

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Ciências Exatas e da Terra
Departamento de Informática e Matemática Aplicada
Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação**

**Sistema Especialista Fuzzy para Dimensionamento de
Bombeio Mecânico**

Cássio Higino de Freitas

**Natal/RN
Fevereiro de 2010**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Ciências Exatas e da Terra
Departamento de Informática e Matemática Aplicada
Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação**

Sistema Especialista Fuzzy para Dimensionamento de Bombeio Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação do Departamento de Informática e Matemática Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas e Computação.

**Autor: Cássio Higino de Freitas
Orientador: Prof. Dr. Jair Cavalcanti Leite**

**Natal/RN
Fevereiro de 2010**

"Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes."

Isaac Newton.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e misericórdia, pelas oportunidades colocadas na minha vida e pelo consolo em meio às dificuldades do caminho.

Agradeço aos meus queridos pais Alberto de Freitas e Nilza Higino, meus grandes incentivadores ao longo de toda a minha vida e que nunca mediram dificuldades para me ajudar nos meus objetivos. Também gostaria de agradecer aos meus irmãos André e Luís, grandes companheiros desde sempre e que formam comigo esta maravilhosa família.

Meus agradecimentos ao meu orientador, Dr. Jair Leite. Primeiramente, pela oportunidade que me deu de vir fazer mestrado na UFRN com um projeto interessante e gratificante. Também pelo zelo e atenção com o qual acompanhou a evolução deste trabalho que, sem dúvida, foram decisivos para o sucesso alcançado.

Gostaria de agradecer a todos os integrantes do projeto de desenvolvimento e pesquisa no qual este trabalho estava inserido. Gostaria de agradecer primeiramente a Felipe e Lirisnei, que foram primordiais para que conseguíssemos desenvolver o sistema especialista. Também gostaria de agradecer a todos os outros membros da equipe: Everton, Renato, Gabriel e Eiji, que me ajudaram muito com o aprendizado de bombeio mecânico e também contribuíram para a conclusão do sistema desenvolvido.

Gostaria de agradecer aos engenheiros Rutácio Costa e Benno Assmann, da Petrobras S/A UN-RNCE, que foram os especialistas consultados no processo de engenharia de domínio da aplicação. Obrigado pela atenção e disponibilidade ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço ao pessoal do mestrado e da graduação, com quem tive momentos muito alegres e que sempre foram muito prestativos nas horas de estudo e na superação das dificuldades. A Alessandro, Alisson, Anchieta, Anderson, André Gustavo, Arinaldo, Bruno, Cleverton, Íria, Isaac, Plácido, Matheus, Minora, Naiara, Natal, Stephenson e Valmir, meus mais sinceros agradecimentos.

Agradeço aos funcionários do DIMAp: Seu Gaspar, Dona Fátima, Carlos Markennedy, Rafael e Vamberto, sempre dedicados e solícitos.

Agradeço a ANP (Agência Nacional de Petróleo) pelo apoio financeiro, imprescindível para que eu pudesse me dedicar integralmente ao mestrado. Gostaria de agradecer também a Helenice e Sonia, do PRH-22, que estavam disponíveis para ajudar.

Resumo

Apesar do surgimento de outras técnicas de elevação artificial de petróleo, sistemas de bombeio mecânico mantém-se hegemônicos devido à sua flexibilidade de atuação e custo menor de investimento se comparada com outras técnicas de elevação desenvolvidas. Um dimensionamento de bombeio mecânico bem sucedido necessariamente passa pelo atendimento da vazão prevista e pelo desgaste controlado dos equipamentos de bombeio utilizados na configuração montada. Entretanto, a conciliação destes elementos mostra-se particularmente desafiadora, sobretudo para a maioria dos projetistas que lidam com este trabalho, que não possuem ainda a experiência necessária para chegar a bons projetos de bombeio em tempo hábil. Mesmo com a existência de diversos aplicativos computacionais no mercado com o objetivo de facilitar esta tarefa, eles precisam enfrentar um exaustivo processo de tentativa e erro até chegar a combinação mais adequada de equipamentos para instalação no poço. A proposta do presente trabalho consiste em desenvolver um sistema especialista no dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico. Ele tem a missão de guiar um engenheiro de petróleo na tarefa de selecionar um conjunto de equipamentos apropriados ao contexto provido pelas características do óleo que será produzido. Características como o nível de separação do gás, presença de elementos corrosivos, possibilidade de produção de areia e de parafinação são levados em consideração na escolha da bomba de fundo, coluna de hastes e unidade de bombeio, bem como as características de operação dos mesmos. Ele é capaz de aproximar seu processo de inferência da forma do raciocínio humano, o que gera resultados mais próximos daqueles obtidos por um especialista. Para tanto, suas regras de produção foram elaboradas com base na teoria dos conjuntos *fuzzy*, capazes de modelar conceitos imprecisos tipicamente presentes no raciocínio humano. Os cálculos dos parâmetros operacionais do sistema de bombeio são feitos por meio do método API RP 11L. Com base em informações de entrada, o sistema é capaz de retornar ao usuário um conjunto de configurações de bombeio mecânico que atendam uma determinada vazão de projeto, porém sem submeter os equipamentos selecionados a um esforço além daquele que possam suportar.

Palavras-chave: Bombeio mecânico, dimensionamento, sistemas especialistas *fuzzy*.

Abstract

Despite the emergence of other forms of artificial lift, sucker rod pumping systems remains hegemonic because of its flexibility of operation and lower investment cost compared to other lifting techniques developed. A successful rod pumping sizing necessarily passes through the supply of estimated flow and the controlled wear of pumping equipment used in the mounted configuration. However, the mediation of these elements is particularly challenging, especially for most designers dealing with this work, which still lack the experience needed to get good projects pumping in time. Even with the existence of various computer applications on the market in order to facilitate this task, they must face a grueling process of trial and error until you get the most appropriate combination of equipment for installation in the well. This thesis proposes the creation of an expert system in the design of sucker rod pumping systems. Its mission is to guide a petroleum engineer in the task of selecting a range of equipment appropriate to the context provided by the characteristics of the oil that will be raised to the surface. Features such as the level of gas separation, presence of corrosive elements, possibility of production of sand and waxing are taken into account in selecting the pumping unit, sucker-rod strings and subsurface pump and their operation mode. It is able to approximate the inferente process in the way of human reasoning, which leads to results closer to those obtained by a specialist. For this, their production rules were based on the theory of fuzzy sets, able to model vague concepts typically present in human reasoning. The calculations of operating parameters of the pumping system are made by the API RP 11L method. Based on information input, the system is able to return to the user a set of pumping configurations that meet a given design flow, but without subjecting the selected equipment to an effort beyond that which can bear.

Key words: Sucker-rod pumping, pumping system design, fuzzy expert systems.

Sumário

Lista de Figuras	p. ix
Lista de Tabelas	p. xii
1 Introdução	p. 1
2 Dimensionamento de Sistemas de Bombeio Mecânico	p. 5
2.1 Componentes do Sistema de Bombeio Mecânico	p. 5
2.1.1 Bomba de Fundo	p. 7
2.1.2 Coluna de Hastes	p. 11
2.1.3 Unidade de Bombeio	p. 13
2.2 Projeto de Bombeio Mecânico	p. 17
2.2.1 Questões de Projeto	p. 21
2.2.2 Métodos de Dimensionamento	p. 23
2.3 Norma API RP 11L para Dimensionamento de Bombeio Mecânico . . .	p. 24
2.4 Cálculo da Vazão obtida pelo Sistema de Bombeio Mecânico	p. 35
2.5 Cálculo das Tensões na Coluna de Hastes	p. 38
2.6 Software para Dimensionamento de Bombeio Mecânico	p. 39
3 Sistemas Especialistas Fuzzy	p. 41
3.1 Conjuntos Fuzzy	p. 41
3.2 Operações sobre conjuntos fuzzy	p. 44

3.3	Inferência Fuzzy	p. 45
3.4	Defuzzificação	p. 46
4	Trabalhos Relacionados	p. 50
4.1	Aplicação de Inteligência Artificial para Detecção de Falhas de Bombeio Mecânico	p. 50
4.2	Aplicação de Inteligência Artificial para Dimensionamento de Bombeio Mecânico	p. 51
4.3	Sistema Especialista para Dimensionamento de Bombeio de Cavidades Progressivas	p. 52
5	Sistema Especialista para Dimensionamento de Sistemas de Bombeio Mecânico	p. 54
5.1	Concepção do Sistema	p. 55
5.1.1	Valores de Entrada	p. 56
5.1.2	Criação de Configurações de Bombeio	p. 56
5.1.3	Etapas do Projeto	p. 57
5.2	Processo de Inferência	p. 59
5.2.1	Classificação da bomba de fundo	p. 61
5.2.2	Classificação da coluna de hastes	p. 64
5.2.3	Classificação da unidade de bombeio	p. 68
5.2.3.1	Classificação da Exigência do Redutor	p. 68
5.2.3.2	Classificação da Exigência da Estrutura	p. 71
5.2.3.3	Regras de Inferência para Informações da Unidade de Bombeio Consolidadas	p. 74
5.2.4	Classificação do Sistema de Bombeio	p. 74
5.3	Discussão sobre o Sistema de Inferência	p. 77

6	Descrição do Sistema	p. 79
6.1	Ambiente SLR	p. 79
6.2	Módulo de Cálculos de Dimensionamento	p. 80
6.3	Módulo <i>Fuzzy</i>	p. 82
6.4	Módulo Especialista em Dimensionamento de Bombeio Mecânico . . .	p. 84
7	Validação do Sistema Especialista	p. 87
7.1	Verificação e Validação de Software	p. 87
7.2	Validação do Sistema Especialista	p. 88
7.2.1	Validação dos Cálculos dos Parâmetros Operacionais	p. 89
7.2.2	Verificação da Implementação do Sistema Especialista	p. 91
7.2.3	Validação das Configurações Geradas	p. 92
8	Conclusão	p. 94
8.1	Limitações do Trabalho Realizado	p. 95
8.2	Trabalhos Futuros	p. 96
	Referências	p. 97
	Apêndice A - Entrevista para Validação	p. 99
A.1	Introdução	p. 99
A.2	Processo de Validação	p. 99
A.2.1	Avaliação das Configurações de BM do Sistema Especialista . .	p. 100
A.2.2	Observação de Configurações de BM geradas por Engenheiros .	p. 105

Lista de Figuras

1	Sistema de Bombeio Mecânico. Adaptado de [TAKÁCS, 1993].	p. 7
2	Ciclo de Bombeio. Adaptado de [TAKÁCS, 1993].	p. 8
3	Tipos de bomba de fundo: tubulares (a) e insertáveis (b). Adaptado de [TAKÁCS, 1993].	p. 10
4	Elementos de uma Unidade de Bombeio. Adaptado de [TAKÁCS, 1993].	p. 14
5	Geometria da unidade de bombeio convencional. Extraído de [TAKÁCS, 1993]	p. 16
6	Geometria da unidade de bombeio balanceada a ar. Extraído de [TAKÁCS, 1993]	p. 17
7	Geometria da unidade de bombeio Mark II. Extraído de [TAKÁCS, 1993]	p. 18
8	Gráfico mostrando o aumento de frequência natural de hastes heterogêneas. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 27
9	Correlação curso do pistão. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 30
10	Correlação carga máxima na haste polida. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 32
11	Correlação carga mínima na haste polida. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 32
12	Correlação potência na haste polida. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 33
13	Correlação torque no redutor. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 34
14	Correlação fator de ajuste de torque. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].	p. 34

15	Exemplos de gráficos que podem ser utilizados para modelar conjuntos <i>fuzzy</i>	p. 43
16	Exemplos de Corte e Escala em Conjuntos de Saída <i>Fuzzy</i> . Extraído de [NEGNEVITSKY, 2005]	p. 46
17	Exemplos de conjuntos <i>singleton</i> utilizados na saída das regras de inferência. Extraído de [NEGNEVITSKY, 2005]	p. 46
18	Exemplo de defuzzificação usando COG. Extraído de [NEGNEVITSKY, 2005]	p. 48
19	Diagrama de atividades mostrando a seqüência de ações realizadas pelo sistema especialista	p. 60
20	Funções de fuzzificação da variável “Eficiência Volumétrica”	p. 62
21	Funções de fuzzificação da variável “Nível de Atendimento de Vazão”	p. 63
22	Funções de fuzzificação da variável “Grau de Utilização da Coluna Hastes”	p. 65
23	Funções de fuzzificação da variável “Custo da Coluna de Hastes”	p. 66
24	Gráfico da Função de Pertinência do <i>Peak Torque</i> aos seus respectivos conjuntos.	p. 69
25	Gráfico da Função de Pertinência da Frequência de Bombeio aos seus respectivos conjuntos.	p. 70
26	Gráfico da Função de Pertinência da carga máxima da Unidade de Bombeio aos seus respectivos conjuntos.	p. 72
27	Gráfico da Função de Pertinência da carga mínima da Unidade de Bombeio aos seus respectivos conjuntos.	p. 73
28	Gráfico da Função de Pertinência dos conjuntos de saída do processo de inferência.	p. 77
29	Arquitetura do Ambiente SLR	p. 80
30	Classes do Módulo de Cálculos de Dimensionamento	p. 82
31	Classes do Módulo <i>Fuzzy</i>	p. 83

32	Diagrama de Seqüência do Módulo Especialista	p. 85
33	Exemplo de Dimensionamento Realizado pelo Sistema Especialista . .	p. 86
34	Exemplo de Dimensionamento Realizado pelo Sistema Especialista . .	p. 86

Lista de Tabelas

1	Dados das hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1988]	p. 12
2	Diâmetro das luvas das hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1998]	p. 12
3	Composição Química das Colunas de Hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1998]	p. 13
4	Propriedades Mecânicas dos tipos de hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1998]	p. 13
5	Exemplo de Dados de Entrada de Poço para Dimensionamento	p. 21
6	Exemplo de Dimensionamento de Bombeio Mecânico Inválido	p. 22
7	Exemplo de Dimensionamento de Bombeio Mecânico Válido	p. 23
8	Dados de Coluna de Produção. Adaptada de [American Petroleum Institute, 1998]	p. 30
9	Regras de Inferência para classificação da Bomba de Fundo	p. 63
10	Exemplo de classificação da Bomba de Fundo	p. 64
11	Custo relativo de hastes de bombeio por material	p. 66
12	Regras de Inferência para classificação da Coluna de Hastes	p. 67
13	Exemplo de classificação da Coluna de Hastes	p. 67
14	Relação Profundidade do Poço <i>versus</i> Heterogeneidade da Coluna de Hastes	p. 68
15	Regras de Inferência para classificação da solicitação do Redutor	p. 70
16	Exemplo de classificação da solicitação do Redutor	p. 71
17	Regras de Inferência para classificação da exigência da estrutura	p. 73

18	Regras de Inferência para classificação da exigência da estrutura	p. 74
19	Regras de Inferência para classificação da Unidade de Bombeio	p. 74
20	Regras de Inferência para classificação da configuração (1)	p. 75
21	Regras de Inferência para classificação da configuração (2)	p. 75
22	Regras de Inferência para classificação da configuração (3)	p. 75
23	Dados de Teste para Validação dos Cálculos de Dimensionamento	p. 90
24	Comparação dos Resultados obtidos da Execução dos Cálculos de Dimensionamento	p. 90

1 Introdução

Sistemas de Bombeio Mecânico (BM) têm sido usados para produção de poços terrestres desde o nascimento da indústria petrolífera. Mesmo com o surgimento de outras técnicas de elevação artificial, como o bombeio de cavidades progressivas (BCP), bombeio centrífugo submerso (BCS) e *gas-lift*, seu uso ainda é majoritário nos campos de produção do Brasil, onde está presente em 71% dos campos de produção [COSTA, 2005]. Isso ocorre devido ao seu custo relativamente menor de investimento e manutenção, flexibilidade para trabalhar com diferentes vazões e profundidades, alta eficiência energética, possibilidade de operação com fluidos de diferentes composições e viscosidades e largas faixas de temperatura. Apesar destas características, ele possui também algumas desvantagens, o que motiva o uso de outras técnicas de elevação em determinados contextos. As principais são o desgaste rápido das partes móveis quando ocorre produção de areia, a redução da eficiência volumétrica quando da presença de gás na bomba e o atrito das hastes com a coluna de produção em poços desviados.

O sucesso da operação de elevação de óleo depende diretamente do dimensionamento do sistema. Nesta tarefa, são escolhidos os equipamentos de superfície e de fundo a serem instalados no poço para produção, além da seleção do modo de operação dos equipamentos e do cálculo dos parâmetros operacionais relativos à dinâmica de funcionamento dos mesmos. A determinação precisa destas condições de operação é de suma importância no projeto de novas instalações e também na análise de instalações existentes. Neste processo, visa-se a utilização adequada do bombeio mecânico maximizando a produção e a durabilidade dos equipamentos e minimizando os custos de instalação dos equipamentos e a intervenção no poço para manutenção.

A seleção dos equipamentos de bombeio e do seu modo de operação dependem diretamente do contexto oferecido pelo poço a ser produzido. As características do fluido, as possibilidades de produção de areia ou parafinação, e a vazão esperada devem ser levados em consideração no dimensionamento do sistema. A necessidade de atender a estas condições faz com que esta tarefa torne-se complexa e passível de um longo processo de tentativa e erro na busca pelos equipamentos e modo de configuração mais adequados.

Engenheiros mais experientes conseguem chegar mais rapidamente a configurações de sistema adequadas. Entretanto, tais especialistas não são facilmente encontrados e para a grande maioria daqueles que precisam lidar com esta tarefa o custo de fazer um projeto de bombeio pode ser muito mais elevado e contraproducente. Um dos problemas mais recorrentes do dimensionamento inadequado é a quebra de algum dos equipamentos, que pode ser em decorrência de uma carga além daquela suportada pela unidade de bombeio, um torque elevado no seu redutor ou mesmo uma tensão acima da admissível na coluna de hastes. A interrupção inesperada do funcionamento acarreta em prejuízo na produção, além do gasto, por vezes elevado, com a troca do equipamento danificado.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema especialista no dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico. Tal artefato tem a capacidade de criar configurações de bombeio a partir dos dados de reservatório e da vazão de projeto determinada pelo usuário. O sistema escolhe um determinado equipamento (unidade de bombeio, coluna de hastes e bomba de fundo) em detrimento de outros a partir do conhecimento do domínio obtido junto a um especialista na tarefa de dimensionamento. As configurações geradas são capazes de atender à demanda de produção estipulada, ao mesmo tempo em que reduzem as chances de desgaste do equipamento por conta das forças atuantes em todo o sistema.

