sistema PHIDR.

Para os objetivos referentes aos sistemas de ensino inteligentes, o segundo capítulo descreve uma introdução sobre os campos de conhecimento envolvidos no seu desenvolvimento, bem como sobre algumas características desejáveis a estes sistemas. Compreende-se que os conhecimentos necessários à criação de um sistema baseado no conhecimento para fins educacionais são amplos, abrangendo áreas diversas como Educação e Psicologia, que demandam um tempo maior para estudo, análise e reflexão. De todo modo, entende-se que as considerações e a primeira idéia para o desenvolvimento de um sistema de ensino inteligente realizadas neste texto são uma forma de incentivar o seu debate e a sua pesquisa dentro da Engenharia.

6.3. Sugestões para futuros trabalhos

As propostas para trabalhos futuros podem ser divididas em duas partes, uma relacionada ao protótipo de sistema especialista criado nesta pesquisa e outra voltada à pesquisa e desenvolvimento de sistemas de ensino inteligentes para a engenharia.

Quanto ao protótipo PHIDR, a continuação do desenvolvimento envolve novos ciclos iterativos de aquisição → representação → verificação → validação de conhecimento, conforme o modelo incremental adotado nesta pesquisa. Além da análise das sugestões e críticas feitas pelos especialistas que validaram o protótipo, apresentadas ao longo dos capítulos 4 e 5, as idéias para a ampliação posterior da base de conhecimento, para o aumento da funcionalidade do protótipo, são:

- Implementação de outras unidades de potência hidráulica no conjunto de unidades disponíveis para seleção;
- Aquisição de conhecimento e inclusão de novas regras para escolha de outros componentes da UPH, incluindo seus subtipos, quando for necessário;

- Adição de outras regras para a seleção de uma unidade de potência, levando em consideração outros requisitos de projeto, como custos envolvidos, facilidade de manutenção e nível de ruído admissível; e
- Codificação de regras e equações matemáticas para dimensionamento dos componentes da unidade de potência hidráulica selecionada.

Outros assuntos relacionados para o projeto de unidades de potência hidráulica, como a manutenção do sistema e a análise de custos de aquisição e de operação, também devem ser considerados em futuros desenvolvimentos do sistema PHIDR.

Além da ampliação da base de conhecimento do protótipo, que permitirá estabelecer uma melhor organização do conhecimento sobre projeto de unidades de potência hidráulica, sugere-se ainda para o desenvolvimento do sistema PHIDR a elaboração de uma interface gráfica para as entradas do programa e a implementação de novas saídas para o usuário, como análise de custos e planos de manutenção. A possibilidade de integração de sistema à Internet também deve ser estudada.

Em relação à pesquisa e ao desenvolvimento de sistemas de ensino inteligentes para a engenharia, sugere-se:

- A análise e o estudo de questões relativas ao desenvolvimento de SEIs como ferramentas auxiliares de ensino, tais quais as apresentadas no final do segundo capítulo, que envolvam o ensino de problemas de Engenharia; a arquitetura dos SEIs; as táticas e as estratégias de ensino que podem ser aplicadas, entre outros pontos relevantes. Estes temas devem ser analisados em um contexto de formação integral do engenheiro;
- A aplicação da idéia apresentada na subseção 2.4.4 para o desenvolvimento de um sistema de ensino inteligente voltado ao projeto de unidades de potência hidráulica, a fim de aprender mais sobre as áreas envolvidas na criação dos SEIs, bem como testar estratégias e táticas de ensino sobre projeto de UPHs.

Referências Bibliográficas

ALVES, Guilherme D. **Sistema Especialista Protótipo para Diagnóstico de Falhas em um Sistema Hidráulico Naval**. 2001. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ANDRIESSEN, Jerry E.B.; SANDBERG, Jacobijn A.C. Where is Education Heading and How About AI? **International Journal of Artificial Intelligence in Education**, Brighton, v. 10, p. 130-150, 1999. Disponível em: <<http://edu.fss.uu.nl/medewerkers/ja/docs/whereisdef.htm>>. Acesso em: 08 set. 2002.

AULETE, Caldas. **Dicionário Contemporâneo da Língua Portuguesa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Delta, 1986. 5 volumes. p. 1048.

BACK, Nelson; FORCELLINI, Fernando A. **Projeto de Produtos**. Florianópolis, 1997. Curso de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Apostila de aula.

BACK; Nelson; OGLIARI, André. **Gerenciamento do Desenvolvimento de Produtos**. Florianópolis, 2001. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Disciplina de Gerenciamento do Desenvolvimento de Produtos, Universidade Federal de Santa Catarina. Apostila de aula.

BITTENCOURT, Guilherme. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1998.

BORGES, Joel Brasil. **Desenvolvimento de protótipo de sistema especialista para projeto de sistemas pneumáticos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOSCH. Business Unit Industrial Hydraulics. **Hydro-pneumatic Accumulators**. Version 1.1, [2002?]. Disponível em: <http://app10.bosch.de/HYcatalog/pdf/ih/ih141/pdf/ih141_000.PDF>. Acesso em: 19 mai. 2002.

CHO, Byung-in. et al. A Curriculum Planning Model for an Intelligent Tutoring System. **Proceedings of the Twelfth Florida Artificial Intelligence Symposium**, Menlo Park, p-197-202, 1999. Disponível em: <<http://citeseer.nj.nec.com/cho99curriculum.html>>. Acesso em: 06 Agosto 2001.

CLANCEY, William J. A tutorial on Situated Learning. **Proceedings of the International Conference of Computers and Education**, Taiwan, 1995. Disponível em: <<http://cogprints.ecs.soton.ac.uk/archive/00000323/00/139.htm>>. Acesso em: 28 ago. 2002.

CLANCEY, William J. Developing learning technology in practice. In: BLOOM, Charles; LOFTIN, R. Bowen (Ed.). **Facilitating the Development and Use of Interactive Learning Environments**. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1998. Disponível em: <<http://cogprints.ecs.soton.ac.uk/archive/00000445/00/140.htm> >. Acesso em: 28 ago. 2002.

CLANCEY, William J. **Knowledge-based tutoring: the Guidon program**. Cambridge: MIT Press, 1987.

DREYFUS, Hubert; Stuart. **From Socrates to Expert Systems: the limits and dangers of Calculative Rationality**. [1998?]. Disponível em: <http://socrates.berkeley.edu/~hdreyfus/html/paper_socrates.html>. Acesso em: 28 ago. 2002.