A obtenção do conhecimento junto a especialistas foi de fundamental importância para o sucesso do projeto, já que a partir dele pôde-se identificar quais os elementos de bombeio considerados de maior importância por engenheiros durante o processo de dimensionamento. Por ser um sistema especialista, existe a tendência da solução apresentada se posicionar da mesma forma que os especialistas consultados atuam cotidianamente. Tais especialistas lidam com aspectos intrínsecos ao reservatório e ao terreno em que os poços estão localizados, o que conseqüentemente torna a solução especialista obtida repleta de configurações regionais. O que soa como uma limitação num primeiro momento se mostra uma vantagem competitiva, já que o sistema especialista se mostrará o mais adequado para aquele meio de atuação, diferentemente de alguma solução genérica.

As regras utilizadas no processo de inferência foram modeladas utilizando lógica *fuzzy*. Tal escolha, em detrimento da lógica clássica, deu-se por ela ser mais adequada para representar a estrutura do raciocínio humano, inerentemente imprecisa e ambígua. O uso de tal abordagem facilitou significativamente o processo de modelagem das regras incorporadas à base de conhecimento do sistema devido a tais características. Tais regras foram descritas em um arquivo de configuração separado do código fonte da aplicação numa linguagem intuitiva para um conhecedor de lógica *fuzzy*. Isso facilita o trabalho de modificação das mesmas por parte de um especialista, que pode definir um conjunto de

regras de acordo com sua forma de atuação cotidiana, conseqüentemente direcionando as modificações para que trabalhem adequadamente em sua região de atuação . Além disso, o aplicativo resultante da especificação aproveita a estrutura ofertada por um ambiente corporativo para acessar uma base de dados via *web service*. Nesta base, ele consegue ter acesso a informações de poços de uma empresa do ramo petrolífero, que podem ser manipulados diretamente dentro do aplicativo.

O sistema desenvolvido a partir das regras de inferência modeladas foi submetido a um processo de validação, com o qual pôde-se checar se o sistema realmente realiza a tarefa que os usuários esperam que ele realize. Os cálculos dos parâmetros operacionais foram implementados seguindo o método de dimensionamento elaborado pelo *American Petroleum Institute*, originalmente relatado no documento que ficou conhecido como Norma API RP-11L. Tais cálculos foram validados a partir do uso de um sistema de dimensionamento existente, o API-97, que foi usado como oráculo em testes de caixa preta. Ele é largamente utilizado para dimensionar sistemas de bombeio mecânico em uma empresa do ramo petrolífero, e o contexto de sua utilização motivou o desenvolvimento do sistema especialista fruto deste trabalho.

O principal interesse na concepção de um novo sistema para dimensionamento de bombeio mecânico é que ele ofereça vantagens em relação às abordagens já existentes. Além da já esperada correção na execução dos cálculos de parâmetros operacionais, espera-se que o sistema gere configurações corretas de dimensionamento. Para isso, elas deverão corresponder a configurações que especialistas determinariam para o bombeio mecânico baseado no contexto de produção a que a mesma seria submetida. Elas também deverão ser geradas em um tempo menor e com menos esforço que um engenheiro de petróleo necessitaria para realizar esta tarefa por meio do processo convencional de dimensionamento. Os resultados da avaliação destas questões também são apresentados neste trabalho.

A aptidão do sistema para a geração de configurações de bombeio adequadas foi averiguada a partir de um processo de verificação e validação. Ele consistiu de diversas etapas, que foram desde a validação dos cálculos de dimensionamento realizados, passando pela verificação do processamento das regras de inferência até chegar na definição de um processo de aprimoramento contínuo do motor de inferência do sistema especialista. Esta etapa teve o objetivo de contribuir para a aceitação do sistema e validá-lo como um artefato de confiança na geração de configurações de bombeio mecânico.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no capítulo 2, são descritos os equipamentos utilizados no bombeio mecânico de petróleo e a técnica utilizada para a realização de seu projeto. No capítulo 3, é tratado de sistemas especialistas *fuzzy*, metodolo-

gia adotada para a modelagem do sistema aqui proposto. No capítulo 4, são descritos trabalhos diretamente relacionados com este, além da menção a outros trabalhos que propuseram métodos inteligentes para o dimensionamento de bombeio mecânico. No capítulo 5, é descrita a proposta deste trabalho e as decisões tomadas na sua elaboração. No capítulo 6, é descrito o sistema computacional implementado a partir da especificação proposta. No capítulo 7, são tratados os elementos considerados na validação do sistema e na sua aceitação por parte do público alvo. No capítulo 8, são apresentadas conclusões sobre o trabalho realizado.

2 Dimensionamento de Sistemas de Bombeio Mecânico

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos relacionados à técnica de bombeio mecânico, bem como a metodologia para o desenvolvimento de projetos de exploração por meio dela. É primordial ter conhecimento do domínio da aplicação a ser desenvolvida e dos elementos que serão tratados pela solução a ser proposta. Não é objetivo deste trabalho expandir o conhecimento existente sobre bombeio mecânico. Dessa forma, o conteúdo tratado neste capítulo é tão somente para dar ciência ao leitor do domínio abordado por este trabalho.

O método de elevação mais econômico é a produção por surgência, no qual a própria pressão do fluido no fundo do poço é suficiente para que ele seja elevado até a superfície. Porém, muitas vezes não há pressão suficiente para fazer a elevação por surgência ou esta é reduzida à medida que o óleo é extraído [COSTA, 2005]. Nestas condições, é preciso fazer uso de métodos de elevação artificial, que fornecerão a energia adicional para que o fluido possa ser retirado do reservatório. Dentre os métodos existentes, o mais utilizado é o bombeio mecânico, cuja utilização é feita desde o nascimento da indústria petrolífera [ECONOMIDES; HILL; EHLIG-ECONOMIDES, 1993]. Outros métodos de elevação que costumam ser utilizados são o bombeio de cavidades progressivas (BCP), bombeio hidráulico (BH), bombeio centrífugo submerso (BCS) e *gas-lift*. Porém, a discussão de tais métodos foge do escopo deste trabalho.

2.1 Componentes do Sistema de Bombeio Mecânico

Cada um dos componentes de um sistema de bombeio mecânico pode ser dividido em dois grupos principais: equipamentos de superfície e de subsuperfície [TAKÁCS, 1993]. Os equipamentos de superfície incluem:

- O *motor* gerador do movimento, que oferece a potência necessária para o sistema. Pode ser elétrico ou movido a combustível.
- A *unidade de bombeio*, uma ligação mecânica que transforma o movimento de rotação do redutor em movimento alternado necessário para operar a bomba de fundo. Seu principal elemento é a viga principal, que trabalha sobre o princípio de uma alavanca mecânica. Um outro elemento importante da unidade de bombeio é o redutor, que reduz as altas velocidades de rotação do motor para a velocidade de bombeamento requerida ao mesmo tempo em que aumenta o torque em seu eixo nas velocidades mais baixas.
- A *haste polida*, que conecta a viga principal à coluna de hastes e garante a selagem de superfície na cabeça do poço, mantando o fluido dentro do poço.
- A *cabeça do poço*, que contém uma caixa selada que sela a haste polida e um canal de bombeamento para conduzir o fluido do poço pela tubulação de recolhimento. Normalmente, o anular do revestimento é conectado, através de uma válvula, à esta tubulação.
- O *Tê-de-fluxo*, que é um tubo com uma bifurcação, que permite bombear ou produzir qualquer fluido pela sua derivação. Ele faz a conexão da linha de produção ao poço.
- O *Stuffing box*, que é um sistema de engaxetamento que faz a vedação do poço na passagem da haste polida.

Os equipamentos de subsuperfície são:

- A *coluna de hastes*, composta por hastes de diferentes diâmetros, trabalha dentro da coluna de produção do poço. A coluna de hastes provê a ligação mecânica entre o elemento de superfície e a bomba de fundo.
- O *pistão da bomba de fundo*, que é a parte motora de uma bomba de fundo típica, é diretamente conectada à coluna de hastes. Ela abriga uma válvula esfera, denominada *válvula de passeio*, que durante o movimento descendente do pistão eleva o fluido obtido para a coluna de produção.
- A *camisa da bomba de fundo*, ou *cilindro*, que é a parte estacionária da bomba de fundo. Outra válvula esfera, a válvula de pé, é fixada na base deste compartimento. Ela atua como uma válvula de sucção para a bomba, através da qual o fluido do poço entra na bomba durante o ciclo ascendente.

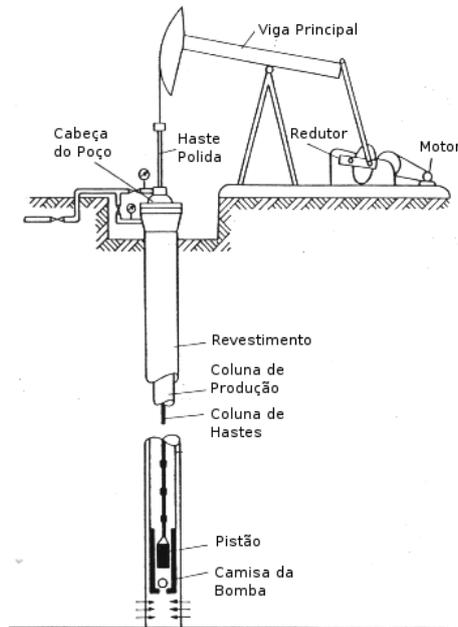


Figura 1: Sistema de Bombeio Mecânico. Adaptado de [TAKÁCS, 1993].

A Figura 1 mostra um sistema de bombeio mecânico completo.

2.1.1 Bomba de Fundo

As bombas de fundo utilizadas no bombeio mecânico trabalham sobre o princípio do deslocamento positivo e são do tipo cilindro-e-pistão. Suas partes componentes básicas são a camisa, o pistão e duas válvulas esfera. A válvula fixada na camisa atua como uma válvula de sucção e é chamada de válvula de pé. A outra válvula, contida no pistão, atua como uma válvula de descarga e é denominada válvula de passeio. Elas operam como *check valves* e a abertura e fechamento de ambas durante o movimento alternativo do pistão provêm uma maneira de deslocar o fluido até a superfície [TAKÁCS, 1993]. Para simplificar a descrição, assume-se que o fluido bombeado seja incompressível.

No início do ciclo ascendente, depois que o pistão atingiu sua posição mais baixa, a válvula de passeio fecha devido à alta pressão hidrostática na coluna acima dela. O líquido contido nesta tubulação acima da válvula de passeio é elevado até a superfície durante o movimento de subida do pistão. Ao mesmo tempo, a pressão no espaço entre as válvulas de passeio e de pé cai, causando a abertura da válvula de pé. A pressão no poço conduz o líquido da formação rochosa para a camisa, logo abaixo do pistão, através da válvula aberta. A elevação da coluna de líquido e o preenchimento da camisa com líquido da formação continuam até o fim do ciclo ascendente. É importante notar que

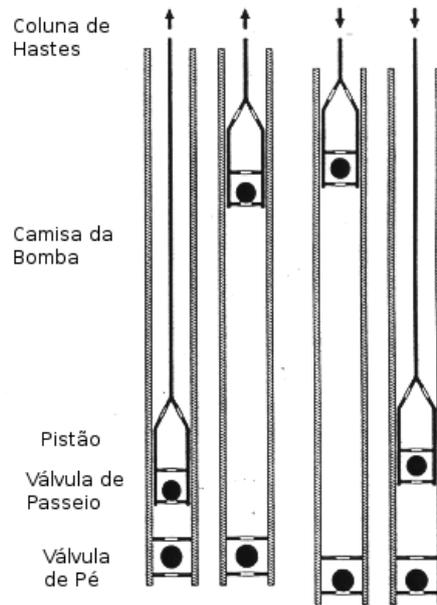


Figura 2: Ciclo de Bombeio. Adaptado de [TAKÁCS, 1993].

durante todo o ciclo ascendente, toda a carga da coluna de líquido é deslocada pelo pistão e pela coluna de hastes conectada a ela. A elevada força exercida pelo fluido faz com que a coluna de hastes alongue devido à sua natureza elástica.

Depois que o pistão alcança sua posição mais elevada, a coluna de hastes começa a descer. O ciclo descendente começa, a válvula de passeio imediatamente abre e a válvula de pé fecha. Esta operação das válvulas acontece devido à incompressibilidade do líquido contido na camisa. Quando a válvula de passeio abre, o peso do líquido é transferido do pistão para a válvula de pé, causando o alongamento da coluna de produção. Durante o ciclo descendente, o pistão desce com a válvula de passeio aberta dentro da camisa preenchida com líquido obtido da formação. Ao final do ciclo descendente, o sentido do movimento da coluna de hastes é novamente trocado e outro ciclo de bombeamento começa. A carga de líquido é novamente transferida para o pistão, causando o alongamento da coluna de hastes e o retorno da coluna de produção ao seu estado original. O ciclo descrito pode ser visto na Figura 2.

Se o fluido do poço contido na bomba de fundo contém algum gás livre no início do ciclo descendente, a válvula de passeio permanece fechada durante todo o tempo em que este gás esteja comprimido a uma pressão suficiente para conseguir vencer a pressão de líquido acima dele. Dessa forma, parte do curso do pistão deixa de ser aproveitado por conta do efeito da compressão do gás e conseqüentemente o deslocamento do fluido para a coluna de produção é reduzido também. Um problema similar ocorre no início do

ciclo ascendente, quando é bombeado fluido gaseificado. Logo antes do ciclo ascendente começar, a mistura de óleo e gás que ocupa o espaço entre as válvulas de passeio e de pé está sob efeito da pressão hidrostática do líquido contido na coluna de produção. Quando o pistão começa a subir com a válvula de passeio fechada, esta mistura sob alta pressão começa a se expandir, permitindo uma queda de pressão apenas gradual da pressão abaixo do pistão num momento em que se desejava uma mudança de pressão mais brusca. Este efeito atrasa a abertura da válvula de pé até que a pressão acima da válvula caia para um nível menor que pressão do fluido no poço. A fração deslocada pelo pistão durante este processo acaba por reduzir consideravelmente o tamanho do curso disponível para a bomba de fundo ser preenchida com líquido. Dessa forma, o curso efetivo do pistão é reduzido novamente.

As duas principais categorias de bombas de fundo são as bombas tubulares e as bombas insertáveis [COSTA, 2005]. A diferença básica entre elas está na maneira como seu compartimento externo é instalado no poço. A bomba tubular é aquela cujo cilindro é atrelado diretamente à coluna de produção. Ela é conectada à base da coluna e conduzida até a profundidade desejada junto com ela. Esta construção permite o uso de um diâmetro nominal da bomba um pouco menor que o diâmetro interno da coluna de produção. Sua principal desvantagem é que a manutenção da bomba somente pode ser feita através da remoção completa da coluna de produção. Os principais elementos de uma bomba tubular pode ser visto na Figura 3a. Abaixo da camisa da bomba de fundo, um niple de assentamento é montado no qual a válvula de pé fica previamente atrelada. Depois que a parte estacionária e a coluna de produção já estão no poço, o pistão juntamente com a válvula de passeio é colocada junto com a coluna de hastes. A válvula de pé é acoplada à base do pistão com um pescador durante a instalação. A válvula de pé está num nível mais baixo que o niple de assentamento, onde ele é travado mecanicamente ou com uso de copos de fricção. O pescador da válvula de pé é então desengatado e o pistão é levado à sua posição de trabalho. A remoção da válvula de pé também é possível com o pescador, o que elimina a necessidade de remover a coluna de produção para um eventual conserto da válvula de pé.

A bomba insertável, em contraste com a tubular, se constitui num equipamento completo de bombeamento que é conduzido para o poço pela coluna de hastes. Este equipamento contém a parte estacionária, o pistão e as válvulas de passeio e de pé. Somente o niple de assentamento deve ser descido ao poço junto com a coluna de produção até a profundidade desejada. Após isso, o artefato de bombeio é colocado junto com a coluna de hastes e uma âncora é usada para fixá-la. No caso da bomba insertável, a válvula de pé é uma parte do elemento estacionário da bomba. Os principais elementos de uma bomba

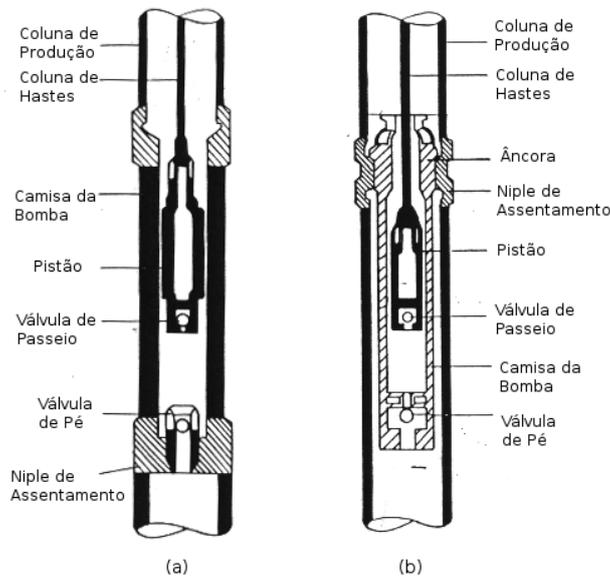


Figura 3: Tipos de bomba de fundo: tubulares (a) e insertáveis (b). Adaptado de [TAKÁCS, 1993].

insertável podem ser vistos na Figura 3b.

As âncoras são usadas para fixar a parte estacionária de uma bomba insertável à coluna de produção. A âncora é alocada no niple de assentamento previamente instalado na coluna de produção, onde é mecanicamente travada ou mantida por forças de fricção. A operação da bomba transmite forças verticais sobre o membro estacionário do artefato de bombeio; as forças então são diretamente transmitidas para a âncora. O mecanismo de ancoragem tem que suportar estas forças, impedindo a elongação da coluna. Esta elongação reduz o curso efetivo da bomba de fundo, interferindo diretamente na vazão bruta obtida pelo sistema.

A seleção do tipo de bomba de fundo mais apropriada para ser usada depende de diversos fatores. Como regra geral, bombas tubulares podem ser usadas para deslocar volumes maiores de líquido que as bombas insertáveis. A maior desvantagem das bombas tubulares é que toda a coluna de produção deve ser removida no caso da necessidade de manutenção na bomba de fundo. Outros diversos parâmetros operacionais como produção de gás, areia e elementos corrosivos também deveriam ser considerados na tomada desta decisão.

2.1.2 Coluna de Hastes

A coluna de hastes é a principal parte do sistema de bombeio mecânico, já que provê a ligação entre a unidade de bombeio de superfície e a bomba de fundo. Trata-se de uma peça peculiar, que não tem quase nenhuma analogia com outras estruturas feitas pelo homem, tendo milhares de pés de comprimento, ao mesmo tempo em que tem um diâmetro máximo de pouco mais que uma polegada. Seu comportamento tem um impacto fundamental sobre a eficiência da elevação do fluido e uma eventual falha deste pode conduzir a uma total perda da produção. Assim, uma coluna de haste projetada apropriadamente não somente garante boas condições operacionais mas também pode reduzir consideravelmente o custo total da produção.

A coluna de hastes é composta por hastes individuais que são concatenadas umas às outras até que a profundidade requerida seja alcançada. As primeiras instalações de bombeio mecânico usavam bastões de madeira que tinham as extremidades em aço para facilitar as junções das hastes. Com o aumento gradativo da profundidade dos poços e a necessidade de hastes mais vantajosas, as hastes totalmente em aço substituíram as anteriores no processo de produção. Tratam-se de barras sólidas de aço com as extremidades forjadas para acomodar encaixes macho e fêmea, um formato que permanece inalterado até os dias atuais. Outros tipos de hastes de aço além das sólidas foram desenvolvidas, como a haste oca, a haste contínua e a haste flexível.

As hastes de aço possuem algumas desvantagens. Elas são relativamente pesadas, o que aumenta a potência necessária para movimentar a bomba. Além disso, são altamente suscetíveis a corrosão na maioria das diferentes possíveis composições do fluido a ser produzido. Tais problemas podem ser contornados através do uso de hastes de plástico. A utilização de materiais plásticos reforçados com fibra de vidro reduz o peso total da haste e melhora a resistência aos efeitos da corrosão, o que tem contribuído para uma maior aceitação entre os utilizadores desse equipamento [TAKÁCS, 1993]. Porém, as hastes de aço sólidas são as mais largamente utilizadas e o escopo deste trabalho se aterá a este tipo de haste, devido à adoção da norma API RP 11L na elaboração do presente trabalho (ver seção 2.3).

As haste de aço sólidas têm sido padronizadas pela American Petroleum Institute desde 1926 através da norma API SPEC 11B [American Petroleum Institute, 1998]. Ela determina o comprimento de 25 ou 30 pés (7.6 ou 9.1 metros) para cada haste; o diâmetro deve estar compreendido na faixa entre 1/2 e 1 1/8 polegadas, com incrementos de 1/8 polegada. A construção usual das hastes é uma peça única que tem as extremidades com o formato necessário para a concatenação de peças. Há ainda uma versão de três peças,

Diâmetro	Peso no Ar	Constante Elástica
1/2	0.726	1.990×10^{-6}
5/8	1.135	1.270×10^{-6}
3/4	1.634	0.883×10^{-6}
7/8	2.224	0.649×10^{-6}
1	2.904	0.497×10^{-6}
1 1/8	3.676	0.393×10^{-6}
1 1/4	4.538	0.318×10^{-6}

Tabela 1: Dados das hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1988]

Diâmetro da Haste	Luva Normal	Luva Delgada
5/8	1.500	1.250
3/4	1.625	1.500
7/8	1.812	1.625
1	2.187	2.000
1 1/8	2.375	–

Tabela 2: Diâmetro das luvas das hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1998]

corpo mais as duas extremidades, que pode ser usada para pequenas profundidades. Outros dados importantes referentes à coluna de hastes foram especificados pela norma API RP 11L [American Petroleum Institute, 1988]. Nela são padronizados os diâmetros das seções transversais das hastes, a média de peso de cada haste e a constante elástica para os diferentes tamanhos de haste. Tais informações podem ser vistas na Tabela 1. Eles são de fundamental importância para o dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico (ver Seção 2.3). Outros dados importantes, determinados pela norma API SPEC 11B, são os diâmetros das luvas de encaixe das hastes. As luvas para hastes de até 1 polegada têm comprimento padronizado de 4 polegadas. O diâmetro externo da luva depende de seu diâmetro nominal e se a luva é normal ou delgada. Tais valores podem ser vistos na Tabela 2. As luvas delgadas possuem a vantagem de poderem ser descidas por colunas de produção de diâmetro menor, porém estão sujeitas a esforços mais severos devido à redução na área do aço [COSTA, 2005].

O material das hastes de aço normalmente tem mais de 90% de ferro em sua composição. Outros elementos são adicionados formando uma liga metálica para aumentar a resistência e a dureza, melhorar os efeitos do tratamento metalúrgico e combater a corrosão. As hastes podem ser classificadas em grau C, D ou K. A composição química das hastes de aço deve ser qualquer uma daquelas recomendadas pela AISI (*American Iron and Steel Institute*) (ver Tabela 3), que podem ser tratadas metalurgicamente com calor para adquirirem as propriedades mecânicas dos tipos de hastes determinadas pela norma API SPEC 11B [American Petroleum Institute, 1998] (ver Tabela 4). As hastes grau C são as mais baratas, mas somente podem ser empregadas em ambientes não corrosivos e com carga de bombeio moderada. As hastes grau D, que possuem uma liga de cromo e

Grau API	Composição Química
K	AISI 46XX Series Steel
C	AISI 10XX Series Steel AISI 15XX Series Steel
D Carbon	AISI 10XX Series Steel AISI 15XX Series Steel
D Alloy	AISI 41XX Series Steel
D Special	Liga Especial

Tabela 3: Composição Química das Colunas de Hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1998]

Grau API	Tensão Mínima (psi)	Tensão Máxima (psi)
K	90000	115000
C	90000	115000
D	115000	140000

Tabela 4: Propriedades Mecânicas dos tipos de hastes - Fonte: [American Petroleum Institute, 1998]

molibdênio em sua composição, podem ser submetidas a cargas de trabalho maiores, mas são limitados a poços com níveis de corrosão moderados, sem a presença de ácido sulfídrico. As hastes grau K possuem uma liga especial de níquel e molibdênio que podem ser utilizadas em fluidos com níveis moderados de acidez. Existem no mercado hastes com propriedades mecânicas compatíveis com o grau D mas com resistência à corrosão compatível com a haste grau K, compostas por uma liga de níquel, cromo e molibdênio (Liga Especial, também denominada KD - ver Tabela 3) [American Petroleum Institute, 1998; COSTA, 2005].

2.1.3 Unidade de Bombeio

A unidade de bombeio é o mecanismo que converte o movimento de rotação do motor em movimento vertical alternado a ser empregado na haste polida. A maioria das unidades de bombeio utilizam uma *viga* para a transmissão deste movimento alternado, elemento presente desde os primeiros equipamentos utilizados para bombeio de óleo. Unidades de bombeio baseadas no uso de viga são basicamente uma ligação mecânica de quatro barras:

- A *manivela*, que rotaciona de acordo o movimento empregado pelo eixo da caixa do redutor;
- A *biela*, que conecta a manivela à viga principal;
- A porção da viga principal a partir do *mancal equalizador* até o *mancal central*;

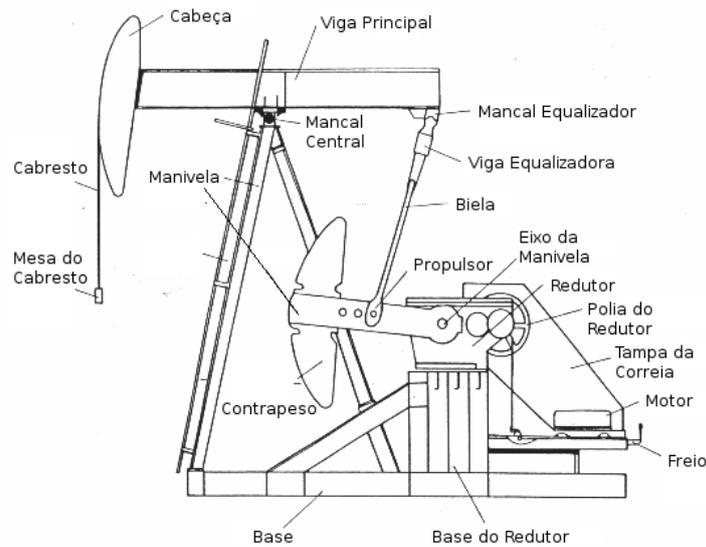


Figura 4: Elementos de uma Unidade de Bombeio. Adaptado de [TAKÁCS, 1993].

- A distância fixada entre o mancal central e o *eixo da manivela*;

A operação destes elementos conectados garante que o movimento de rotação do motor seja convertido num movimento vertical alternado na cabeça da unidade de bombeio. A coluna de hastes, conectada à cabeça, segue este movimento e o conduz até a bomba de fundo. Embora existam diferentes arranjos de unidades de bombeio disponíveis, todas empregam este mesmo esquema de barras conectadas para a conversão da rotação do motor em movimento alternado.

Toda a estrutura da unidade de bombeio é construída sobre uma base de aço rígida que garante o alinhamento apropriado dos componentes, sendo normalmente colocado sobre uma base de concreto. O *suporte* pode ter três ou quatro pernas e é o elemento mais forte da unidade de bombeio, já que suporta as maiores cargas. Em seu topo fica mancal central, que é o ponto onde fica apoiada a viga principal. A viga é um suporte pesado de aço e deve ter uma seção transversal suficientemente grande para suportar as cargas de torção causadas pela carga do poço e pela força empregada pela biela.

Do lado do poço, a viga é finalizada pela *cabeça da unidade de bombeio* que, através do cabresto, move a haste polida. A cabeça tem uma curvatura para garantir que a haste polida seja movida somente na direção vertical; caso contrário, a força de torção resultante causaria a quebra da haste polida. Em unidades de bombeio convencional, a outra extremidade da viga é ligada ao mancal equalizador. Para isso, uma pequena viga mais fina atravessa a viga principal, transmitindo a carga da haste polida da viga principal igualmente para as duas bielas. As bielas são hastes de aço que conectam as suas extremidades ao mancal da manivela através de pinos que os fixam a este elemento. Tais mancais

são responsáveis por permitir o movimento rotacional das manivelas. Elas estão situadas de ambos os lados da caixa do redutor, cujo movimento do eixo determina seu ritmo de funcionamento. Nas unidades de bombeio convencionais, os *contrapesos* são fixados aos braços da manivela, considerando o ajuste da posição ao longo do braço da manivela.

A operação apropriada da unidade de bombeio requer que as perdas por atrito nos mancais da estrutura sejam mínimas. Em unidades de bombeio mais antigas, era comum o uso de mancais deslizantes, normalmente feitos de bronze. Estes mancais podiam tolerar condições muito severas com pouco desgaste, mas requeriam lubrificações regulares. As unidades de bombeio atuais são quase todas exclusivamente equipadas com mancais de rolamento anti-fricção. Tais rolamentos são lubrificadas com graxa e seladas, precisando de menos manutenção que os modelos anteriores de bronze. As outras partes da unidade de bombeio são a *caixa do redutor*, que reduz o a velocidade do motor para aquela necessária ao bombeio; o freio, que pode parar a unidade de bombeio a qualquer momento; as correias de transmissão, as polias que trabalham junto com as correias, bem como a tampa de proteção do conjunto; e o motor, que pode ser elétrico ou de combustão interna.

Ainda que os diferentes tipos de unidade de bombeio possuam os mesmos componente básicos, elas podem ter diferentes arranjos geométricos para as suas partes. Elas são normalmente classificadas de acordo com o critério de se a viga principal opera como uma alavanca de braço duplo (Classe I) ou como uma alavanca de braço simples (Classe III) [TAKÁCS, 1993].

A unidade de bombeio *convencional* é a mais antiga e mais comumente utilizada. O esquema com a geometria deste equipamento pode ser visto na Figura 5. As características básicas deste equipamento são:

- A viga principal atua como uma alavanca de braço duplo, sendo conduzida no movimento de descida pela haste polida e conduzindo a mesma no movimento de subida (Classe I). Ele é também chamado de sistema de elevação *pull-up*;
- Quando a viga está na posição horizontal, o mancal equalizador e o eixo da manivela estão praticamente na mesma linha vertical. Neste momento, pelas dimensões indicadas na Figura 5, $C = I$;
- Os contrapesos estão posicionados sobre a base da viga (unidades balanceadas na viga) ou sobre o braço da manivela (unidades balanceadas na manivela), sendo esta última a situação mais comum;

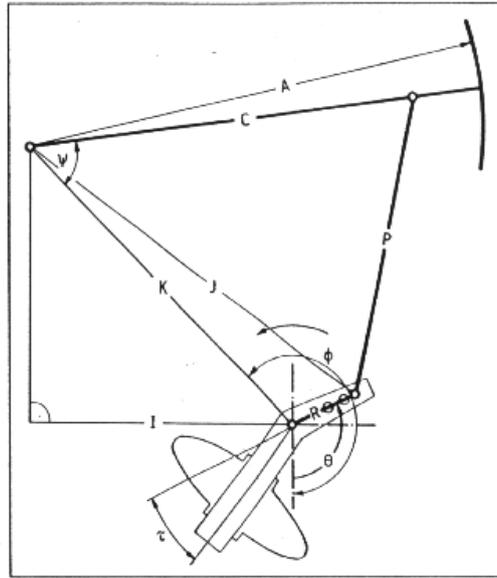


Figura 7: Geometria da unidade de bombeio Mark II. Extraído de [TAKÁCS, 1993]

- O curso do pistão da bomba de fundo;
- O torque no eixo do redutor.

Devido à importância destes parâmetros, diversas fórmulas aproximadas e métodos de cálculo foram desenvolvidos para encontrar estes valores. Os primeiros davam estimativas muito boas para poços rasos e quando as cargas de fluido bombeadas eram menores, mais leves. Sob tais circunstâncias, a coluna de hastes podia ser tratada como uma massa concentrada, e tal definição conduzia a modelos físicos e matemáticos bastante simplificados. À medida que poços cada vez mais profundos passaram a ser utilizados, as simplificações feitas inicialmente na modelagem deixaram de ser válidas e a precisão nos cálculos se deterioraram rapidamente. A necessidade de uma modelagem mais precisa do comportamento do sistema de bombeio mecânico levou ao desenvolvimento de métodos de projeto mais elaborados, determinados experimentalmente ou através de elementos matemáticos mais rebuscados que aqueles empregados anteriormente. A Seção 2.3 detalha a norma RP 11L [American Petroleum Institute, 1988], desenvolvida experimentalmente pelo *American Petroleum Institute* para a realização do dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico.

O cálculo de tais parâmetros depende das propriedades dos diversos elementos envolvidos na produção do poço. No projeto de bombeio mecânico, as propriedades a serem levadas em consideração são as condições do reservatório, as propriedades do fluido a ser explorado, do sistema de escoamento da produção, das características do poço e dos equipamentos de fundo e superfície a serem utilizados na produção [COSTA, 2005]. Para o

reservatório, as principais informações requeridas, que devem ser os valores mais atualizados possíveis, são:

- Pressão estática do reservatório;
- Vazão bruta de projeto, ou vazão bruta limite (se houver);
- Índice de produtividade ou registro de pressão;
- Temperatura do reservatório ou gradiente geotérmico;
- Método de recuperação suplementar e seus efeitos sobre a temperatura e curva de produtividade

As propriedades do fluido também interferem nos parâmetros operacionais indicativos da dinâmica dos equipamentos. As principais informações de fluido que se recomenda obter são as seguintes:

- Grau API do óleo, com o qual se pode obter a densidade específica do óleo (em relação à densidade da água);
- Densidade do gás dissolvido no óleo;
- Densidade da água misturada ao óleo;
- Dados de pressão, volume e temperatura dos elementos que compõem a mistura do fluido;
- Razão Gás-Óleo, que se trata da razão entre o volume de gás livre e o volume de óleo, ambos em condições padrão de temperatura e pressão;
- BSW (*Basic Sediment and Water*), que se trata do percentual de água e sedimentos do fluido produzido;
- Teores de ácido sulfídrico, gás carbônico, salinidade e areia;
- Presença de solventes e ácidos oriundos de operações de completação;
- Tendência a formação de deposições (parafinas e incrustações), que podem bloquear a passagem do poço.

O sistema de escoamento do fluido produzido do poço até sua coleta na superfície interfere diretamente na pressão da cabeça do poço. As principais variáveis que interferem diretamente neste parâmetro são:

- Vazão de projeto;
- Temperatura de superfície;
- Distância até o nó de entrega do fluido produzido;
- Pressão no nó onde será entregue o óleo.

As características do poço onde os equipamentos de produção também deverão ser levados em consideração. O projetista deverá atentar a alguns dos seguintes detalhes do poço quando for projetar o sistema:

- Perfil direcional do poço (profundidade medida, direção e inclinação);
- Diâmetro nominal do revestimento;
- Existência de algum equipamento para contenção de areia;
- Profundidade dos canhoneados;
- Tipo de completação (simples ou dupla);

De posse destes dados, o projeto ocorre da seguinte maneira: o engenheiro seleciona os equipamentos de bombeio que julgue adequados para instalação no poço para produção (unidade de bombeio, coluna de hastes e bomba de fundo). De posse das informações dos equipamentos e das condições de bombeio, são realizados os cálculos dos parâmetros operacionais, responsáveis por indicar como será o nível de solicitação dos equipamentos de bombeio mecânico. Tais parâmetros são os seguintes:

- Carga Máxima na Haste Polida (PPRL - *Peak Polished Rod Load*);
- Carga Mínima na Haste Polida (MPRL - *Minimum Polished Rod Load*);
- Torque Máximo no Redutor (PT - *Peak Torque*);
- Potência Máxima na Haste Polida (PRHP - *Polished Rod Horsepower*);

- Tensão Máxima na Coluna de Hastes (sMax);
- Tensão Mínima na Coluna de Hastes (sMin);
- Tensão Máxima Admissível na Coluna de Hastes (sAdm);
- Grau de Utilização das Hastes, que é o desgaste previsto para a coluna de hastes sofrer durante a produção;
- Vazão Bruta (Q_{bruta}), que é a vazão obtida não só de óleo, mas de todos os produtos a ele misturados;
- Vazão de Óleo (Q_l), que é a vazão líquida obtida;

2.2.1 Questões de Projeto

Muitas vezes, o dimensionamento poderá indicar que algum equipamento inicialmente considerado será solicitado além da sua capacidade, implicando na necessidade de selecionar novamente os equipamentos de bombeio e repetir os cálculos dos parâmetros. Isso desencadeia um processo de tentativa e erro que poderá ser exaustivo e contraproducente, principalmente se o projetista for pouco experiente neste tipo de tarefa. Muitas vezes, para se adquirir a experiência necessária para se chegar a boas configurações de bombeio, são necessários anos de envolvimento com esta tarefa, o que se reflete na escassez de especialistas conhecidos e com grande bagagem nesta área de conhecimento.

Para ilustrar o processo de dimensionamento, tem-se a seguinte situação. A partir das informações de poço e fluido presentes na Tabela 5, um projeto de bombeio mecânico deve ser elaborado para realizar a elevação do petróleo existente no reservatório.