DUTRA, Luiz Henrique de Araújo. **Epistemologia da aprendizagem**. Rio de Janeiro: DP&A, 2000.

DYM, Clive L.; LEVITT, Raymond E. **Knowledge-based systems in engineering**. New York: McGraw-Hill, 1991.

ESPOSITO, Anthony. **Fluid power with applications**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.

GIARRATANO, Joseph; RILEY, Gary. **Expert systems: principles and programming**. 2. ed. Boston: PWS Publishing Company, 1994.

GIRAFFA, Lucia Maria M. **Uma arquitetura de tutor utilizando estados mentais**. 1999. 177 f. Tese (Doutorado em Computação) – PPGC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GONZALEZ, Avelino J.; DANKEL, Douglas D. **The Engineering of knowledge-based systems**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

GÖTZ, Werner. **Hidráulica, teoria e aplicações, da Bosch**. Stuttgart: Bosch, c1991.

HENKE, Russel W. **Introduction to fluid power circuits and systems**. Reading: Addison-Wesley, 1970.

HYDRAULIC SUPERMARKET. **Accumulators**. 2000. Disponível em: <http://www.hydraulicsupermarket.com/upload/db_documents_doc_3.pdf>. Acesso em: 28 out. 2001.

HYDRAULIC SUPERMARKET. **Pump and motor calculations for rotary drives**. 2000. Disponível em: <http://www.hydraulicsupermarket.com/upload/db_documents_doc_9.pdf>. Acesso em: 28 out. 2001.

HYDRAULIC SUPERMARKET. **Reservoirs**. 2000. Disponível em: <http://www.hydraulicsupermarket.com/upload/db_documents_doc_10.pdf>. Acesso em: 28 out. 2001.

INDUSTRIAL TRAINING ZONE. **Practical hydraulic system design**. [2002?]. Disponível em: <<http://www.fluidpowerzone.com/shared/hyd/fluid%20power%20data/reference%20material/practical%20hydraulic%20system%20design.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2002.

McCARTHY, John. **What is Artificial Intelligence?** Stanford, jun. 2002. Disponível em: <<http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2002.

McCARTHY, John; HAYES, Patrick J. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In: MELTZER, Bernard; MICHIE, Donald (Ed.). **Machine Intelligence**

4. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1969. Disponível em: <<http://www-formal.stanford.edu/jmc/mcchay69.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2002.

NFPA. **Application guidelines for accumulators**. 1st edition. Milwaukee: National Fluid Power Association, ago. 1997. Disponível em: <http://www.nfpa.com/pdf/T3_4_9-1997.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2002.

ONG, Jim; RAMACHANDRAN, Sowmya. **Intelligent Tutoring Systems: the what and the how**. 2000. Disponível em: <<http://www.learningcircuits.org/feb2000/ong.html>>. Acesso em: 09 set. 2001.

PARKER HANNIFIN. Hydraulic Pump/Motor Division, North America. **Catalog 2600-500-1/USA**. Greenville: Parker Hannifin, [2002]. Disponível em: <<http://www.parker.com/pumpmotor/cat/english/1552b002.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2001.

PENROSE, Roger. **The emperor's new mind**: concerning computers, minds, and the laws of physics. New York: Oxford University Press, 1989.

PERERA, U. S. **Concurrent Design of Products and Processes for Conceptual Design of Injection Molding**. 1997. 316 p. *Thesis* (Doctor of Philosophy) - Dep. of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Melbourne, Australia.

SCHALKOFF, Robert J. **Artificial intelligence**: an engineering approach. New York: McGraw-Hill, 1990.

SOFIMA. **MRH-MSE Catalog**. [2002?]. Disponível em: <<http://www.sofima-hyd.com/pdf/MRH-MSE.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2003.

SELF, John. **Computational Mathetics**. 1995. Disponível em: <<http://cbl.leeds.ac.uk/~jas/cm.html>>. Acesso em: 28 ago. 2002.

SELF, John. Learner models in collaborative Intelligent Educational Systems. In: GOODYEAR, Peter (Ed.). **Teaching knowledge and intelligent tutoring**. Norwood: Ablex, 1991. p. 85-104. Disponível em: <<http://citeseer.nj.nec.com/128676.html>>. Acesso em: 06 ago. 2001.

SELF, John. Theoretical foundations for Intelligent Tutoring Systems. **Journal of Artificial Intelligence in Education**, vol. 1, n.4, p. 3-14. 1990. Disponível em: <<http://citeseer.nj.nec.com/self90theoretical.html>>. Acesso em: 06 ago. 2001.

SILVA, Jonny C. **Expert System Prototype For Hydraulic System Design Focusing On Concurrent Engineering Aspects**. 1998. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, Jonny C.; BACK Nelson. Shaping the Process of Fluid Power System Design Applying an Expert System. **Research in Engineering Design**, Berlin, v. 12, n. 1, p.8-17, 2000.

TAYLOR, David A. **Object-Oriented Technology: A Manager's Guide**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

TRINKEL, Bud. **Fluid Power Circuits Explained**. Newburgh: HYPN Educational Books, jan. 1996.

VESCOR. **Reservoirs**. 1997. Disponível em: <<http://www.vescor.com/Updates/catalog/reservor/Reservor.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2001.

VICCARI, Rosa M.; GIRAFFA, Lúcia Maria M. Estratégias de Ensino em Sistemas Tutores Inteligentes Modelados através da Tecnologia de Agentes. **Revista Brasileira em Informática na Educação**, Porto Alegre, n. 5, p. 9-18, set. 1999. Disponível em: <<ftp://protem.inf.ufrgs.br/teste/sbie98mcoe.zip>>. Acesso em: 09 set. 2001.

VICCARI, Rosa M.; GIRAFFA, Lucia Maria M. The Use of Agents Techniques on Intelligent Tutoring Systems. **Proceedings of the International Conference of The Chilean Society of Computer Science**, Antofagasta, p. 9-14, nov. 1998. Disponível em: <<ftp://protem.inf.ufrgs.br/teste/chilefinal.zip>>. Acesso em: 09 Setembro 2001.

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

YAZDANI, B.; HOLMES, C. Four models of design definition: sequential, design centered, concurrent and dynamic. **Journal of Engineering Design**, Chelmsford, v. 10, n. 1, p. 25-37, 1999.

ZHOU, Yujian; EVENS, Martha W. A Practical Student Model in an Intelligent Tutoring System. **Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence**, Chicago, p. 13-18, 1999. Disponível em:
<<http://citeseer.nj.nec.com/zhou99practical.html>>. Acesso em: 06 Agosto 2001.