Dados do Reservatório:		
BSW: 24.3%	RGO (m^3/m^3): 1.0	Grau API do Óleo: 25.7
Densidade do Gás: 0.7		Gradiente Geotérmico: ($^{\circ}C/m$) : 0.02
Profundidade dos canhoneados: 626.0m		
Dados de Projeto:		
Vazão Bruta de Projeto: $20m^3/dia$		
Eficiência de Separação de Gás: 80.0%		
Profundidade de Assentamento da Bomba: 200m		
Pressão na cabeça: $1kgf/cm^2$		
Pressão no anular: $1kgf/cm^2$		
Submergência: 10m		

Tabela 5: Exemplo de Dados de Entrada de Poço para Dimensionamento

Num primeiro momento, um projetista poderia propor o dimensionamento descrito na Tabela 6. O primeiro objetivo é atender a vazão de projeto, de forma a não permitir

que o poço tenha uma produção abaixo daquela que pudesse ser efetivamente aproveitada do reservatório explorado. A maneira mais imediata de se conseguir isso é selecionando valores maiores de curso e frequência de bombeio. Porém, a escolha de valores elevados para estes parâmetros faz com que o torque e a carga na haste polida sejam maiores que aquelas que os equipamentos de bombeio possam suportar. Veja neste exemplo que o *Peak Torque* calculado é maior que a capacidade ao torque da unidade de bombeio. Além disso, a vazão bruta calculada é muito maior que a vazão de projeto. Esta é uma situação indesejada porque pode causar alterações nas curvas de pressão do reservatório, o que reduz sua vida útil.

DIMENSIONAMENTO DE BM		
Equipamentos de BM:		
Unidade de Bombeio: 57-109-48 (Capacidade ao torque: 57000 <i>lb.in</i> ; Capacidade Estrutural: 10900 <i>lbs</i> ; (Maior Curso da UB: 48 in)		
Curso da UB: 48	CPM: 19	
Coluna de Hastes: 66	Grau do Aço: C	
Diâmetro do Pistão: 2.75	Âncora: Sim	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL:4206.0	MPRL:502.0	Peak Torque: 69617.0
PRHP:5.7	Grau de Utilização das Hastes:41.15%	
SMAX:9521.0	SMIN:1136.0	SADM:23139.0
Vazão Bruta: 108.8	Vazão Óleo:82.34	
Potência do Motor: 30.0		

Tabela 6: Exemplo de Dimensionamento de Bombeio Mecânico Inválido

A Tabela 7 apresenta um exemplo de dimensionamento correto para as condições de poço apresentadas na Tabela 5. Neste caso, foram necessárias modificações apenas no regime de bombeio, ou seja, nos parâmetros de curso e frequência de bombeio empregados. Os valores dos parâmetros operacionais calculados agora estão mais condizentes com a realidade dos projetos de bombeio comumente dimensionados, sobretudo pelos novos valores de *Peak Torque* e vazão bruta.

Nem sempre uma simples mudança de regime de bombeio pode fazer com que se chegue a uma configuração de bombeio válida e apropriada ao contexto de produção apresentado. Em muitas situações, é necessária a experimentação de diversas combinações de equipamentos, trocando unidades de bombeio, configurações de coluna de hastes e bombas de fundo. Além disso, para cada configuração de bombeio, ainda pode ser necessária a experimentação de diversos regimes de bombeio para que, finalmente, possa se chegar à configuração de bombeio mais adequada para implantação no ambiente produtivo. Esta tarefa vai se tornando menos dispendiosa à medida que o engenheiro projetista ganhe experiência com a tarefa de projetar sistemas de bombeio mecânico, chegando cada vez mais rápido a configurações de bombeio apropriadas. Entretanto, profissionais com tal

DIMENSIONAMENTO DE BM		
Equipamentos de BM:		
Unidade de Bombeio: 57-109-48 (Capacidade ao torque: 57000 <i>lb.in</i> ; Capacidade Estrutural: 10900 <i>lbs</i> ; (Maior Curso da UB: 48 in)		
Curso da UB: 25.28	CPM: 10	
Coluna de Hastes: 66	Grau do Aço: C	
Diâmetro do Pistão: 2.75	Âncora: Sim	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL:2972.0	MPRL:801.0	Peak Torque: 20115.0
PRHP:1.1	Grau de Utilização das Hastes:28.61%	
SMAX:6729.0	SMIN:1814.0	SADM:23520.0
Vazão Bruta: 29.6	Vazão Óleo:22.43	
Potência do Motor: 7.5		

Tabela 7: Exemplo de Dimensionamento de Bombeio Mecânico Válido

experiência são raros, e via de regra, esta tarefa fica a cargo de projetistas que se deparam com os problemas e conflitos inerentes a um processo exaustivo de tentativa-e-erro na escolha dos equipamentos de bombeio.

2.2.2 Métodos de Dimensionamento

O primeiro método de dimensionamento desenvolvido tratava o sistema de bombeio como um sistema massa-mola, que considerava a coluna de hastes de bombeio como uma unidade pontual e inelástica. Com tal aproximação do sistema, a cinemática da coluna pode ser facilmente descrita como um movimento harmônico simples. Entretanto, esta abordagem é falha para poços mais profundos, quando há a necessidade do uso de colunas de hastes mais longas, podendo chegar facilmente a mais de um quilômetro de extensão. Para colunas maiores, seu comportamento elástico ficava mais evidente, e a modelagem feita não era capaz de se aproximar da realidade de forma satisfatória.

Para contornar as limitações do modelo convencional, a American Petroleum Institute (API) desenvolveu um modelo experimental, a partir de diversas configurações de bombeio mecânico existentes. Os dados de projeto foram consolidados e resultaram num manual de práticas recomendadas para dimensionamento de bombeio mecânico, a chamada norma API RP 11L. Ela é descrita em detalhes na seção 2.3. Apesar do avanço conseguido com o desenvolvimento desta norma, ela ainda possui algumas limitações, por se aplicar somente a determinados tipos de equipamentos, como hastes de bombeio metálicas e unidades de bombeio convencionais.

A solução encontrada para as limitações da norma API RP 11L foi o desenvolvimento de uma abordagem matemática mais abrangente, conseguindo descrever o movimento alternativo da haste em função do tempo e da velocidade de propagação do som nas hastes.

Tal movimento ainda sofre a interferência de um fator de amortecimento, que contribui para descrição da natureza elástica das hastes. A partir desta descrição do movimento, são calculados os parâmetros operacionais, que também dependem das propriedades de fluido, dos equipamentos selecionados e da fração volumétrica de gás.

2.3 Norma API RP 11L para Dimensionamento de Bombeio Mecânico

Esta seção irá tratar da norma API RP 11L, sobre práticas recomendadas para os cálculos de projeto de sistemas de bombeio mecânico (ver seção 2.2) do *American Petroleum Institute*. Trata-se de um método para dimensionamento já com algum tempo que foi desenvolvido, mas ainda bastante empregado devido à sua eficácia nos resultados obtidos com seus cálculos. Será especialmente descrita esta norma em detrimento de outras técnicas pois a mesma será utilizada e mencionada ao longo de todo o texto do presente trabalho.

Devido a falta de exatidão geralmente experimentada quando do uso de procedimentos aproximados para o cálculo dos parâmetros operacionais do bombeio mecânico, surgiu a necessidade de se desenvolver métodos mais confiáveis e com resultados mais precisos. Porém, os métodos de análise convencionais, se aplicados ao sistema de bombeio, não darão resultados satisfatórios, principalmente por causa do grande número de parâmetros que podem influenciar na análise. Dessa forma, a única maneira eficiente de alcançar este objetivo é através da modelagem do sistema de bombeio como um todo. Esta abordagem foi seguida pela Sucker Rod Pumping Research Inc., fundada em 1954 e mantida por diversos fabricantes e usuários dos Estados Unidos. A única tarefa desta firma era investigar os muitos problemas complexos do bombeio mecânico e desenvolver procedimentos de cálculo exatos. Na primeira fase do projeto de pesquisa, um modelo mecânico foi criado para simular a operação de um sistema de bombeio. Isto se mostrou muito complicado de se gerenciar e controlar, e um modelo analógico elétrico teve de ser desenvolvido em lugar do anterior. Este último foi muito mais simples de se operar e teve a vantagem adicional de prover saídas que eram muito mais fáceis de se processar.

Durante a construção do modelo analógico elétrico, foi feito um grande esforço para incluir os efeitos de todos os parâmetros que pudessem interferir na operação do sistema de bombeio mecânico. A melhoria mais importante foi a descrição exata da propagação das ondas de tensão longitudinais que percorriam a coluna de hastes durante o bombeio. Esta característica do modelo matemático permitiu o cálculo das forças e deslocamen-

tos em qualquer profundidade ao longo da coluna de hastes. Assim, o comportamento dinâmico da coluna de hastes poderia ser descrito exatamente. Isto era completamente negligenciado nos procedimentos de cálculo anteriores que assumiam uma coluna de hastes concentrada e inelástica.

As convenções básicas usadas pelo modelo analógico (as quais limitam o uso dos resultados) são:

- Uma unidade de bombeio de geometria convencional guia a haste polida;
- A bomba é completamente preenchida com líquido em todo ciclo;
- A unidade de bombeio é perfeitamente contrabalançada;
- A coluna de produção é ancorada na profundidade de assentamento da bomba;
- São usadas hastes de aço;
- O escorregamento do motor é baixo;
- Assume-se fricção normal no fundo do poço.

Milhares de execuções experimentais foram feitas sobre o modelo analógico representando largas faixas de variáveis independentes (curso de trabalho, velocidade de bombeio, tamanho do pistão, etc.). Os parâmetros de saída obtidos, devido ao seu grande número e às complexas interações entre os mesmos, somente puderam ser correlacionados pelo uso de grupos de parâmetros adimensionais. Os resultados das correlações finais foram plotados em diversos gráficos que foram publicados pela American Petroleum Institute (API) em 1967. O procedimento de cálculo baseado neste estudo está contido na publicação RP 11L [American Petroleum Institute, 1988], que já teve algumas atualizações desde a sua primeira publicação. Ele se tornou o método padrão para determinar os parâmetros operacionais do bombeio mecânico.

A norma API RP 11L [American Petroleum Institute, 1988] leva em consideração o comportamento elástico da coluna de hastes. Para alcançar isto, deve ser primeiramente estudado o comportamento dinâmico das hastes, ou seja, a propagação das ondas pela coluna e seus efeitos. Durante o bombeio, a coluna de hastes é estimulada em ambas as extremidades, no topo pela haste polida e na base pela ação da bomba de fundo. As características do movimento de superfície são determinados pelos parâmetros cinemáticos da unidade de bombeio que guia a haste polida. Este movimento da superfície é transmitido pela

coluna de hastes na forma de ondas de forças elásticas ou vibrações ao longo do seu comprimento. Tais ondas de força se juntam a ondas similares geradas pela bomba na base da coluna. As interações e reflexões das ondas influenciam significativamente as forças e deslocamentos que ocorrem em diferentes pontos ao longo da coluna de hastes.

Com o objetivo de descrever apropriadamente as características de vibração da coluna de hastes, seu comportamento ressonante deve ser conhecido a fundo. A frequência natural, sem amortecimento, de uma coluna de hastes uniforme pode ser obtida com a seguinte fórmula:

$$N_o = \frac{15v_s}{L} \quad (2.1)$$

onde:

N_o = Frequência natural, em ciclos por minuto;

v_s = Velocidade de propagação do som pelo material da haste, em pés por segundo;

L = comprimento da coluna de hastes, em pés.

A velocidade de propagação da onda é igual a velocidade do som percorrida em dado material de haste. Um valor típico para hastes de aço está em torno de 16300 pés por segundo (4970 m/s), depois de levar em consideração os efeitos dos acoplamentos das hastes. Substituindo este valor na equação 2.1, a fórmula sugerida fica:

$$N_o = \frac{245000}{L} \quad (2.2)$$

Como visto, a frequência natural fundamental, também chamada de velocidade de bombeio síncrona, de uma coluna de hastes uniforme é função apenas de seu comprimento e não depende do diâmetro da haste usada. Porém, para colunas de hastes heterogêneas, compostas por diferentes tipos de hastes, a frequência natural sofre modificações significativas no seu cálculo. A frequência natural de colunas de hastes heterogêneas sempre serão maiores que a de uma coluna de hastes uniforme de mesmo tamanho [American Petroleum Institute, 1988]. Com o objetivo de encontrar o fator de frequência de colunas heterogêneas, a RP 11L introduz o conceito de *fator de frequência*, F_c , na seguinte fórmula:

$$N'_o = F_c N_o \quad (2.3)$$

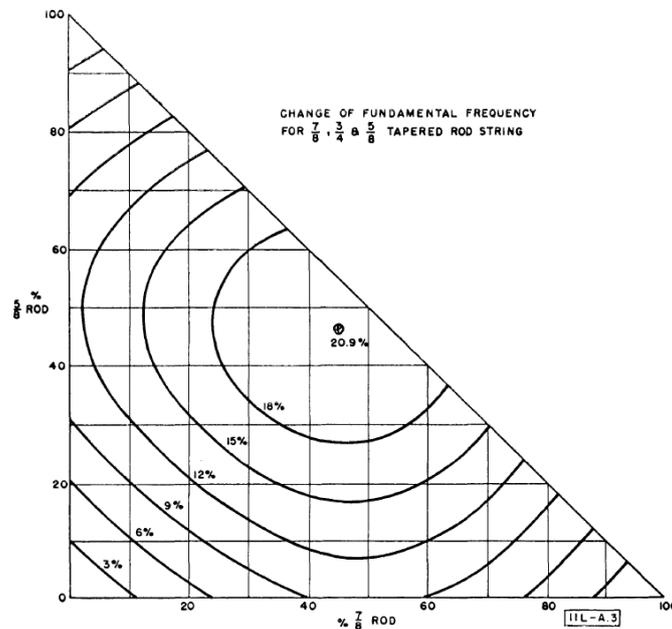


Figura 8: Gráfico mostrando o aumento de frequência natural de hastes heterogêneas. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

onde:

N'_o = Frequência natural de uma haste heterogênea, em ciclos por minuto;

F_c = Fator de frequência, adimensional;

N_o = Frequência natural de uma coluna de hastes heterogênea de mesmo comprimento, em ciclos por segundo.

O valor do fator de frequência é sempre maior que um, e é uma função dos comprimentos relativos e das áreas das seções transversais. A Figura 8 apresenta um gráfico válido para a combinação de hastes de 7/8, 3/4 e 5/8 de polegada de diâmetro. Com os valores dos percentuais do maior e do menor tipo de diâmetro é possível achar o percentual de aumento do fator de frequência da haste.

Como já mencionado, os resultados das execuções de simulação sobre o modelo analógico foram correlacionados utilizando parâmetros adimensionais. Estes parâmetros foram selecionados depois de uma meticolosa análise dimensional do desempenho dos sistemas de bombeio. Verificou-se que os seguintes grupos adimensionais podem ser utilizados com segurança como variáveis de entrada para correlacionar as condições dos diferentes casos de bombeio:

- N/N_o : velocidade de bombeio adimensional;

- N/N'_o : : velocidade de bombeio adimensional;
- F_o/Sk_r : Elasticidade na haste devido à carga de fluido;
- W_{rf}/Sk_r : Elasticidade na haste devido ao empuxo;

onde:

- N = Velocidade (ou frequência) de bombeio real, em ciclos por minuto;
 N_o = Frequência natural de uma coluna de hastes uniforme, em ciclos por minuto;
 N'_o = Frequência natural para colunas de hastes heterogêneas, em ciclos por minuto;
 F_o = Carga de fluido sobre o pistão, em libras;
 S = Curso da haste polida, em polegadas;
 k_r = Constante elástica da coluna de hastes, em libra por polegada;
 W_{rf} = Peso da coluna de hastes no fluido, em libras;

Os primeiros dois parâmetros são razões entre a frequência real de bombeio e a frequência natural das hastes, com a diferença de que, no primeiro, o denominador é o de hastes homogêneas e o segundo de hastes heterogêneas. Os dois seguintes têm em comum o uso do fator k_r , que é a constante elástica da coluna de hastes, ou seja, a força, em libras, necessária para esticar toda a haste no comprimento de uma polegada. Já que, no caso de colunas heterogêneas, seções de diferentes diâmetros são ligadas em série, a constante elástica da coluna é dada pela fórmula:

$$\frac{1}{k_r} = \sum_{i=1}^N L_i E_{ri} \quad (2.4)$$

onde:

- k_r = Constante elástica da coluna de hastes, em libras por polegada;
 L_i = Comprimento da i -ésima seção da coluna, em pés;
 E_{ri} = Constante elástica da i -ésima seção da coluna, em polegada por libra por pé.
 Este valor pode ser encontrado na Tabela 1

A carga de fluido sobre o pistão é calculado em função da área do pistão:

$$F_o = 0.34Hd^2SpGr \quad (2.5)$$

onde:

$$\begin{aligned} F_o &= \text{Carga de fluido sobre o pistão, em libras;} \\ H &= \text{Nível dinâmico do fluido, em pés;} \\ d &= \text{Diâmetro do pistão, em polegadas;} \\ SpGr &= \text{Gravidade específica do fluido, adimensional} \end{aligned}$$

O peso das hastes no fluido é encontrado pela seguinte fórmula:

$$W_{rf} = W_r(1 - 0.128SpGr) \quad (2.6)$$

onde:

$$\begin{aligned} W_{rf} &= \text{Peso das hastes no fluido, em libras;} \\ W_r &= \text{Peso das hastes no ar, em libras} \end{aligned}$$

Assim como foi feito com as variáveis de entrada, os parâmetros dependentes (as saídas do modelo analógico) foram também processados com a introdução de grupos adimensionais. As correlações resultantes foram plotadas em diversos gráficos em função das variáveis independentes discutidas anteriormente. Os cálculos dos parâmetros operacionais de bombeio são baseados nestes gráficos e o procedimento é descrito a seguir.

Para uma coluna de produção ancorada, o curso do pistão é calculado pela seguinte fórmula:

$$S_p = S S_p/S \quad (2.7)$$

onde:

$$\begin{aligned} S_p &= \text{Curso do pistão, em polegadas;} \\ S_p/S &= \text{Variável dependente lida da Figura 9, adimensional;} \\ S &= \text{Curso da haste polida, em polegadas.} \end{aligned}$$

Se a coluna de produção não estiver ancorada, a elongação causada pela carga de fluido reduz o curso do pistão, segundo a fórmula:

$$S_p = S S_p/S - \frac{F_o}{k_t} \quad (2.8)$$

onde k_t é a constante elástica da coluna de produção. Este valor é dados pela seguinte expressão:

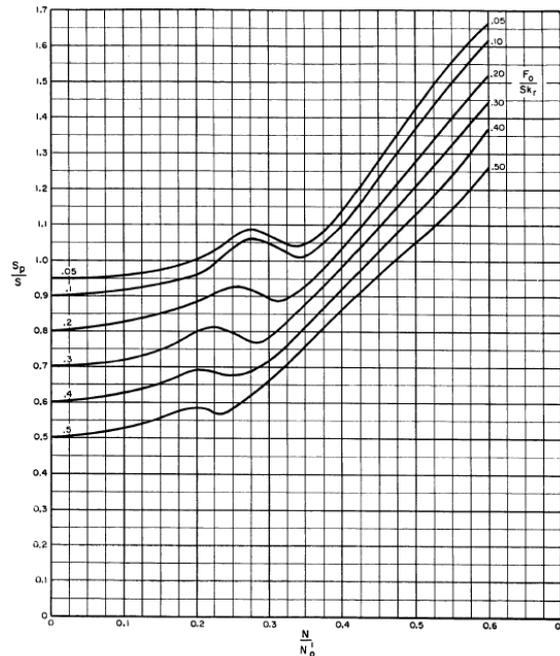


Figura 9: Correlação curso do pistão. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

Diâmetro da Coluna	Diâmetro Interno	Constante Elástica
1.900	1.610	0.500×10^{-6}
2.375	1.995	0.307×10^{-6}
2.875	2.441	0.221×10^{-6}
3.500	2.992	0.154×10^{-6}
4.000	3.476	0.130×10^{-6}
4.500	3.958	0.130×10^{-6}

Tabela 8: Dados de Coluna de Produção. Adaptada de [American Petroleum Institute, 1998]

$$k_t = \frac{1}{E_t L} \quad (2.9)$$

onde:

L = Profundidade de Assentamento da bomba de fundo, em pés

E_t = Constante Elástica da coluna de produção, que pode ser encontrada na Tabela 8, adimensional.