ZIMMERMANN, Marco Antônio. **Sistema especialista protótipo para auxílio na seleção de bombas hidrostáticas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Apêndices

Apêndice A – Instruções do Protótipo PHIDR

Este apêndice é um “manual de instruções” do sistema especialista desenvolvido na pesquisa. Estão aqui apresentadas as instruções de instalação do protótipo PHIDR, tais quais descritas no arquivo de ajuda e na página de divulgação¹⁷; as entradas do sistema e suas ajudas, quando existentes; e as explicações para cada escolha feita pelo sistema. Para um exemplo do arquivo de resultados criado pelo protótipo, ver apêndice B.

Instalação do PHIDR

A instalação do protótipo PHIDR é feita a partir do arquivo de distribuição disponível na página do sistema ou através de mensagem eletrônica para os responsáveis pelo desenvolvimento. Neste arquivo estão incluídos o ambiente CLIPS, a base de conhecimento do protótipo PHIDR, um arquivo batch para carregar a base no CLIPS, um arquivo de ajuda e sete imagens para a apresentação dos resultados. Apenas duas etapas devem ser seguidas para instalar o protótipo:

1. Criar um diretório em seu computador para copiar os arquivos do PHIDR (por exemplo, c:\phidr);
2. Descompactar o arquivo phidr.zip (o arquivo de distribuição) no diretório criado.

Uso do protótipo

Finalizada a instalação, carrega-se a base de conhecimento do protótipo no CLIPS através dos seguintes passos:

1. Iniciar o programa CLIPS executando o arquivo clipswin.exe;
2. Carregar o arquivo batch (arquivo phidr.bat) no CLIPS, entrando no menu “File” e selecionando “Load Batch”, conforme mostrado na Figura A.1.

¹⁷ Em <http://www.laship.ufsc.br/hpudesign>

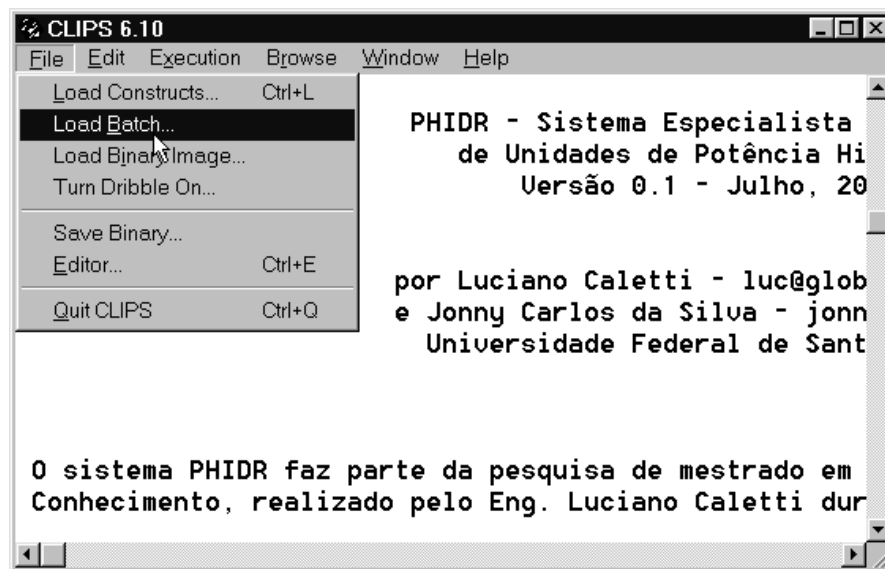


Figura A.1: Carregando o protótipo no ambiente CLIPS

Se corretamente carregado, a tela de apresentação do protótipo PHIDR é mostrada ao usuário, conforme Figura A.2:

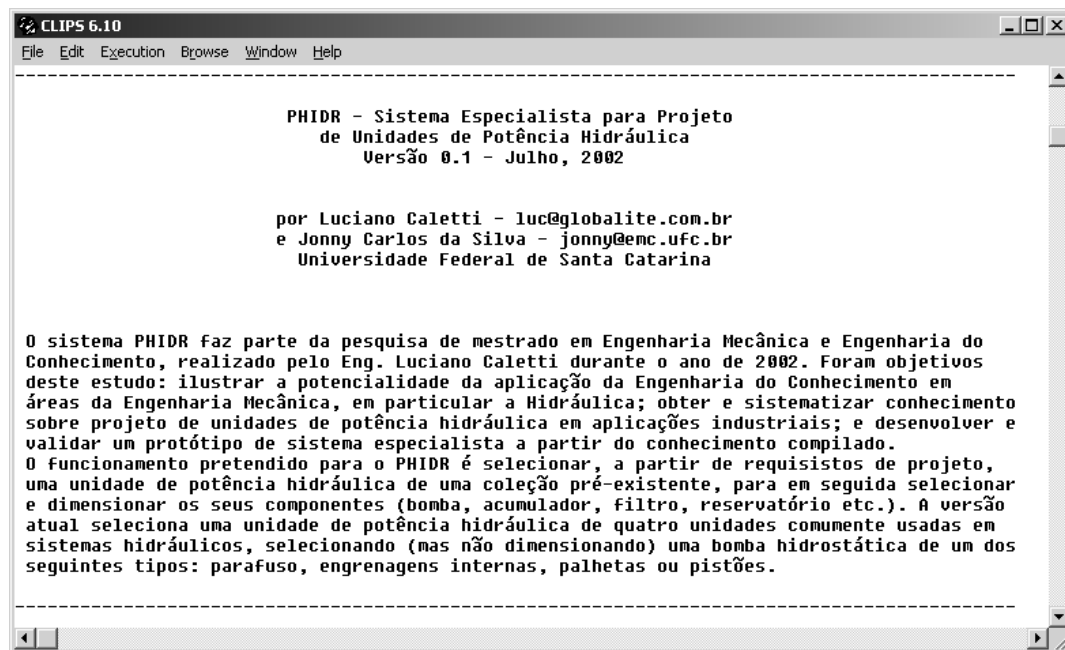


Figura A.2: Tela de apresentação do protótipo PHIDR

Após a tela de apresentação, o protótipo PHIDR inicia as perguntas referentes aos requisitos de projeto da unidade de potência hidráulica. Todos os dados são inseridos através do teclado, e um símbolo de interrogação é mostrado junto à seta do *mouse* para indicar que o protótipo espera uma resposta do usuário (Figura A.3).

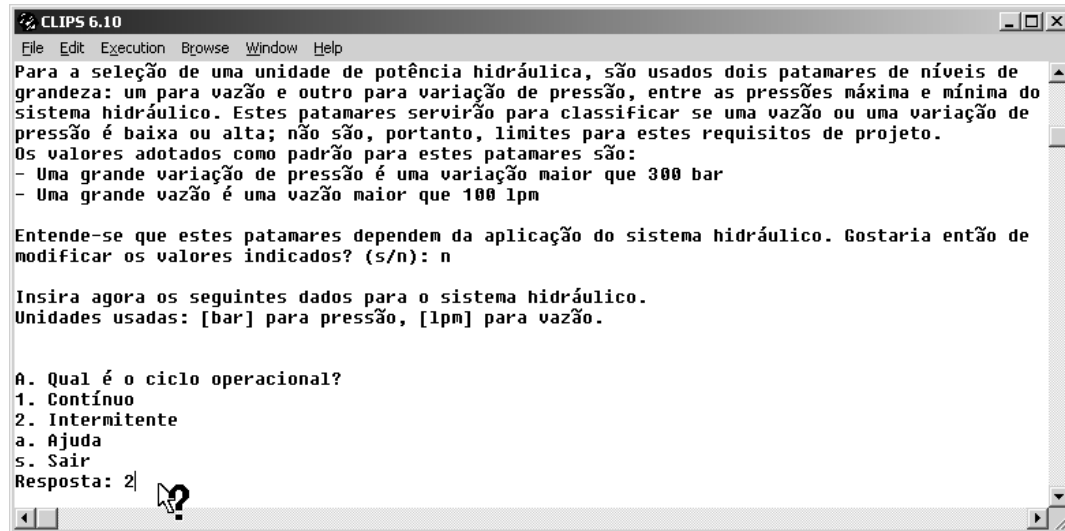


Figura A.3: Exemplo de entrada do protótipo PHIDR

As primeiras considerações sobre a seleção de unidades de potência hidráulica que são abordadas no protótipo PHIDR referem-se aos valores associados a grandes diferenças de pressão e a grandes vazões. Respectivamente, os valores-padrão são 300 bar e 100 lpm; o sistema especialista permite modificar estes valores caso o usuário entenda que eles não são adequados no seu projeto.

O primeiro requisito de projeto a ser inserido no protótipo PHIDR é o *tipo de ciclo de trabalho* do sistema, que pode ser *contínuo* ou *intermitente* (Figura A.3). Nesta pergunta, o usuário tem a disposição um pequeno texto de ajuda. Caso o ciclo de operação for intermitente, o projetista deve informar também o *tempo de parada* do sistema, que pode assumir um dos seguintes valores qualitativos: *rápido*, *médio*, ou *longo*. Também neste requisito existe uma curta explicação disponível ao usuário.

As ajudas ao usuário para estas duas questões são:

- Na pergunta do ciclo de operação: “Em um ciclo contínuo, os atuadores param somente por um curto período de tempo para mudar a sua direção, o que significa que os atuadores do sistema sempre necessitam de vazão fornecida pela bomba. Em um ciclo intermitente, os atuadores param por períodos maiores de tempo para realizar um trabalho ou movimento específico (por exemplo, em uma prensa, quando é necessário manter pressão por longos períodos)”.
- Na pergunta do tempo de parada: “O tempo de parada é considerado o período de tempo que o(s) atuador(es) do sistema hidráulico permanecem parados após

alcançarem um ponto específico (como depois de haver alcançado a carga de trabalho em uma prensa). A pressão aumenta e a bomba permanece trabalhando enquanto os atuadores permanecem parados.”

Os próximos dados de entrada referem-se aos valores de pressão existentes durante a operação do sistema hidráulico. O usuário deve informar ao sistema especialista a *pressão mínima*, a *média* e a *máxima* esperadas no ciclo de operação, dentro de uma faixa possível de valores (de 0 a 700 bar). O protótipo PHIDR verifica se as pressões inseridas estão dentro da faixa adotada e se são coerentes, ou seja, se a pressão mínima é menor ou igual à média e se a pressão máxima é igual ou maior que a média. Caso não estejam corretas, o sistema especialista avisa ao usuário o erro encontrado e pede um novo valor de entrada (Figura A.4).

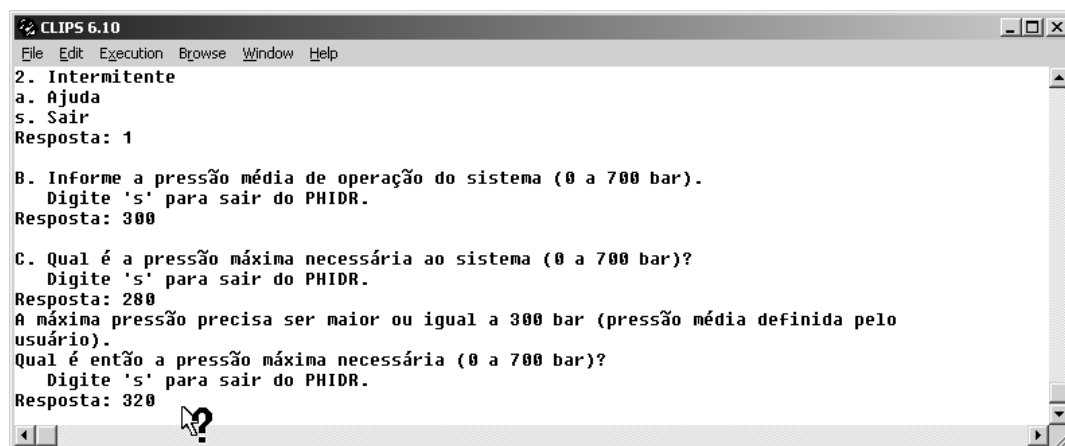


Figura A.4: Entrada de pressão máxima e mensagem de aviso

Depois dos valores de pressão, o protótipo pede ao usuário o valor de *vazão máxima* necessária ao sistema, entre 0 e 300 lpm. Aqui também o sistema especialista verifica a vazão inserida pelo usuário, pedindo um novo valor se a vazão estiver fora da faixa adotada. Para finalizar as questões que sempre são feitas pelo protótipo PHIDR, o usuário deve informar o valor qualitativo do *nível de contaminação do fluido*, que pode assumir um destes valores: *alto*, *médio* ou *baixo*.