Assumindo que a camisa da bomba é preenchida completamente por líquido durante todo o ciclo de bombeio (eficiência de preenchimento de 100%), o volume diário deslocado pela bomba pode ser calculado baseado tamanho do curso do pistão:

$$PD = 0.1166.S_p.N.d^2 \quad (2.10)$$

onde:

PD = Deslocamento Volumétrico, em barris por dia;

S_p = Curso do pistão, em polegadas;

N = Freqüência de bombeio, em CPM;

d = Diâmetro do pistão, em polegadas.

As cargas máxima e mínima na haste polida durante o ciclo de bombeio são calculadas da seguinte forma:

$$PPRL = W_{rf} + \frac{F_1}{Sk_r} Sk_r \quad (2.11)$$

$$MPRL = W_{rf} - \frac{F_2}{Sk_r} Sk_r \quad (2.12)$$

onde:

$PPRL$ = Carga máxima na haste polida, em libras;

$MPRL$ = Carga mínima na haste polida, em libras;

W_{rf} = Peso das hastes no fluido, em libras;

F_1/Sk_r = Variável dependente lida na Figura 10, adimensional;

F_2/Sk_r = Variável dependente lida na Figura 11, adimensional;

S = Curso da haste polida, em polegadas;

k_r = Constante elástica da haste polida (Ver fórmula 2.4)

A potência requerida para guiar a haste polida é dada pela fórmula:

$$PRHP = 2.53 \times 10^{-6} \frac{F_3}{Sk_r} N k_r \quad (2.13)$$

onde:

$PRHP$ = Potência na haste polida, em HP;

F_3/Sk_r = Variável dependente lida na Figura 12, adimensional.

O torque máximo sobre o redutor de velocidade é calculado assumindo uma unidade

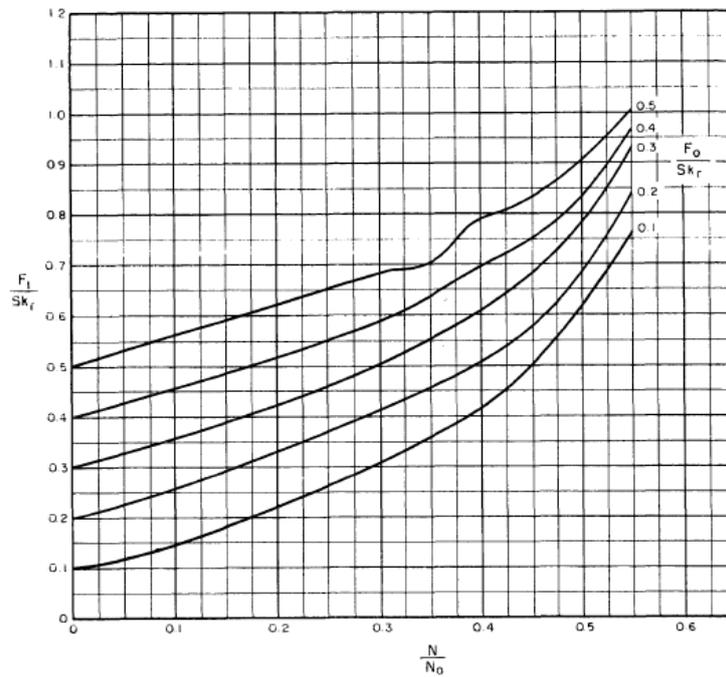


Figura 10: Correlação carga máxima na haste polida. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

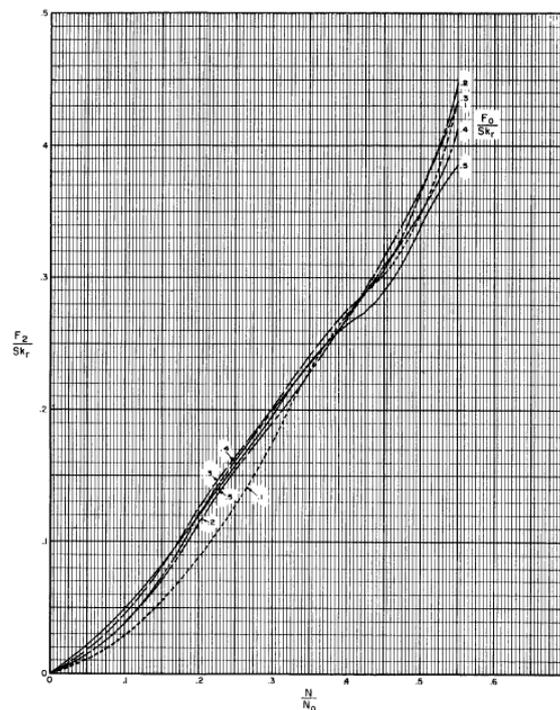


Figura 11: Correlação carga mínima na haste polida. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

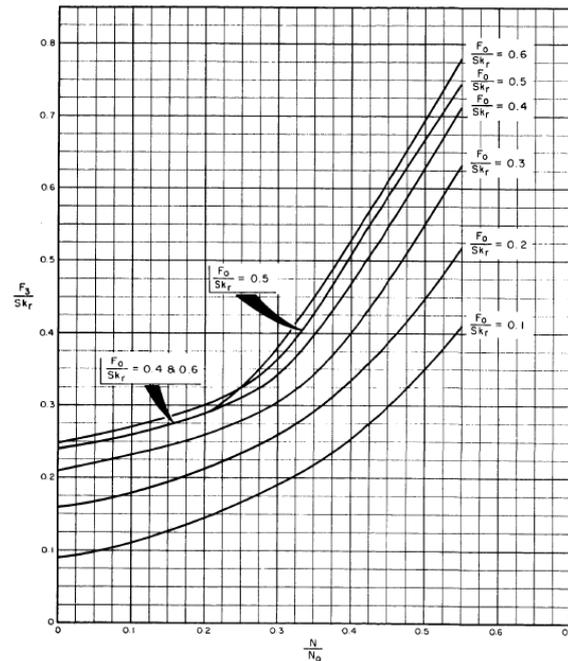


Figura 12: Correlação potência na haste polida. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

de bombeio perfeitamente balanceada. Dessa forma, o efeito de contrabalanceo na haste polida é assumido ser igual ao seu valor ideal dado pela fórmula:

$$CBE = 1.06(W_{rf} + 0.5F_o) \quad (2.14)$$

onde CBE é o efeito de contrabalanceo ideal na haste polida, em libras. Nestas condições, o torque máximo no redutor é calculado pela fórmula:

$$PT = \frac{2T}{S^2k_r} \frac{S^2}{2} k_r \left[1 + \left(\frac{W_{rf}}{Sk_r} - 0.3 \right) \frac{T_a}{10} \right] \quad (2.15)$$

onde:

- PT = Torque máximo no redutor de velocidade, em libra-polegada
- $2T/S^2k_r$ = Variável dependente lida na Figura 13, adimensional;
- W_{rf}/Sk_r = Variável independente, adimensional;
- T_a = Fator de ajuste de torque, lido da Figura 14, em percentual.

A norma API RP 11L representou um avanço significativo para o projeto de sistemas de bombeio mecânico, sendo mais precisa que o método convencional principalmente em

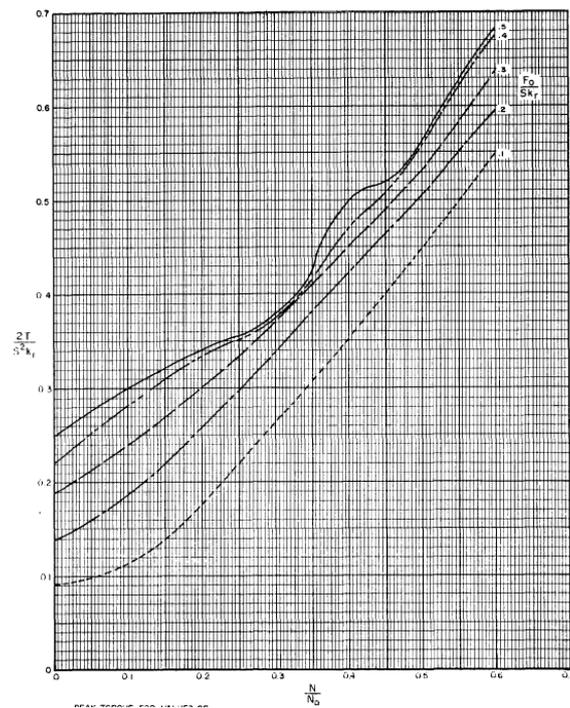


Figura 13: Correlação torque no redutor. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

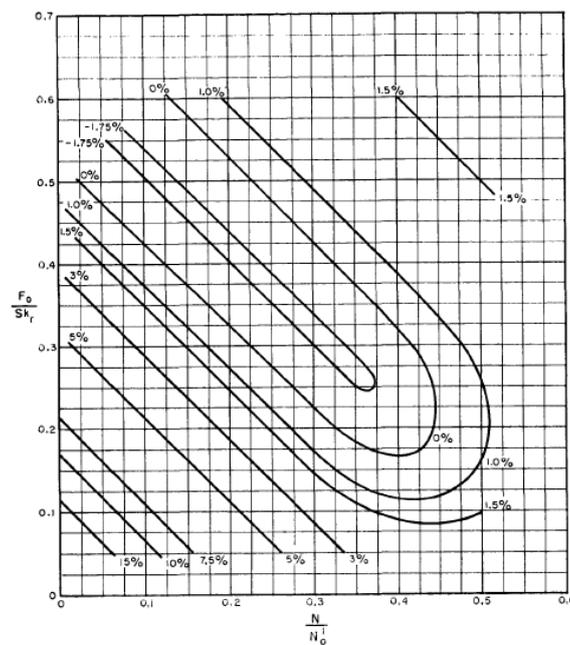


Figura 14: Correlação fator de ajuste de torque. Extraído de [American Petroleum Institute, 1988].

poços mais profundos, quando uma coluna de hastes maior é requerida e a mesma não pode ser mais modelada como um corpo inelástico. Ainda assim, a norma possui limitações de aplicação, como adoção apenas de unidades de bombeio convencionais e hastes metálicas. Por causa de tais limitações, logo surgiu a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de dimensionamento com as quais tais limitações pudessem ser contornadas. Como exemplo de nova técnica desenvolvida, pode-se citar o modelo de Gibbs [COSTA, 2005]. Entretanto, mesmo com o advento de novas técnicas, o uso da norma API RP 11L ainda é significativo, já que seus cálculos são considerados relativamente simples e suas limitações de aplicação costumam corresponder às expectativas de projeto de muitas empresas de produção petrolífera.

2.4 Cálculo da Vazão obtida pelo Sistema de Bombeio Mecânico

O ponto de partida do dimensionamento é o cálculo da vazão que se deseja obter da produção. Determinar em projeto o valor de vazão que deverá ser obtido é fundamental para o projetista analisar a viabilidade econômica da produção de óleo e as condições em que ele chegará à superfície. Nesta seção, será descrito como calcular a vazão esperada por meio da norma API RP 11L, baseada nos cálculos já descritos na seção 2.3.

O elemento inicial a ser considerado nos cálculos é o diâmetro do pistão da bomba de fundo, com o qual é possível determinar a vazão mínima que a bomba pode proporcionar. Ela é dada pela fórmula:

$$Q_{min} = C_{PD} * D^2 * S_{min} * N_{min} \quad (2.16)$$

onde Q_{min} é a vazão mínima, C_{PD} é o coeficiente de deslocamento volumétrico, D é o diâmetro do pistão, S_{min} é o menor curso da unidade de bombeio selecionada e N_{min} é a frequência mínima de bombeio.

Entretanto, este valor de vazão mínima pode não corresponder às expectativas do engenheiro responsável pelo dimensionamento. Caso este valor calculado seja menor que a vazão de projeto, o valor informado pelo usuário é que será considerado como a vazão mínima. O maior valor escolhido dentre estes dois será utilizado no cálculo da vazão máxima. Este valor precisa ser determinado para que o poço não produza além da sua capacidade de produção, de acordo com critérios da engenharia de poço e reservatório.

Este valor corresponde a 1.5 vezes o maior valor dentre a vazão mínima e a vazão de projeto:

$$Q_{max} = 1.5 * \max(Q_{min}, Q_{proj}) \quad (2.17)$$

onde Q_{max} é a vazão máxima e Q_{proj} é a vazão de projeto informada pelo usuário. Este valor foi determinado por um especialista em bombeio mecânico e o motivo de sua adoção se perdeu com o tempo [COSTA, 1997].

O próximo passo é calcular a vazão bruta. Diferentemente das vazões mínima e máxima, que dependem unicamente de propriedade da bomba de fundo, a vazão bruta no bombeio mecânico depende de características do fluido e reservatório, e de características de outros equipamentos além da bomba de fundo, que são a coluna de hastes (sua composição irá nortear a determinação de parâmetros adimensionais da norma API RP 11L) e a unidade de bombeio (especificamente os valores de curso e frequência de bombeamento, este último denominado CPM). Possíveis alterações nas características de fluido e reservatório não são levadas em consideração no processo de dimensionamento, portanto somente com alterações de equipamentos é possível modificar o valor da vazão. O primeiro passo é calcular o fator Vlr (Volume Líquido Real), que depende de características do fluido a ser explorado. Ele é calculado da seguinte forma:

$$Vlr = \frac{(1 - E_s) B_g (RGO - R_s) f_o}{B_o f_o + B_w f_w} \quad (2.18)$$

onde E_s é a eficiência de separação de gás, B_g é o fator volume formação de gás, RGO é a razão gás/óleo de produção, R_s é a razão de solubilidade de gás no, f_o é a fração de óleo do fluido produzido, f_w é a fração de água, B_o é fator volume de óleo e B_w é o fator volume de formação de água. Para a correção dos cálculos dependentes deste parâmetro, ele deverá ser posteriormente convertido de pé cúbico (ft^3) para barris.

Outra variável a ser calculada é o deslocamento volumétrico (PD). Seu valor corresponde a quantidade de fluido deslocado durante a produção do poço, medido em barris diários. Para ser obtida, são necessárias, além da bomba de fundo, informações de unidade de bombeio (no caso aqui, curso e CPM). O valor de curso do pistão (que interfere no deslocamento volumétrico) é diretamente proporcional ao curso da unidade de bombeio, à qual é atrelada pela coluna de hastes. Outra característica que interfere no curso do pistão é o uso de âncora. O valor do curso é reduzido caso a âncora não seja utilizada, conseqüentemente a vazão é reduzida também (relação diretamente proporcional entre

vazão e deslocamento volumétrico - ver adiante). O curso do pistão é determinado também por um parâmetro adimensional, determinado experimentalmente pela norma API RP 11L. Para se conseguir chegar a este parâmetro, é necessária a escolha de uma coluna de hastes, coração desta norma e que norteia a escolha da maioria dos parâmetros adimensionais. O deslocamento volumétrico é calculado da seguinte maneira:

$$PD = 0.1166 * S_p * N * D^2 \quad (2.19)$$

onde S_p é o curso do pistão e N é a frequência de bombeamento imprimida pela unidade de bombeio.

Por fim, a vazão bruta é calculada da seguinte forma:

$$Q_{bruta} = \frac{\left(\frac{PD}{((1+Vlr)*(B_o*(1-f_w)+f_w*B_w))} \right)}{6.29} \quad (2.20)$$

A constante 6.29, presente no denominador da razão mais externa, corresponde ao fator de conversão de barril para metro cúbico, unidades de volume comumente utilizadas na indústria petrolífera. A partir das equações 2.19 e 2.20, obtém-se:

$$Q_{bruta} = \frac{\left(\frac{0.1166*S_p*N*D^2}{((1+Vlr)*(B_o*(1-f_w)+f_w*B_w))} \right)}{6.29} \quad (2.21)$$

Para que se possa considerar que a vazão calculada atende ao projeto, ela deve estar situada entre os valores de vazão de projeto e vazão máxima. Uma vazão abaixo do valor de projeto não é interessante comercialmente, já que o poço produziria menos que potencialmente poderia fornecer. Se a vazão mínima que a bomba pode oferecer for maior que a vazão de projeto, é preciso tomar cuidado para que a vazão que se possa obter não seja muito maior que a vazão de projeto. Isso é importante para que uma vazão muito elevada não seja implantada, o que poderia desestabilizar os níveis de pressão do reservatório, inviabilizando a produção.

o passo final no cálculo da vazão é encontrar a quantidade exata de óleo que vem à superfície por meio da elevação artificial. O petróleo quando produzido vem misturado a diversos outros elementos, como água, gás e outros sedimentos que serão posteriormente separados para se chegar ao óleo puro. A vazão líquida de óleo é calculada da seguinte forma:

$$Q_l = Q_{bruta} * (1 - BSW/100) \quad (2.22)$$

onde Q_l é a vazão líquida, Q_{bruta} a vazão bruta e BSW é a sigla para *basic sediment and water* (sedimentos básicos e água), que inclui principalmente água, mas também sedimentos e emulsões (fluido de completação de poço, surfactantes e elementos corrosivos).

2.5 Cálculo das Tensões na Coluna de Hastes

Esta seção trata das principais forças atuantes na coluna de hastes durante o ciclo de bombeio. Tratam-se também de cálculos de feitos durante o projeto de sistemas de bombeio mecânico (ver seção 2.2), dependentes de outros parâmetros calculados pelos diferentes métodos de dimensionamento.