As perguntas seguintes são realizadas de acordo com a necessidade de resolução de conflitos na escolha de um determinado princípio de deslocamento para a bomba hidrostática, conforme discutido no quarto capítulo. A depender da situação, o usuário pode ter que informar, referente aos requisitos de projeto da bomba:

- O *nível de ruído ou de vibração*, que pode ser *baixo* ou *alto*;

- O *rendimento volumétrico*, entre *médio* (em torno de 86%) ou *alto* (maior que 90%); e/ou
- Se é importante ter uma bomba de pequenas dimensões.

Completadas as perguntas, o sistema especialista faz a escolha da unidade de potência mais adequada, apresenta uma tela com o resumo dos resultados da seleção (Figura A.5) e gera um documento em formato HTML, chamado de *resultados.html*, que é salvo no mesmo diretório de instalação do protótipo. O usuário pode então abrir este arquivo em qualquer navegador para ver as explicações sobre a seleção realizada. Um exemplo de arquivo de resultados efetivamente gerado pelo protótipo PHIDR pode ser visto no apêndice B.

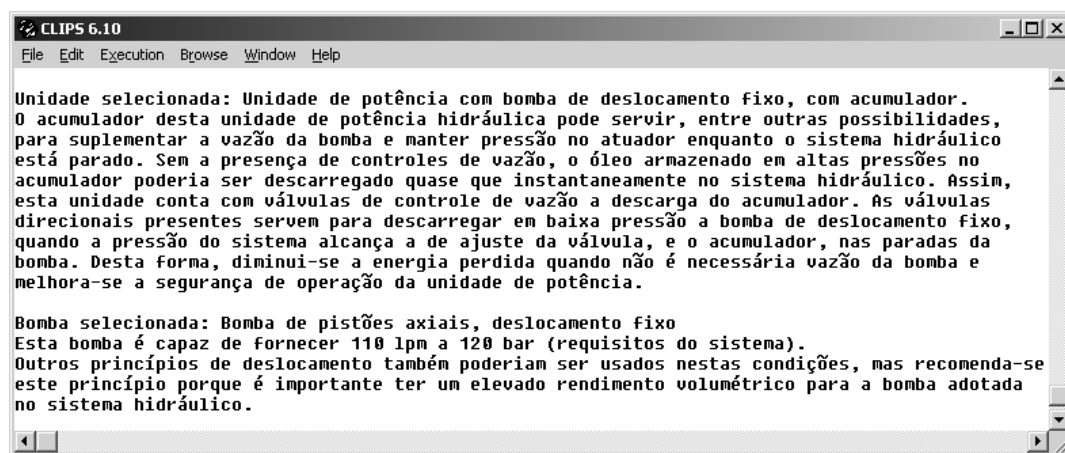


Figura A.5: Resumo dos resultados apresentado pelo protótipo PHIDR

O protótipo por fim pergunta ao usuário se ele deseja fazer uma nova escolha de uma unidade de potência hidráulica, ou se quer encerrar a seção aberta. Encerrando a seção, o sistema especialista pode ser novamente carregado seguindo os passos apresentados no começo desta seção.

Explicações referentes à seleção

O protótipo PHIDR apresenta uma justificativa para a seleção da unidade de potência hidráulica mostrada nas estruturas de decisão presentes no capítulo 4 (Figuras 4.3 e 4.4). Acompanhada destas explicações, no arquivo de resultados também estão presentes justificativas referentes à escolha do princípio de deslocamento da bomba, que refletem as regras apresentadas também no quarto capítulo (Tabela 4.4).

As explicações para cada escolha possível da UPH, separadas pelo ciclo de operação do sistema hidráulico, estão apresentadas nas tabelas a seguir. Os valores mostrados para grandes diferenças de pressão (300 bar) e grandes vazões (100 lpm) são os valores-padrão adotados pelo protótipo PHDR

Tabela A.2: Justificativas para escolha da UPH, ciclo intermitente de operação

Variáveis	Explicação apresentada
Pequena vazão e tempo de parada médio a longo	Uma bomba de deslocamento variável com compensação de pressão é usada, pois o sistema opera em um ciclo intermitente com médio a longo período de parada; com um rápido tempo de parada, uma bomba com compensação de pressão não é recomendada porque há mais riscos da bomba falhar prematuramente (o sistema de compensação terá que trabalhar rapidamente, e picos de pressão resultantes acabam levando à falha do componente). Um acumulador não é necessário, pois a vazão não é tão elevada (menor que 100 lpm).
Pequena vazão e tempo de parada rápido	Como o sistema hidráulico opera com um rápido tempo de parada, não é recomendado o uso de uma bomba com compensação de pressão, porque ela tende a falhar prematuramente (o mecanismo de compensação terá que trabalhar rapidamente, e picos de pressão resultantes acabam levando à falha do componente). Então, uma unidade de potência hidráulica com acumulador e bomba de deslocamento fixo é escolhida porque o sistema trabalha em um ciclo intermitente com curto tempo de parada e a vazão necessária é pequena (menor que 100 lpm).
Alta vazão, tempo de parada médio a longo e pequena diferença de pressão	Como a vazão é alta (maior que 100 lpm), uma unidade de potência hidráulica com acumulador é recomendada porque o uso de acumuladores pode reduzir o tamanho necessário da bomba, trazendo economia nos custos de aquisição da bomba e nos custos operacionais do sistema. Como o ciclo de operação tem médio a longo tempo de parada, uma bomba de deslocamento variável com sistema de compensação de pressão pode ser usada; porém, como a diferença entre as pressões máxima e mínima de operação não é tão grande (menor que 300 bar), uma bomba simples (de deslocamento fixo) é escolhida.
Alta vazão, tempo de parada médio a longo e grande diferença de pressão	Como a vazão é alta (maior que 100 lpm), uma unidade de potência hidráulica com acumulador é recomendada porque o uso de acumuladores pode reduzir o tamanho necessário da bomba, trazendo economia nos custos de aquisição da bomba e nos custos operacionais do sistema. Uma bomba de deslocamento variável com compensação de pressão é escolhida porque o ciclo de operação tem médio a longo tempo de parada, e a diferença entre as pressões máxima e mínima de operação é alta (maior que 300 bar).
Alta vazão e tempo de parada rápido	Como a vazão é alta (maior que 100 lpm), uma unidade de potência hidráulica com acumulador é recomendada porque o uso de acumuladores pode reduzir o tamanho necessário da bomba, trazendo economia nos custos de aquisição da bomba e nos custos operacionais do sistema. Uma bomba de deslocamento variável com compensação de pressão não é recomendada porque o ciclo de operação tem um rápido tempo de parada (uma bomba com compensação de pressão geralmente falha de modo prematuro nesta condição). Então, uma unidade de potência com uma bomba de deslocamento fixo é escolhida para satisfazer os requisitos de projeto do sistema hidráulico.

Tabela A.3: Justificativas para escolha da UPH, ciclo contínuo de operação

Variáveis	Explicação apresentada
Grande diferença de pressão e pequena vazão	Apesar da grande diferença existente entre as pressões máxima e mínima do sistema (maior que 300 bar), pela vazão não muito elevada (menor que 100 lpm) recomenda-se o uso de uma bomba de deslocamento fixo ao invés de uma de deslocamento variável com compensação de pressão: o custo de aquisição desta última é mais elevado, e a redução de consumo de energia pode não compensar os gastos iniciais extras.
Grande diferença de pressão e alta vazão	Como a diferença existente entre as pressões máxima e mínima do sistema é grande (maior que 300 bar) e a vazão necessária é alta (maior que 100 lpm), é recomendado o uso de uma bomba de deslocamento variável com compensação de pressão. Em comparação a uma bomba de deslocamento fixo, o seu custo de aquisição é maior; porém, a redução de custos operacionais (de consumo de energia) pode compensar, a médio prazo, os maiores gastos iniciais do sistema hidráulico.
Pequena diferença de pressão	Como a diferença entre as pressões máxima e mínima não é muito elevada (abaixo de 300 bar) e como o ciclo de operação do sistema hidráulico é contínuo, não é necessário usar na unidade de potência hidráulica com bomba de deslocamento variável com compensação de pressão. É usada uma bomba de deslocamento fixo, de menor custo de aquisição.

Apêndice B – Exemplo de arquivo de resultados

O texto a seguir foi efetivamente criado pelo protótipo do sistema especialista PHIDR, correspondendo a uma das seleções possíveis de unidade de potência hidráulica. Para poder ser aqui apresentado, formatou-se o documento original em HTML no editor de textos usado na elaboração desta dissertação, com o cuidado de evitar grandes modificações na aparência final do arquivo de resultado.

Resultados do PHIDR

Sistema especialista criado por Luciano Caletti (luc@globalite.com.br) e Jonny Carlos da Silva (jonny@emc.ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, SC, Brasil

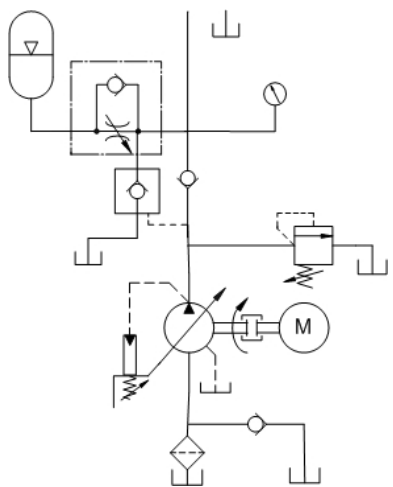
Requisitos do Sistema Hidráulico

Ciclo operacional: intermitente
Tempo de parada: médio
Pressão média de operação: 120 bar
Máxima pressão necessária: 400 bar
Mínima pressão necessária: 80 bar
Vazão: 110 lpm
Nível de contaminação do fluido: médio

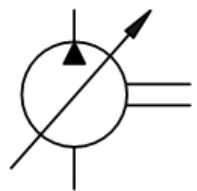
Atenção: Outros requisitos de projeto serão incluídos em novas versões do PHIDR

Unidade de Potência Hidráulica selecionada

Esta unidade de potência foi escolhida pelos seguintes motivos: como a vazão é alta (maior que 100 lpm), uma unidade de potência hidráulica com acumulador é recomendada porque o uso de acumuladores pode reduzir o tamanho necessário da bomba, trazendo economia nos custos de aquisição da bomba e nos custos operacionais do sistema. Uma bomba de deslocamento variável com compensação de pressão é escolhida porque o ciclo de operação tem médio a longo tempo de parada, e a diferença entre as pressões máxima e mínima de operação é alta (maior que 300 bar).

	<p>Descrição Unidade de potência com bomba de deslocamento variável com compensação de pressão, e com acumulador.</p> <p>Usos desta unidade de potência Ciclos de operação intermitentes com altas vazões, grandes variações de pressão e médios a longos tempos de parada.</p> <p>Informações gerais O acumulador desta unidade de potência hidráulica pode servir, entre outras possibilidades, para suplementar a vazão da bomba e manter pressão no atuador enquanto o sistema hidráulico está parado. Sem a presença de controles de vazão, o óleo armazenado em altas pressões no acumulador poderia ser descarregado quase que instantaneamente no sistema hidráulico. Os maiores custos de aquisição desta unidade, pelo uso de uma bomba de deslocamento variável, podem ser compensados pela redução dos seus custos de operação em algumas situações de uso. Como nesta unidade de potência o controle de vazão é feito pela bomba, não é necessário o uso de uma válvula direcional para descarregá-la; por sua vez, o acumulador é descarregado por uma válvula de retenção pilotada. Para garantir a segurança do sistema hidráulico, adota-se nesta unidade de potência uma válvula limitadora de pressão, perto da saída da bomba hidrostática.</p> <p><i>Atenção: futuras versões do PHIDR deverão indicar outras possibilidades para a unidade de potência hidráulica</i></p>
---	---

Componentes

<p><i>Bomba</i></p>	
	<p>Descrição Bomba de pistões axiais, deslocamento variável</p> <p>Razões para seleção desta bomba Esta bomba é capaz de fornecer 110 lpm a 120 bar (requisitos do sistema). Como é importante que o rendimento da bomba seja alto, esta bomba é mais recomendada para o sistema do que uma bomba de palhetas que também poderia ser usada, se não existisse tal requisito de rendimento.</p> <p>Dimensionamento Em desenvolvimento.</p>

Acumulador, Filtro e Reservatório

Seleção e dimensionamento destes componentes - Em desenvolvimento.
--

Referências usadas nesta seleção

Livros

ESPOSITO, Anthony. **Fluid power with applications**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.

von LINSINGEN, Irlan. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. Editora da UFSC. Florianópolis, SC. Brasil. 2001.

IVANTYSYN, Jaroslav, IVANTYSYNOVA, Monika. **Hydrostatic Pumps and Motors**. Primeira edição. Academia Books International. Nova Déli. Índia. 2001.

TRINKEL, Bud. **Fluid Power Circuits Explained**. HYPN Educational Books, Ltd. Newburgh, IN. EUA. Janeiro, 1996.