Devido à própria variação das cargas atuantes na haste polida da unidade de bombeio, é de se esperar que as hastes que compõem a coluna também sofram fadiga devido à oscilação constante na tensão atuantes nas mesmas. Quando se faz o projeto de bombeio da coluna, faz-se uma estimativa de que a haste dure, pelo menos, 10 milhões de ciclos de bombeio [COSTA, 2005]. Para isso, calcula-se a tensão máxima admissível na haste (S_{adm}), de forma que ela chegue à durabilidade esperada. Ela é calculada pela seguinte expressão:

$$S_{adm} = \left(\frac{T}{4} + 0.5625S_{min} \right) SF$$

onde T é a tensão de ruptura do material da haste (ver Tabela 4), S_{min} é a *tensão mínima da haste* e SF é o fator de serviço, que indica o nível de corrosividade do ambiente de produção. Seu valor varia entre 0 (ambiente totalmente corrosivo) e 1 (ambiente não corrosivo), e é determinado de acordo com a experiência do engenheiro projetista. A tensão mínima na haste é calculada da seguinte forma:

$$S_{min} = \frac{MPRL}{A_r}$$

onde $MPRL$ é a carga mínima na haste polida. Seu valor usado pode ser calculado por qualquer um dos métodos de dimensionamento citados anteriormente. A variável A_r é a área da seção transversal da primeira haste de bombeio que compõe a coluna de hastes. Este é considerado o ponto mais frágil da coluna de hastes, por estar sujeito aos maiores

esforços [COSTA, 2005]. De forma semelhante, pode-se chegar ao valor da *tensão máxima nas hastes* (S_{max}):

$$S_{max} = \frac{PPRL}{A_r}$$

onde $PPRL$ é a carga máxima na haste polida. Assim como no cálculo da tensão mínima, aqui, qualquer um dos métodos de dimensionamento citados anteriormente podem ser utilizados.

O grau de fadiga que as hastes sofrerão durante sua utilização pode ser avaliado pelo cálculo do chamado *grau de utilização das hastes*. Ele é dado pela razão entre as tensões máxima e a tensão admissível:

$$Util\ Hastes = \frac{S_{max}}{S_{adm}}$$

Naturalmente, a tensão máxima não deverá exceder a tensão admissível, sendo dessa forma a coluna de hastes considerada dimensionada quanto ao desgaste.

2.6 Software para Dimensionamento de Bombeio Mecânico

O programa API-97 [COSTA, 1997] foi desenvolvido para permitir o projeto de sistemas de bombeio mecânico por meio do procedimento descrito pela norma API RP 11L (ver Seção 2.3). Além da adoção dos cálculos dos parâmetros operacionais, o programa teve também o intuito de ampliar o horizonte inicial vislumbrado pela norma. As novidades acrescentadas pelo programa foram as seguintes:

- Análise nodal com a bomba de fundo em qualquer profundidade. O fluxo multifásico entre os canhoneados e a bomba é calculado e são traçadas as curvas de pressão disponível e requerida na profundidade da bomba.
- Inclusão do efeito da pressão de fluxo na cabeça e no anular.
- Possibilidade de se trabalhar com a coluna de produção ancorada ou não.
- Cálculo do nível dinâmico considerando o fluxo multifásico no anular tubo-revestimento.
- Cálculo dos percentuais de hastes em colunas combinadas de modo a se obter o mesmo fator de serviço no topo de cada seção.

Para a obtenção dos dados obtidos nos gráficos, são mapeados pontos discretos de interseção para que seja possível então, por meio de interpolação numérica, a obtenção dos outros valores. O polinômio interpolador pode ser obtido por meio da seguinte fórmula:

$$P_n(x) = P_n(x_0) + \frac{P_n(x_1) - P_n(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (2.23)$$

onde $(x_0, P_n(x_0))$ e $(x_1, P_n(x_1))$ são pontos conhecidos do gráfico e $(x, P_n(x))$ o ponto que se deseja interpolar.

Mesmo que alguns avanços no processo de dimensionamento foram feitos com a implementação do programa, algumas limitações ainda se mostravam presentes. Ainda não era possível acessar diretamente os dados reais do poço a ser produzido, com informações de fluido e características de reservatório, já que o sistema não está ligado em rede com qualquer banco de dados. Além disso, a norma API RP 11L assume uma série de convenções que precisam ser atendidas para garantir a correção de seus cálculos, limitando a gama de equipamentos que possam ser utilizados no dimensionamento do sistema.

3 Sistemas Especialistas Fuzzy

Este capítulo trata das técnicas adotadas no desenvolvimento da solução proposta por este trabalho. Ele oferece a base necessária para a compreensão dos mecanismos de inferência empregados e de como o sistema proposto deverá se comportar mediante o conhecimento que lhe será incorporado.

Sistemas especialistas *fuzzy* são aqueles que fazem uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* em lugar da teoria clássica para avaliar suas regras de inferência. Tais sistemas podem ser divididos em duas grandes categorias [LEEKWIJCK; KERRE, 1999]: sistemas de inferência (ou conhecimento) e sistemas de controle. Sistemas de conhecimento *fuzzy* têm por objetivo prover alguma forma de raciocínio qualitativo para um domínio específico. Conjuntos *fuzzy* [ZADEH, 1965] são usados para mapear fatos qualitativos sobre entidades numéricas para que possam ser manipuladas por um computador. O resultado do tratamento computacional destes sistemas é uma expressão qualitativa baseada nos seus valores de entrada. Sistemas de controle utilizam conjuntos *fuzzy* como uma ferramenta conveniente para definir regras e fazer inferências sobre tomadas de decisão de controle.

3.1 Conjuntos Fuzzy

A teoria dos conjuntos clássica é regida por uma lógica que usa somente apenas um dos seguintes valores: verdadeiro ou falso (0 ou 1, a depender do contexto em que seja utilizado). Ou seja, a relação de pertinência de um elemento a um conjunto tem uma fronteira nítida, bem estabelecida. Seja X o universo do discurso e seus elementos denotados por x . Pela teoria clássica, um conjunto A de X é definido por uma função $f_A(x)$, denominada *função característica* de A :

$$f_A(x) : X \rightarrow \{0, 1\}$$

onde

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Para qualquer elemento x do universo X , a função característica f_A é igual a 1 se x é um elemento de A , e é igual a 0 se x não é um elemento de A . Por esse motivo, esta lógica não é capaz de representar conceitos vagos, chegando facilmente a paradoxos quando se tenta utilizá-la numa aproximação do raciocínio humano [NEGNEVITSKY, 2005]. Especialistas costumam recorrer ao senso comum em diversas situações para resolver seus problemas. Eles também usam termos vagos e ambíguos, tais como: “A velocidade deste equipamento está alta, mas eu posso deixá-lo funcionando nesta condição por enquanto”. Para lidar com situações como esta, foi desenvolvido o conceito de *conjuntos fuzzy*. Em lugar do princípio da dicotomia adotada na lógica clássica, a pertinência de um elemento a um conjunto é determinada por níveis intermediários e graduais, se valendo de uma lógica multi-valorada para indicar graus de pertinência e graus de verdade. Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, um conjunto A do universo X é definido pela função $\mu_A(x)$, denominada *função de pertinência* do conjunto A :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]$$

onde

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= 1 & , \text{ se } x \text{ está totalmente em } A \\ \mu_A(x) &= 0 & , \text{ se } x \text{ não está em } A \\ 0 < \mu_A(x) < 1 & , \text{ se } x \text{ está parcialmente em } A \end{aligned}$$

Este conjunto permite uma faixa contínua de possíveis escolhas. Para qualquer elemento x do universo X , a função de pertinência $\mu_A(x)$ é igual ao grau que x é um elemento do conjunto A . Este grau, um valor entre 0 e 1, representa o *grau de pertinência*, também chamado *valor de pertinência* do elemento x ao conjunto A . Uma representação conveniente para o conjunto A é a seguinte:

$$A = \{ \mu_A(x_1)/x_1 \}, \{ \mu_A(x_2)/x_2 \}, \dots, \{ \mu_A(x_n)/x_n \}$$

onde a barra de separação é usada para associar o valor de pertinência com um elemento do universo. Uma outra forma, mais apropriada para aplicações computacionais, seria na forma de um vetor:

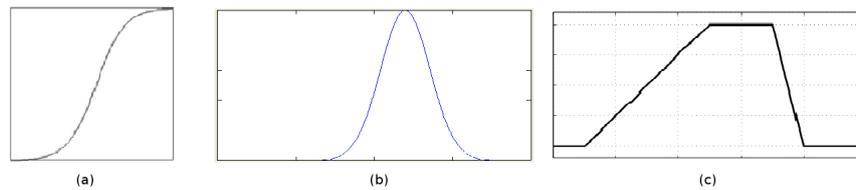


Figura 15: Exemplos de gráficos que podem ser utilizados para modelar conjuntos *fuzzy*

$$A = (\mu_A(x_1)/x_1, \mu_A(x_2)/x_2, \dots, \mu_A(x_n)/x_n)$$

Para representar computacionalmente um conjunto contínuo, é necessário expressá-lo através de uma função e então mapear os elementos do conjunto aos seus respectivos graus de pertinência. Algumas das funções mais utilizadas nestes casos são a *gaussiana* (Figura 15a) e a *sigmoide* (Figura 15b). Entretanto, por estas funções possuírem tempo de computação elevado, costumam ser substituídas por funções lineares, com formatos aproximados, que geram resultados semelhantes por um tempo de computação bastante reduzido. Evidentemente, tais substituições somente podem ser feitas em contextos em que a aproximação não seja significativa no domínio do problema tratado. Por exemplo, a função que mais se aproxima da função gaussiana é a trapezoidal (Figura 15c), e uma de formato aproximado da sigmoide é a triangular [KLIR; YUAN, 1995].

Um conceito importante ligado a conjuntos *fuzzy* é o de *variável linguística*. Trata-se de variáveis cujos valores são palavras ou sentenças em linguagem natural ou artificial [ZADEH, 1975]. Por exemplo, *idade* é uma variável linguística se seus valores são lingüísticos em vez de numéricos; isto é, *jovem*, *não jovem*, *muito jovem*, *velho*, *muito velho*, etc., em vez de 20, 21, 22, ... Mais especificamente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(\chi, T(\chi), U, G, M)$ onde χ é o nome da variável; $T(\chi)$ é o conjunto de termos de χ , isto é, a coleção de seus valores lingüísticos; U é o universo do discurso; G é uma regra sintática que gera os termos em $T(\chi)$; e M é uma regra semântica que associa a cada valor lingüístico X seu significado, $M(X)$, onde $M(X)$ denota um subconjunto *fuzzy* de U . O significado de um valor lingüístico X é caracterizado pela função de pertinência (também chamada função de compatibilidade) $c : U \rightarrow [0, 1]$ que associa cada u em U sua pertinência com X . Por exemplo, a compatibilidade da idade 27 com *jovem* poderia ser 0.7, enquanto que a de 35 poderia ser 0.2.

3.2 Operações sobre conjuntos fuzzy

A teoria dos conjuntos clássica descreve a forma como conjuntos podem interagir uns com os outros, através das chamadas *operações* entre conjuntos. Com a mudança de paradigma adotada pela teoria dos conjuntos *fuzzy*, as operações definidas na teoria clássica também precisam ser modificadas para acompanhar o pensamento dos diferentes níveis de pertinência dos seus elementos. As operações básicas sobre conjuntos clássicos – *complemento* (negação), *interseção* e *união* – podem ser generalizadas para conjuntos *fuzzy* de diversas maneiras [KLIR; YUAN, 1995]. Tratam-se de generalizações pois elas também devem ser válidas na teoria clássica. Entretanto, uma generalização em particular deste conjunto de operações, as chamadas *operações fuzzy padrão*, são as mais largamente utilizadas e costumam atender bem a maioria das implementações de sistemas especialistas *fuzzy* [KLIR; YUAN, 1995]. No decorrer deste trabalho, quando tais operações forem mencionadas, estará se tratando das operações padrão.

Na teoria clássica, a operação de negação tem por objetivo verificar *quais* elementos de um universo de discurso não pertencem a um determinado conjunto. Como na teoria *fuzzy* cada elemento possui um grau de pertinência, podendo pertencer apenas parcialmente, a questão que seria mais adequada neste contexto é a verificação de *quanto* um elemento não pertence a este conjunto. A operação *complemento*, \bar{A} (também referenciada $\neg A$), de um conjunto *fuzzy* A com respeito ao universo do discurso X é definida para todo $x \in X$ pela equação:

$$\bar{A}(x) = 1 - A(x)$$

Uma operação de interseção entre dois conjuntos é definida classicamente pelos elementos por ele compartilhados. O enfoque adotado no contexto dos conjuntos *fuzzy* é o do *quanto* os elementos estão em ambos os conjuntos. Dados dois conjuntos *fuzzy* A e B , a operação interseção padrão entre estes conjuntos, $A \cap B$ (ou $\mu_{A \cap B}(x)$), definida para todo $x \in X$, é dada pela expressão:

$$(A \cap B) = \min [A(x), B(x)]$$

Uma operação de união entre dois conjuntos é definida classicamente pelos elementos de ambos os conjuntos. Dentro da teoria dos conjuntos *fuzzy*, o que se leva em consideração na construção deste conjunto é do *quanto* os elementos pertencem a um conjunto ou

a outro. Dados dois conjuntos *fuzzy* A e B , a operação união padrão para estes conjuntos, $A \cup B$ (ou $\mu_{A \cup B}(x)$), definida para todo $x \in X$, é dada pela expressão:

$$(A \cup B) = \max [A(x), B(x)]$$

3.3 Inferência Fuzzy

O processo de inferência pode ser definido como o mapeamento de um conjunto de entrada para um conjunto de saída, sendo que neste contexto é utilizada a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Este mapeamento é feito através de um conjunto de regras na forma IF $x \in A$ THEN $y \in B$, onde x e y são *variáveis linguísticas*, e A e B são valores linguísticos determinados por conjuntos *fuzzy* sobre o universo do discurso X e Y , respectivamente. O processo de raciocínio de cada regra se constitui de duas partes: avaliar a regra do antecedente (a parte IF da regra) e aplicar seu resultado para o consequente (parte THEN da regra). No sistema baseado em regras clássico, se o antecedente é verdade então o consequente é verdade também. Em sistemas *fuzzy*, onde o antecedente é uma afirmação *fuzzy*, as regras disparam com algum grau de verdade. Dessa forma, o consequente também será verdade com o mesmo grau determinado pelo antecedente [NEGNEVITSKY, 2005].

Assim como nas regras baseadas na lógica clássica, o antecedente de uma regra *fuzzy* pode ter múltiplos elementos, como na expressão IF $x \in A$ AND $y \in B$ THEN $z \in C$. Neste caso, todos os elementos do antecedente são calculados simultaneamente e resolvidos num único número, utilizando as operações que atuam sobre conjuntos *fuzzy* (Seção 3.2). O consequente também pode ter múltiplas assertivas, como na expressão IF $x \in A$ THEN $y \in B$; $m \in W$. Neste caso, todas as partes do consequente são afetados igualmente pela expressão do antecedente. Cabe ressaltar que as variáveis das assertivas dos consequentes também são conjuntos *fuzzy* representados por termos linguísticos.

O método de inferência *fuzzy* mais utilizado é o chamado método Mamdani [MAMDANI; ASSILIAN, 1999]. Ele é realizado em quatro passos: *fuzzificação* das variáveis de entrada, processamento das regras, agregação das saídas das regras e a *defuzzificação*. O processo é iniciado com a determinação do grau de pertinência dos valores de entrada aos conjuntos *fuzzy* relevantes às regras de inferência. Os conjuntos corresponderão aos termos linguísticos avaliados e atribuídos às variáveis presentes nas regras. Isso é feito através das funções de pertinência definidas pelo engenheiro de conhecimento junto ao

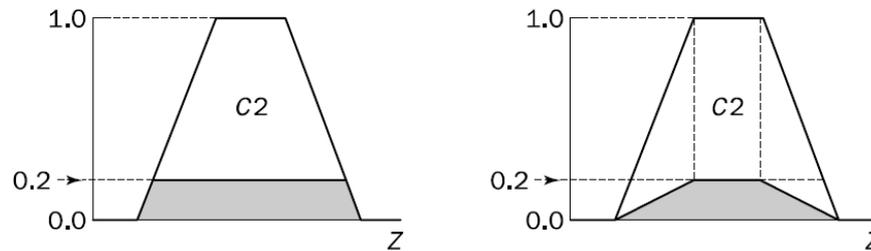


Figura 16: Exemplos de Corte e Escala em Conjuntos de Saída *Fuzzy*. Extraído de [NEGNEVITSKY, 2005]

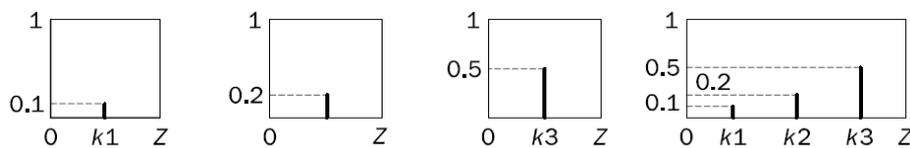


Figura 17: Exemplos de conjuntos *singleton* utilizados na saída das regras de inferência. Extraído de [NEGNEVITSKY, 2005]

especialista do domínio em questão. As variáveis *fuzzificadas* podem então ser aplicadas aos antecedentes das regras de inferência.

O passo seguinte no processo de inferência é aplicar o resultado da avaliação do antecedente à função de pertinência do conseqüente da regra de produção. Pelo método Mamdani, os conjuntos *fuzzy* de saída seriam escalados ou cortados na altura do valor conseguido do termo antecedente, reduzindo sua área de diferentes formas, a depender da conveniência do projetista do sistema (ver Figura 16). Estes conjuntos então seriam agregados numa única área resultante do processo de inferência.

Um passo alternativo foi sugerido por Sugeno no qual são usados *singletons* para os conjuntos *fuzzy* de saída [SUGENO, 1985]. Um *singleton* é um conjunto fuzzy com uma função de pertinência que é única para um determinado valor do universo do discurso e atribui grau de pertinência zero para todos os outros. Esta representação exige menos esforço para a sua representação computacional, o que pode contribuir para processos de inferência mais rápidos sem perda significativa de informação (ver Figura 17).

3.4 Defuzzificação

Um sistema especialista *fuzzy* pode incorporar não apenas uma, mas diversas regras que descrevem o conhecimento de um domínio, tendo como saída de cada regra um outro

conjunto *fuzzy*. Um processo que pode ser incorporado como último passo do sistema de inferência é a chamada *defuzzificação*, que mapeia um conjunto *fuzzy* de saída para um valor exato, preciso. No caso de sistemas de conhecimento, algumas vezes os resultados dos valores lingüísticos oferecem informações suficientes ao final do processo de inferência; neste caso, não há a necessidade de *defuzzificação*. Em outros casos, (especialmente quando o sistema *fuzzy* precisa lidar com aplicações de software clássicas, que não lidam com lógica *fuzzy*), o passo de *defuzzificação* é necessário para obter um único elemento do universo. Já no caso de sistemas de controle, uma saída precisa é sempre necessária. Por exemplo, um resultado de inferência definindo que uma válvula tem que ser “um pouco” aberta não é muito útil em sistemas de controle. Apesar de existirem termos lingüísticos definidos na saída, o resultado que o sistema deverá apontar não é um termo, mas um valor numérico. O processo de *defuzzificação* deverá sempre ser empregado no processo de inferência de sistemas de controle [LEEKWIJCK; KERRE, 1999].