SILVA, Jonny C. **Expert System Prototype For Hydraulic System Design Focusing On Concurrent Engineering Aspects**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ZIMMERMAN, Marco Antônio. **Sistema especialista protótipo para auxílio na seleção de bombas hidrostáticas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Na Internet

- Technical Literature - [Hydraulic Supermarket](#)
- Facts Worth Knowing About Hydraulics - [Danfoss Hydraulics Literature](#)
- Practical Hydraulic System Design - [Industrial Training Zone](#)
- Power Supply Units - [KEOHPS](#)

Para maiores informações sobre este programa, visite o site [HPUDesign](#).

Apêndice C – Questionário de avaliação do protótipo PHIDR

Por favor, envie suas respostas para Luciano Caletti (luc@globalite.com.br) e Jonny Carlos da Silva (jonny@emc.ufsc.br). Nós agradecemos a sua colaboração.

Seus dados

Nome:

Título:

Organização:

E-mail:

1. Analise os seguintes pontos:

- a) Perguntas do programa: definições, ajuda das questões, faixas de valores nas questões quantitativas etc.
- b) Resultados do sistema especialista: as escolhas são satisfatórias? São completas, claras, relevantes? As razões de escolha são adequadas? Outras considerações pertinentes.
- c) Aparência e informações das saídas do programa: o arquivo resultados.html é adequadamente rico em informações? É bem formatado? Que outras informações poderiam ser acrescentadas? Outras considerações pertinentes.

2. Qual a aplicação prática, para você ou para a sua organização, que você imaginaria para este sistema especialista?

3. Você estaria interessado em colaborar com o desenvolvimento desse sistema especialista? Se sim, como poderia ser a sua colaboração (crescimento/modificação da base de conhecimento, validação do sistema etc.)?

4. Caso ocorra algum erro durante a execução do sistema especialista, informar qual o erro existente e os dados inseridos que levaram a esse erro.

5. Comentários gerais sobre o programa, e outras sugestões de melhoria.

Para a realização de uma avaliação mais objetiva, pedimos que defina notas, de acordo com a classificação mostrada, para cada um dos critérios listados a seguir.

Opinião	Concorda completamente	Concorda	Aceita	Discorda	Discorda completamente
Nota	4	3	2	1	0

Critério	Nota
1- Claro entendimento das entradas qualitativas	
2- Claro entendimento das entradas quantitativas	
3 – Fluxo de informação adequado	
3- Adequada explicação das saídas	
5- Velocidade de resposta satisfatória	

Para cada critério que você discorda (aqueles que receberam uma nota abaixo de 2), especifique por que ele não foi satisfeito e o que deveria ser feito para aprimorá-lo.

Apêndice D – Questionários enviados pelos especialistas

Questionário 1

Nome: Irlan von Linsingen
Título: Dr. Educ.
Organização: UFSC
E-mail: linsingen@emc.ufsc.br

1. Analise os seguintes pontos:

a. Perguntas do programa: definições, ajuda das questões, faixas de valores nas questões quantitativas etc.

b. Resultados do sistema especialista: as escolhas são satisfatórias?

São possibilidades, mas não oferecem muitas alternativas (Por exemplo: não são previstos sistemas com bombas em paralelo).

São completas, claras, relevantes?

Não são completas. A relevância é relativa ao interlocutor, ou seja, a que estará interagindo com o programa.

As razões de escolha são adequadas?

A abordagem é fragmentada, não possibilitando uma visão sistêmica. Isso significa que o projetista deverá ter uma idéia prévia do que deseja (visão de conjunto). Em tais circunstâncias, o sistema pode ficar complicado para um iniciante e limitado para um especialista.

Outras considerações pertinentes.

Percebo problemas quanto às informações nos resultados. Por exemplo: numa simulação que realizei, justifica-se a seleção da bomba pelo fato dela ser capaz de bombear 100 lpm a 150 bar. Esta pressão, 150 bar, é a pressão média de trabalho escolhida e não a máxima de trabalho (escolhi 210 bar), o que pode levar a um sub-dimensionamento do sistema.

c. Aparência e informações das saídas do programa: o arquivo resultados.html é adequadamente rico em informações?

Não muito. Creio que poderia ser mais didático e rico em informações, principalmente em relação às suas limitações.

É bem formatado?

Poderia ser mais amigável. Digamos que ele é enxuto e claro, mas poderia possuir um visual mais agradável também em termos estético-funcionais.

Que outras informações poderiam ser acrescentadas? Outras considerações pertinentes.

2. Quais as aplicações práticas, para você ou para a sua organização, que você imaginaria para este sistema especialista?

Para efeito de projeto de sistemas, pode ser útil para algumas situações muito particulares. De modo geral, penso que necessita mais implementações que permitam uma maior diversificação de situações-problema. Seria interessante que pudesse possibilitar uma abertura e não um fechamento (fechamento significando convergência para uma solução ótima). Abertura no sentido de permitir ao usuário tomar decisão sobre diferentes possibilidades.

Não creio que seja adequado para fins educacionais, uma vez que não cria situações apropriadas para a construção de conhecimento.

3. Caso ocorra algum erro durante a execução do sistema especialista, informar qual o erro existente e os dados inseridos que levaram a esse erro.

4. Comentários gerais sobre o programa, e outras sugestões de melhoria.

Há provavelmente um engano na apresentação, quando se refere a escolhas possíveis entre bombas de parafusos, engrenagens internas, palhetas e pistões. No exemplo aqui apresentado [nota: teste feito pelo especialista, não apresentado neste apêndice] a bomba selecionada foi de engrenagens externas.

Por que 30 lpm é considerada uma grande vazão? Não seria acima de 50 lpm, ou mesmo 100 lpm? Qual o critério usado para considerar Δp acima de 300 bar como grande diferença?

Não se poderia diversificar mais os critérios de escolha, além dos critérios de intensidade de uso, pressão, vazão e nível de contaminação (por exemplo: nível de ruído, ambiente onde o sistema deverá ser instalado e utilizado, temperatura ambiente, se se trata de equipamento móvel ou estacionário...)?

Para a realização de uma avaliação mais objetiva, pedimos que defina notas, de acordo com a classificação mostrada, para cada um dos critérios listados a seguir.

Opinião	Concorda completamente	Concorda	Aceita	Discorda	Discorda completamente
Nota					

Critério	Nota
1 - Claro entendimento das entradas qualitativas	
2 - Claro entendimento das entradas quantitativas	
3 - Fluxo de informação adequado	
4 - Adequada explicação das saídas	

Para cada critério que você discorda (que recebeu uma nota abaixo de 2), especifique por que ele não foi satisfeito e o que deveria ser feito para aprimorá-lo.

Creio que as opiniões textuais emitidas são mais significativas que o critério de notas, de modo que prefiro não usar esse expediente de avaliação.

Questionário 2

Nome: Fernando Luiz Furst
 Título: Engenheiro Mecânico Msc
 Organização:
 E-mail:

1. Analise os seguintes pontos:

a. Perguntas do programa: definições, ajuda das questões, faixas de valores nas questões quantitativas etc.

Diferença de pressões é um termo usado para indicar o Δp de uma válvula, bloco etc. o termo mais adequado seria a variação de pressão do sistema;

Entendo que as faixas de valores mencionados para a variação da pressão e da vazão estão baseadas em alguma aplicação (você poderia mencionar). Por exemplo, classe de pressão na faixa de 300 bar é considerada especial para a indústria metalúrgica e variações de pressões (max e min) não chegam a 50 bar na maioria das vezes. Já vazões de 31 l/min são vazões bem baixas. O sistema considera uma unidade a mais do que 30 l/min uma alta vazão.

Quando pergunta qual o novo valor de vazão, o programa limita em 150 l/min. Esta vazão não é uma vazão grande.

b. Resultados do sistema especialista: as escolhas são satisfatórias? São completas, claras, relevantes? As razões de escolha são adequadas? Outras considerações pertinentes.

As escolhas são satisfatórias, relevantes e os critérios para escolha são adequados porém alguns testes geraram dúvidas.

Teste	1	2	3	4	5
Grande variação de pressão [bar]	> 300	> 300	> 300	> 300	> 300
Grande vazão [lpm]	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30
Tipo de ciclo	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Tempo de parada	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Pressão média [bar]	450	250	700	700	700
Pressão máxima [bar]	700	700	700	700	700
Pressão mínima [bar]	100	100	500	500	500
Vazão máxima [lpm]	20	20	20	31	30
Nível de Contaminação	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)
Bomba	Radial variável	Radial variável	Radial variável	Radial fixa	Radial variável

Teste	6	7	8	9	10
Grande variação de pressão [bar]	50	70	70	50	40
Grande vazão [lpm]	150	150	150	150	150
Tipo de ciclo	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Tempo de parada	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Pressão média [bar]	100	100	100	100	100
Pressão máxima [bar]	120	120	120	120	120
Pressão mínima [bar]	70	50	50	70	80
Vazão máxima [lpm]	150	150	300	300	150
Nível de Contaminação	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)	Médio (entre 10 e 25 μ m)
Bomba	Palheta Variável + Acumulador	Palheta variável + Acumulador	?	Parafuso + Acumulador	Palheta variável

Testes 1 a 5: são testes de consistência com dados extremos. No teste 1, eu não conheço bomba radial variável. Existe? A vazão fornecida é menor que a estipulada na segunda pergunta (> 30 l/min).

Teste 2: pressão média menor que a variação de pressão. É possível?

Teste 3: o sistema aceitou uma variação de pressão (p_{max} e p_{min}) menor que a estipulado no início.

Testes 4 e 5: por apenas 1 l/min eu mudo de bomba variável para bomba fixa.

Testes 6 a 10 são testes próximos a uma realidade. Novamente no teste 8 e 9 o sistema aceitou uma vazão diferente à estipulada anteriormente. O sistema permite estipular no máximo 150 l/min. Entrei com o valor de 300 l/min e o sistema aceitou.

Teste 8: o sistema apresenta a seguinte solução:

“Nenhuma bomba foi escolhida porque não há bomba capaz de fornecer 300 l/pm em uma pressão de 100 bar (pressão de operação do sistema)”.

Mas no teste 9 ele consegue selecionar uma bomba para os mesmos parâmetros com exceção da variação de pressão, que é usado como critério para seleção de variável ou fixa. Existem bombas que atendam a estes parâmetros e não seria a de parafuso.

Teste 9 - o sistema apresenta a seguinte solução:

“A bomba de parafusos é a única capaz de fornecer 300 lpm a 100 bar (requisitos do sistema)”.

Não conheço uma bomba de parafuso que dê a pressão de 100 bar. Chamo atenção para as expressões que foram usadas tanto para seleção do teste 8 como para o teste 9 (“...porque não há bomba capaz de fornecer...” ou “...é a única capaz de fornecer...”). São expressões fortes que além de não dizer a verdade põe em dúvida a credibilidade do sistema. Melhor dizer que o sistema ainda não está capacitado (está em fase de desenvolvimento) para selecionar uma bomba para tais parâmetros.

c. Aparência e informações das saídas do programa: o arquivo resultados.html é adequadamente rico em informações? É bem formatado? Que outras informações poderiam ser acrescentadas? Outras considerações pertinentes.

A apresentação do programa é adequada e bem apresentada. Talvez mais tarde você possa implementar sites de fornecedores com catálogo eletrônico.

2. Quais as aplicações práticas, para você ou para a sua organização, que você imaginaria para este sistema especialista?

As aplicações são as mais diversas podendo o programa selecionar bombas para novas instalações como também corrigir e melhorar os atuais. Com a inclusão de preços de componentes ajudaria a compor custos mais precisos e mais rápidos que os sistemas convencionais ainda dentro da fase de projeto conceitual.

3. Caso ocorra algum erro durante a execução do sistema especialista, informar qual o erro existente e os dados inseridos que levaram a esse erro.

4. Comentários gerais sobre o programa, e outras sugestões de melhoria.

A elaboração de um programa para seleção de bombas, embora possa parecer simples, não é uma tarefa muito fácil. Talvez pela própria simplicidade das perguntas que são apresentadas tem-se a falsa impressão de ser procedural e na verdade cada informação depende uma da outra fechando uma teia.

Para a realização de uma avaliação mais objetiva, pedimos que defina notas, de acordo com a classificação mostrada, para cada um dos critérios listados a seguir.

Opinião	Concorda completamente	Concorda	Aceita	Discorda	Discorda completamente
Nota	4	3	2	1	0

Critério	Nota
1- Claro entendimento das entradas qualitativas	2
2- Claro entendimento das entradas quantitativas	2
3 – Fluxo de informação adequado	3
4 - Adequada explicação das saídas	3

Para cada critério que você discorda (que recebeu uma nota abaixo de 2), especifique por que ele não foi satisfeito e o que deveria ser feito para aprimorá-lo.