A escolha do método de *defuzzificação* está diretamente relacionada com o processo de inferência seguido pelo sistema. No caso de se adotar o método de inferência de Mamdani, pode-se utilizar a técnica do centróide sobre o agregado de conjuntos de saída cortadas ou escalas. Esta técnica encontra o ponto onde uma linha vertical dividiria o agregado em duas massas iguais, denominado *Centro de Gravidade*. Ele pode ser expresso da seguinte forma [NEGNEVITSKY, 2005]:

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x)x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (3.1)$$

Teoricamente, o centro de gravidade é calculado sobre um intervalo contínuo mas, na prática, uma estimativa razoável pode ser obtida através de um conjunto discreto de pontos dentro do intervalo. Neste caso, a fórmula a ser aplicada seria a seguinte:

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \quad (3.2)$$

A Figura 18 ilustra o uso da técnica do centróide no processo de *defuzzificação* com o uso de elementos discretos do intervalo. Neste exemplo, o centro de gravidade foi obtido da seguinte forma:

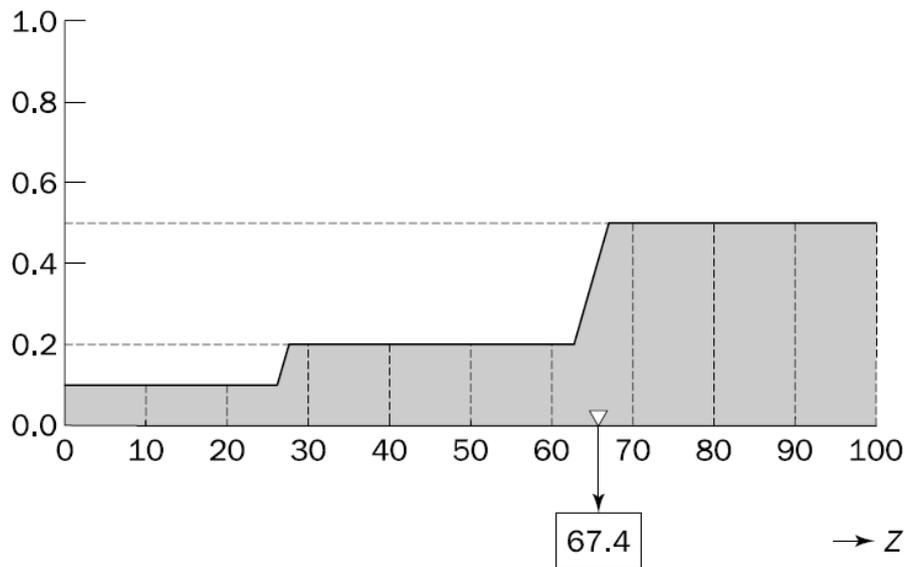


Figura 18: Exemplo de defuzzificação usando COG. Extraído de [NEGNEVITSKY, 2005]

$$COG = \frac{(0 + 10 + 20) \times 0.1 + (30 + 40 + 50 + 60) \times 0.2 + (70 + 80 + 90 + 100) \times 0.5}{0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.2 + 0.2 + 0.2 + 0.2 + 0.3 + 0.3 + 0.3 + 0.3} = 67.4$$

Para o caso de ser adotado o método de inferência de Sugeno, pode-se utilizar o método da Média de Pesos (*Weighted Average - WA*) a partir dos *singletons* obtidos do processo de inferência. Ele é dado pela seguinte fórmula:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n m^i w_i}{\sum_{i=1}^n m^i} \quad (3.3)$$

Na fórmula, m^i é cada um dos valores resultantes das regras de produção do sistema de inferência e que são atribuídos a valores lingüísticos; e cada w_i são os valores de cada conjunto *singleton*, os denominados “pesos” do método. Por exemplo, suponha que na Figura 17, sejam atribuídos os pesos: $k1 = 20$, $k2 = 50$, $k3 = 80$. Aplicando a média de pesos a este conjunto de saída é então obtido da seguinte forma:

$$WA = \frac{\mu(k1) \times k1 + \mu(k2) \times k2 + \mu(k3) \times k3}{\mu(k1) + \mu(k2) + \mu(k3)} = \frac{0.1 \times 20 + 0.2 \times 50 + 0.5 \times 80}{0.1 + 0.2 + 0.5} = 65$$

Sistemas especialistas têm sido usados desde a década de 1970, quando os primeiros sistemas de processamento simbólico foram desenvolvidos e aplicados nas mais diferentes áreas de aplicação. Os primeiros sistemas desenvolvidos fizeram uso da teoria dos conjuntos clássica e obtiveram significativo sucesso em diversas aplicações desenvolvidas. Entretanto, o uso de conjuntos clássicos no desenvolvimento de sistemas especialistas se deparou com algumas limitações, sobretudo quando, ao tentar modelar o conhecimento obtido de especialistas, os mesmos se valiam de termos e jargões vagos e imprecisos que dificilmente poderiam ser representados por meio de regras de inferência pautadas na lógica clássica. Conjuntos *fuzzy* foram concebidos com o intuito de representar este tipo de conhecimento, e desde então sua aplicação tem se estendido por diversas áreas de conhecimento, como sistemas de tomada de decisão, sistemas de controle e reconhecimento de padrões [KLIR; YUAN, 1995].

4 Trabalhos Relacionados

O presente capítulo tem por finalidade expor um conjunto de trabalhos relacionados com a solução proposta por este trabalho. Outro objetivo deste capítulo é citar algumas soluções existentes cujo propósito alinhe-se com o foco do presente trabalho.

4.1 Aplicação de Inteligência Artificial para Detecção de Falhas de Bombeio Mecânico

A maioria das aplicações de inteligência artificial no domínio de bombeio mecânico tem sido na detecção de falhas de funcionamento dos equipamentos durante o funcionamento dos mesmos. No fim da década de 1980, foi desenvolvido um sistema especialista no diagnóstico de falhas em sistemas de bombeio que na época foi largamente utilizado nos campos de petróleo sob concessão da Chevron U.S.A. [FOLEY; SVINOS, 1989]. Tal sistema, denominado EXPROD, tinha como entrada os resultados obtidos de uma carta dinamométrica de fundo, calculada a partir de outro programa, denominado SADA. Além do perfil de variação de carga exibido pela carta dinamométrica, outros dados eram colocados na entrada do sistema, como o torque no redutor e a tensão nas hastes. A partir destes dados, o sistema realizava diagnósticos para cada poço colocado para processamento, ou fornecia um conjunto de alternativas que auxiliavam o usuário a encontrar o problema. As regras de inferência do sistema são do tipo *IF ... THEN ...*, e são baseadas na experiência e conhecimento da companhia no diagnóstico de falhas de funcionamento.

Já na década de 1990, foi desenvolvido um sistema de diagnóstico automatizado, que fazia uso de redes neurais artificiais para detecção de falhas de funcionamento [ALEGRE; MOROOKA; ROCHA, 1993]. Este sistema possuía duas redes neurais: a primeira era responsável pelo reconhecimento dos diferentes formatos que a carta dinamométrica poderia assumir e dos possíveis erros que poderiam ser vislumbrados de cada forma; a outra rede era responsável pelo raciocínio especialista, e utilizava como entrada o resultado obtido da primeira rede além de outros dados complementares, como pressão de sucção e grau de

fricção, derivados das condições de bombeio, como a carga máxima bombeada e a profundidade de assentamento da bomba de fundo. Estes dados foram considerados necessários pelos autores já que muitas cartas dinamométricas com mesmo padrão de formato muitas vezes eram obtidas de condições de bombeio muito distintas. Esta aplicação acabou se configurando no sistema SICAD, usado com sucesso em diferentes campos de produção sob concessão de uma empresa do ramo petrolífero. Um trabalho mais recente focou especificamente no aprendizado automático de formatos de cartas dinamométricas, também com o uso de redes neurais artificiais [SOUZA et al., 2009]. Este trabalho obteve resultados mais precisos no treinamento de detecção de padrões de formatos de cartas.

Os trabalhos apresentados nesta seção são direcionados à detecção de falhas em sistemas de bombeio mecânico por meio de técnicas de inteligência artificial. Uma abordagem diferente propõe o uso de métodos inteligentes na fase de projeto do sistema de bombeio. Tais métodos poderiam ser utilizados para ensinar um aplicativo a projetar um sistema de bombeio mecânico, seja a partir de um conjunto de projetos já existentes ou a partir do conhecimento de um engenheiro especialista. Esta abordagem visa a elaboração de projetos de bombeio mais adequados, minimizando a possibilidade de falhas ao longo da vida útil dos equipamentos. Alguns trabalhos foram desenvolvidos nesta linha e são apresentados na seção a seguir.

4.2 Aplicação de Inteligência Artificial para Dimensionamento de Bombeio Mecânico

A primeira tentativa de utilizar técnicas de inteligência artificial no dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico foi um sistema especialista baseado em regras de produção (SVINOS, 1990 apud CORRÊA, 1995). O produto deste trabalho recebeu o nome de RODSTAR® e está no mercado até os dias atuais. Outros produtos foram desenvolvidos a partir do aprimoramento deste primeiro, tais como XROD-V® e RODSTAR-D®, este último para poços direcionais [THETA..., 2009].

Um outro sistema, denominado BOMEXPERT [MARTINEZ et al., 1993] tem como um de seus módulos um sistema de dimensionamento que emprega busca inteligente com o auxílio de algoritmos genéticos para configurar um sistema para produzir simultaneamente diversas propostas de dimensionamento. Ele define uma população inicial, formada por configurações de bombeio completas, com unidade de bombeio, coluna de hastes e bomba de fundo. Cada uma delas tem um valor de *fitness*, definido pela compatibilidade da vazão obtida com a vazão indicada pelo usuário em projeto e pelas restrições

impostas pela capacidade de cada equipamento. Os cálculos de dimensionamento são feitos seguindo a norma API RP11L (seção 2.3). As configurações são representadas por cromossomos, que são manipulados pelos operadores de seleção, mutação e *crossover*. Elas são submetidas a diversas gerações, em que as consideradas melhores dão origem a novas configurações, ao mesmo tempo em que as consideradas piores são eliminadas, o que mantém a população de configurações constante. No final, as melhores configurações de bombeio são exibidas na interface com o usuário para que ele possa decidir qual daquelas obtidas se adequa melhor às suas necessidades.

Estes são trabalhos diretamente relacionados com a proposta apresentada nesta dissertação. Eles foram desenvolvidos de forma que a vazão de projeto fosse atingida de forma satisfatória pelo sistema de bombeio gerado, seja na forma de critérios das regras de inferência de um sistema especialista ou como função de “fitness” de um sistema baseado em algoritmos genéticos. Entretanto, não foram levados em consideração outros critérios para se chegar a configurações de bombeio adequadas, como o nível de desgaste e o custo dos equipamentos a serem colocados em funcionamento. Outra questão é que tais trabalhos desenvolvidos não levaram em consideração evoluções mais recentes na realização dos cálculos de dimensionamento, como aquelas adotadas pelo sistema API-97 (ver seção 2.6). Idealmente, seria interessante poder comparar estas abordagens existentes com fruto do presente trabalho, colocando lado a lado os resultados obtidos por todos os sistemas. Entretanto, os custos de aquisição destes programas são bastante elevados, o que torna financeiramente inviável a realização das comparações de execução e dos resultados gerados.

4.3 Sistema Especialista para Dimensionamento de Bombeio de Cavidades Progressivas

Um sistema especialista *fuzzy* foi desenvolvido para realizar o dimensionamento de sistemas de bombeio de cavidades progressivas (BCP) [ASSMANN, 2008]. Tal sistema define um conjunto de regras de inferência com as quais é possível determinar qual a melhor configuração de equipamentos a ser instalada no poço para produção por meio desta técnica. As regras foram baseadas no conhecimento do especialista em BCP que, neste caso, é o próprio autor do trabalho citado. O uso de conjuntos *fuzzy* permitiu modelar o conhecimento difuso e, por vezes, impreciso do especialista neste domínio. O usuário interage minimamente com o sistema, preocupando-se somente em fornecer dados referentes ao fluido do poço a ser produzido.

Este trabalho serviu como motivação inicial para a realização do trabalho apresentado nesta dissertação. Almejou-se ter em mãos um sistema que proporcionasse tamanhas facilidades para o domínio de bombeio mecânico e que realizasse o mesmo processo de inferência. O uso de conjuntos *fuzzy* inspirou a especificação das regras de inferência deste trabalho, adequadas ao novo domínio, que possui muitas diferenças quanto ao método de dimensionamento e escolha dos equipamentos.

5 Sistema Especialista para Dimensionamento de Sistemas de Bombeio Mecânico

Este capítulo trata da ferramenta teórica necessária à elaboração da solução a ser proposta por este trabalho. Ele oferece a base necessária para se compreender os mecanismos de inferência e raciocínio empregados na solução proposta por este trabalho.

A proposta deste trabalho é realizar a chamada *Engenharia de Conhecimento*, levantando as principais características observadas por especialistas em dimensionamento de bombeio mecânico. O conhecimento obtido desta etapa será utilizado para especificar um sistema especialista, que deverá dimensionar o sistema de elevação de um poço para produção a partir de suas características de fluido, de reservatório e da demanda de produção estimada.

Para conseguir realizar o dimensionamento, este sistema realizará os cálculos dos parâmetros operacionais por meio da norma API RP 11L (ver seção 2.3). A opção por esta norma foi motivada pela existência de um sistema computacional existente que implementa esta norma (ver seção 2.6), que foi disponibilizado para a equipe do projeto no qual este trabalho está inserido. A modelagem do sistema especialista sobre esta estrutura existente será de grande importância para o artefato computacional fruto desta especificação.

O conhecimento especialista obtido e as regras de inferência foram concebidas com auxílio de conjuntos *fuzzy*. Esta opção se deu por esta abordagem ser capaz de modelar conceitos imprecisos e subjetivos com maior facilidade que a teoria dos conjuntos clássicos. Tais conceitos se mostraram constantes durante o processo de engenharia de conhecimento, o que tornou a escolha pela teoria *fuzzy* um caminho natural para o desenvolvimento do procedimento de inferência do sistema especialista.

Com base nas informações de entrada, o sistema deverá ser capaz de retornar ao usuário um conjunto de configurações de bombeio mecânico que atendam a uma determinada vazão de projeto, porém, sem submeter os equipamentos selecionados a um esforço além daquele que possam suportar. As regras de inferência modeladas se encarregarão de avaliá-las e informar ao usuário quais são as mais adequadas para produção. O procedimento que o sistema realizará será descrito nas seções a seguir.

5.1 Concepção do Sistema

O sistema deverá desempenhar os mesmos passos que um especialista humano seguiria para dimensionar um sistema de bombeio mecânico. Primeiro, ele pegará os dados de entrada referentes às características do fluido e do poço. Logo em seguida, examinará os equipamentos que tem disponível para utilização (unidade de bombeio, colunas de hastes e bomba de fundo) e testará diversas configurações de bombeio montadas a partir deles. A qualquer momento o projetista poderá inserir ou excluir equipamentos da análise, de acordo com seu critério. Para cada configuração montada o sistema calcula os parâmetros operacionais de dimensionamento, com os quais é possível verificar se os equipamentos escolhidos são capazes de suportar o esforço demandado. Para cada configuração montada, essa avaliação deverá ser feita pelo motor de inferência do sistema especialista, que indicará o seu nível de adequação para produção. Se por acaso algum dos equipamentos da configuração for exigido além de sua capacidade, toda a configuração é desconsiderada pelo sistema especialista. Além disso, o sistema evita o máximo possível a subutilização de equipamentos, que poderiam ser utilizados em contextos de produção em que fossem mais exigidos. Aquelas que não foram descartadas pelo sistema serão ao final ordenadas, de acordo com nível de adequação estipulado pelo sistema.

O projeto do sistema especialista será beneficiado pela existência de um programa computacional que realiza os cálculos de dimensionamento utilizando esta norma (ver Seção 2.6). Deste sistema, são aproveitados os cálculos já implementados computacionalmente, que foram migrados para a mesma plataforma corporativa na qual o sistema especialista será construído. A migração do sistema de dimensionamento existente e o sistema fruto do presente trabalho fazem parte do mesmo projeto de pesquisa. Maiores detalhes são apresentados no capítulo 6. Nas subseções seguintes, a especificação das etapas de execução do sistema são detalhadas.

5.1.1 Valores de Entrada

O primeiro passo no projeto do sistema especialista é determinar quais informações o sistema deverá obter externamente. O processo de dimensionamento dos equipamentos parte do pressuposto de se atender a um valor de vazão, que é determinado em conjunto pela equipe de engenharia de reservatório e o engenheiro responsável pelo dimensionamento. Esta informação será denominada dentro do sistema como *Vazão de Projeto* - Q_{proj} . Outro valor a ser passado pelo usuário na interface é a profundidade de instalação da bomba de fundo. A escolha deste parâmetro depende de acompanhamento das características do poço, visando reduzir a interferência de gases na produção do fluido. Também serão dados de entrada informados pelo usuário as pressões na cabeça do poço e no anular do reservatório, que são medidos diretamente no poço e não podem ser obtidos de qualquer banco de dados. Outra informação que o usuário poderá indiretamente fornecer ao sistema é referente à presença de substâncias corrosivas que podem estar misturadas ao fluido. Ela é importante pois um ambiente corrosivo reduz a vida útil dos equipamentos instalados. Isso é informado através da modificação do fator de serviço, que oscila entre 0 (nível máximo de abrasividade) e 1 (abrasividade nula), sendo este último o valor padrão do sistema. Outros dados referentes ao fluido a ser produzido são conseguidos de uma base de dados integrada. São eles (ver detalhes na seção 2.2):

- BSW (*Basic Sediment and Water*)
- RGO (Razão Gás-Óleo)
- Grau API do Óleo
- Densidade do Gás
- Gradiente Geotérmico

5.1.2 Criação de Configurações de Bombeio

Após a obtenção destes valores, será feita a combinação dos equipamentos do sistema de bombeio mecânico. As bombas de fundo, unidades de bombeio e colunas de hastes serão combinadas, gerando configurações de equipamentos a serem dimensionados. O dimensionamento dos equipamentos será regido pela Norma API RP 11L (ver Seção 2.3). A opção de se classificar configurações de equipamentos se deve a própria natureza da norma, que desde a sua concepção fez estudos experimentais sobre sistemas completos em funcionamento em vez de cada equipamento separadamente (ver Seção 2.3).

Segundo a norma API RP 11L, existem configurações de colunas de hastes que somente devem ser combinadas com determinadas bombas de fundo, segundo o diâmetro do seu pistão. Somente configurações que combinarem diâmetros de pistão e colunas de hastes compatíveis serão geradas, reduzindo demanda computacional ao desconsiderar configurações inviáveis.

Para gerar cada configuração de equipamentos, são realizados os cálculos referentes ao dimensionamento para cada uma. Todos os cálculos são feitos para todas as configurações. Nem todos estes parâmetros são levados em consideração no processo de escolha dos equipamentos, mas fazem parte do dimensionamento dos equipamentos, e podem ser levados em consideração por engenheiros para a escolha de alguma configuração gerada. Os seguintes parâmetros, descritos na seção 2.2, são calculados:

- Carga Máxima na Haste Polida ($PPRL$)
- Carga Mínima na Haste Polida ($MPRL$)
- *Peak Torque* (PT)
- Potência na Haste Polida ($PRHP$)
- Vazão Bruta (Q_{bruta})
- Vazão de Óleo (Q_l)
- Tensão Máxima de Trabalho na Haste Polida (S_{max})
- Tensão Mínima de Trabalho na Haste Polida (S_{min})
- Tensão Máxima Admissível (S_{adm})

5.1.3 Etapas do Projeto

O sistema especificado foi planejado para que desempenhe os seguintes passos, na ordem que se segue:

1. Obtenção dos dados de entrada. As informações referentes à vazão de projeto e profundidade de assentamento da bomba de fundo são informados pelo usuário na interface do sistema. Dados referentes ao reservatório e às características do fluido serão obtidos de uma base de dados integrada com informações recentes atualizadas em campo. Elas podem vir de uma instalação existente a ser redimensionada ou podem ser do projeto de uma nova instalação;

2. Acesso a base de dados para conseguir os equipamentos disponíveis para utilização (unidades de bombeio, bombas de fundo e configurações de colunas de hastes determinadas pela norma API RP 11L);
3. Geração de configurações de bombeio mecânico a partir da combinação dos equipamentos conseguidos da base de dados;
4. Para cada configuração gerada, são realizados os cálculos de dimensionamento. Aquelas configurações que tiverem combinações de equipamentos inválidas serão descartadas;

Cálculo dos parâmetros adimensionais independentes, baseados nos dados de entrada;

A partir dos gráficos de projeto, encontrar os parâmetros adimensionais dependentes;

A partir das variáveis dependentes, determinar os parâmetros operacionais de bombeio.

5. A partir dos valores de entrada e dos parâmetros operacionais calculados, submeter cada uma das configurações ao processo de inferência para a classificação dos equipamentos e posteriormente de toda a configuração de acordo com o contexto de operação a que serão submetidas;
6. Exibir na interface com o usuário as melhores configurações de acordo com o critério de classificação adotado.

Cada configuração gerada será submetida a uma avaliação, que verificará se esta é uma configuração válida. Uma configuração será considerada inválida em qualquer uma das seguintes situações:

1. Valor de vazão bruta calculada maior que 1.5 vezes a vazão de projeto estabelecida
2. Valor de peak torque maior que a capacidade ao torque da unidade de bombeio
3. Valor de carga máxima na haste polida maior que a capacidade estrutural da unidade de bombeio
4. Valor de carga mínima na haste polida menor que zero
5. Valor de grau de utilização das hastes maior que 100%

Todas aquelas configurações que passarem pelo filtro descrito acima serão então guardadas pelo sistema especialista para serem submetidas a um processo de inferência, que determinará quais daquelas configurações são as mais aptas a trabalharem no poço selecionado. Os critérios de avaliação dos equipamentos de bombeio foram obtidos junto a especialistas em bombeio mecânico e de documentação elaborada pelos mesmos, sendo então mapeadas em regras de inferência norteadas pela teoria dos conjuntos *fuzzy*. Tais critérios serão explanados na seção seguinte. Os passos realizados pelo sistema especialista podem ser visualizados na Figura 19.

5.2 Processo de Inferência

Os parâmetros operacionais calculados no dimensionamento serão utilizados no processo de inferência para avaliar quais as melhores configurações de bombeio geradas para se trabalhar no poço selecionado. Além destes parâmetros calculados, outro valor a ser utilizado no processamento das regras de inferência é a frequência de bombeio selecionada pela configuração.

Para que possam ser usadas, estas variáveis precisarão ser fuzzificadas, já que as regras de inferência fazem uso da teoria dos conjuntos fuzzy. Dessa forma, no lugar de variáveis booleanas indicando se uma afirmação é verdadeira ou falsa, são utilizadas variáveis de ponto flutuante, que assumem valores 0 (totalmente falso), 1 (totalmente verdadeiro) ou entre 0 e 1 (grau parcial de verdade). Estes valores que podem ser atribuídos às variáveis são denominados valores lingüísticos, e são representados no processo de inferência por adjetivos que representam características notadamente imprecisa, como Baixo, Alto, Ruim ou Ótimo. Quando se procede com a fuzzificação de alguma variável, estabelece-se uma função de pertinência que indica o grau de verdade desta variável em relação a algum valor lingüístico (ver seção 3.1).

No processo de fuzzificação, costuma-se utilizar algumas funções padronizadas para ilustrar os possíveis graus de verdade que uma variável pode assumir em relação a alguma propriedade/conjunto. Via de regra, dá-se preferência pelo uso de funções lineares, como a Trapezoidal, a Triangular ou mesmo a Reta, já que possuem processamento computacional mais rápido e sem perda significativa de precisão nos resultados em relação a outras funções, como a Gaussiana ou a função Sigmóide (ver seção 3.1).

Apesar de serem geradas configurações completas de bombeio mecânico, a classificação é feita por partes, avaliando cada equipamento do sistema de bombeio mecânico para que, no final, estes resultados preliminares possam convergir para um único índice

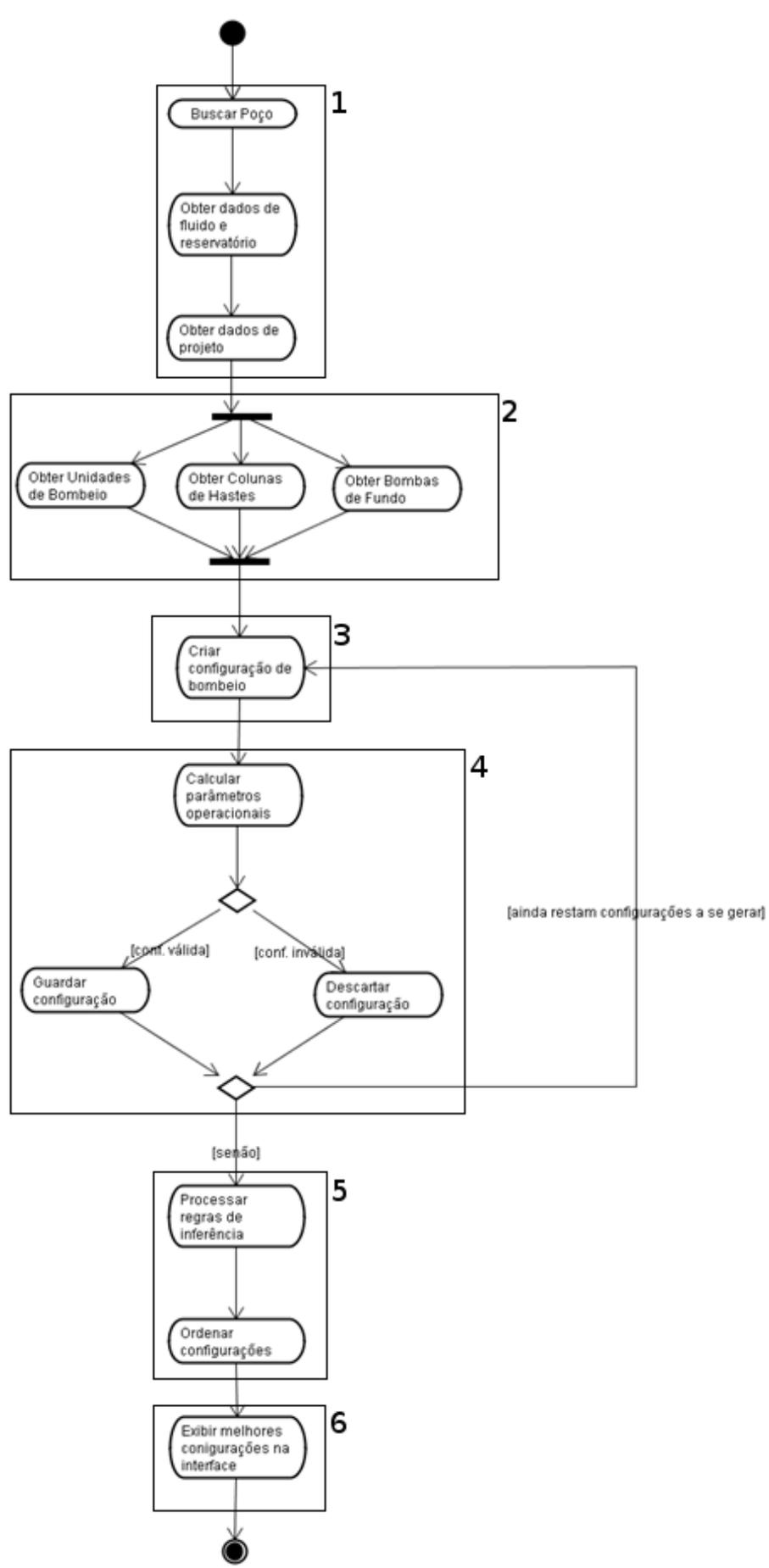


Figura 19: Diagrama de atividades mostrando a seqüência de ações realizadas pelo sistema especialista

global. Primeiramente, é avaliada a bomba de fundo da configuração, já que esta é a principal responsável pela vazão obtida no pelo sistema, ainda que esta não seja a única responsável por este parâmetro.

5.2.1 Classificação da bomba de fundo

Para que se possa definir quais bombas de fundo atendem aos critérios de vazão estabelecidos, é necessário que cada uma delas sejam combinadas com configurações de colunas de hastes, curso e CPM de unidades de bombeio. Cada configuração dessa conterá informações de diâmetro de pistão, número API da coluna de hastes, curso e CPM (estes dois últimos relacionados à unidade de bombeio da configuração). De cada uma, serão realizados os cálculos para se obter um valor de vazão bruta, que fará uso também de dados do reservatório, comum a todas elas.

Para avaliar a bomba de fundo, é necessária a fuzzificação de dois parâmetros:

1. Eficiência Volumétrica (EfVol)
2. Nível de Atendimento de Vazão (NAV)

A eficiência volumétrica indica o quanto do volume deslocado pela bomba de fundo está sendo efetivamente deslocado até a superfície. Seu cálculo é dado pela seguinte fórmula:

$$EfVol = \frac{Q_{bruta}}{PD}$$

Um percentual muito baixo indica que a bomba não está produzindo adequadamente e que possivelmente ocorrerá perda significativa na produção. Para fuzzificar esta variável, é utilizada a função de pertinência ilustrada na Figura 20. Aqui são definidos graus de pertinência aos conjuntos fuzzy "Baixo" e "Alto", respectivamente, que serão valores lingüísticos a serem utilizados na entrada de regras de inferência que avaliarão a bomba de fundo.

Já o nível de atendimento de vazão determina o quanto da vazão de projeto foi atendida pela configuração de bombeio. Ele é calculado da seguinte forma:

$$NAV = \frac{Q_{bruta}}{Q_{proj}}$$

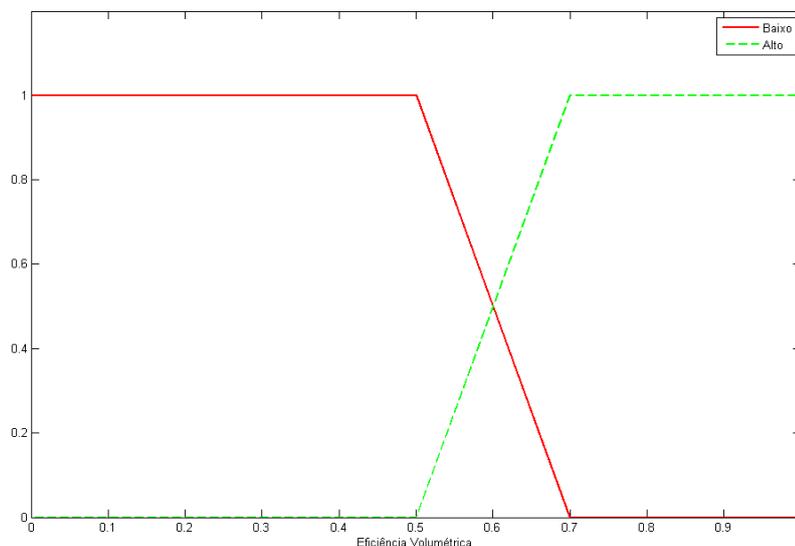


Figura 20: Funções de fuzzificação da variável “Eficiência Volumétrica”

Via de regra, a vazão bruta deve ser, no mínimo, a própria vazão de projeto. Entretanto, há casos em que um sistema de bombeio bem configurado, mas que não atinja totalmente a vazão desejada, possa ser levado em consideração e aplicado para produção no poço. Neste sistema, foi estipulado também um valor de vazão máxima, com o intuito de não se chegar a uma vazão acima daquela que o reservatório possa prover. A explicação para a fixação do valor de 1,5 vezes a vazão de projeto se perdeu com o tempo, já que nem o engenheiro especialista que estipulou este valor no sistema de dimensionamento original se recorda do por que deste valor especificamente. As funções de pertinência para fuzzificação desta variável podem ser vistas na Figura 21. Nela, são representados os gráficos das funções de pertinência aos conjuntos "Baixo", "Médio" e "Alto", respectivamente.

Após a fuzzificação dos valores acima, o resultado desta etapa será passada como entrada para um conjunto de regras de inferência sobre a avaliação da bomba de fundo. As regras são da forma:

$$IF\ x\ is\ X\ AND\ y\ is\ Y\ THEN\ z\ is\ Z$$

Por exemplo, para o caso da eficiência volumétrica (EV) ser baixa e o atendimento da vazão (AV) ser alto, temos a regra de inferência:

$$IF\ EV\ is\ BAIXO\ AND\ AV\ is\ ALTO\ THEN\ BOMBA\ is\ RUIM$$

Evidentemente que, por se tratar de conjuntos fuzzy, os resultados não são restritos à

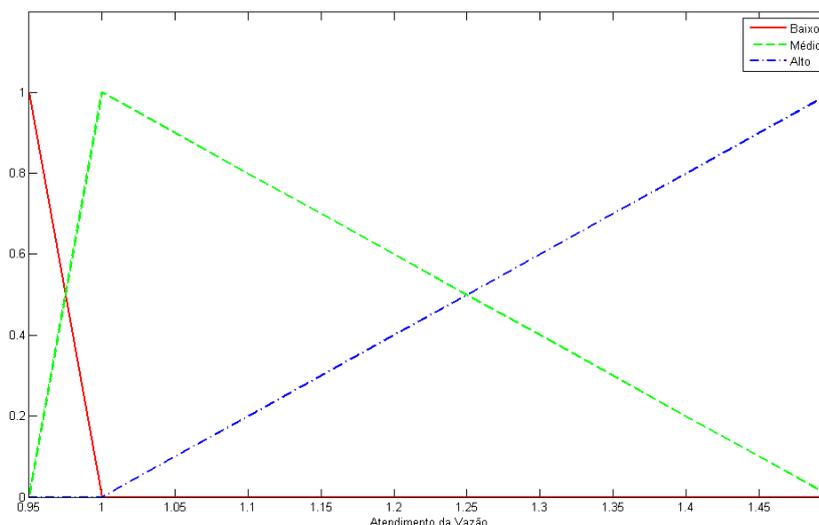


Figura 21: Funções de fuzzificação da variável “Nível de Atendimento de Vazão”

dicotomia verdadeiro/falso da lógica clássica. As variáveis serão atribuídas com valores entre zero e um, representando o grau de verdade resultante. Para a T-norma, operador equivalente à conjunção para a lógica fuzzy, foi selecionada a função $\text{MIN}(x,y)$, que retorna o menor dos valores avaliados e é largamente utilizada e aceita entre desenvolvedores de sistemas fuzzy (ver seção 3.2). As regras para inferência da bomba de fundo resultam na atribuição de graus de pertinência para as variáveis lingüísticas “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”. Elas podem ser visualizadas, de forma resumida, na tabela A.2.2 a seguir:

Bomba de Fundo			
	Atendimento de Vazão		
Eficiência Volumétrica	Baixo	Médio	Alto
Baixo	Ruim	Ruim	Ruim
Alto	Bom	Ótima	Bom

Tabela 9: Regras de Inferência para classificação da Bomba de Fundo

À exceção do valor lingüístico “Ótimo”, as regras inferem resultados em comum. Para evitar possíveis conflitos, os resultados de saída passam por um processo de composição, com o qual se chegará a um único valor para os valores lingüísticos de saída. Para fazer a composição destes valores, foi escolhido o operador $\text{MAX}(x,y)$ (ver seção 3.2), que retorna o maior dentre os valores avaliados.

O seguinte exemplo fictício ilustra o processo de decisão descrito. Previu-se uma vazão de projeto igual a $15\text{m}^3/\text{dia}$. Após os cálculos de dimensionamento, obteve-se como vazão bruta $19.55\text{m}^3/\text{dia}$ e um deslocamento volumétrico de $20.58\text{m}^3/\text{dia}$. Sendo assim, temos como nível de atendimento de vazão 1.3036. Pelas funções de fuzzificação

definidas, ela obteria graus de pertinência 0.0 ao conjunto “Baixo”, 0.3928 ao conjunto “Médio” e 0.6072 ao conjunto “Alto”. Ainda de acordo com os parâmetros calculados, seria obtida uma eficiência volumétrica de 0.95. De acordo com as funções de fuzzificação definidas, ela obteria graus de pertinência 0.0 ao conjunto “Baixo” e 1.0 ao conjunto “Alto”. Submetendo estes valores lingüísticos às regras de inferência elaboradas, chega-se ao resultado descrito na Tabela 10.

Bomba de Fundo			
	Atendimento de Vazão		
Eficiência Volumétrica	<i>Baixo</i> =0.0	<i>Médio</i> =0.3928	<i>Alto</i> =0.6072
<i>Baixo</i> =0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0
<i>Alto</i> =1.0	Bom=0.0	Ótimo=0.3928	Bom=0.6072

Tabela 10: Exemplo de classificação da Bomba de Fundo

5.2.2 Classificação da coluna de hastes

Os critérios definidos para a classificação da coluna de hastes de uma configuração foram o seu grau de utilização e o custo da coluna. O grau de utilização das hastes é um dos itens calculados durante o processo de dimensionamento e reflete o desgaste que a coluna de hastes sofrerá no decorrer do seu uso. Quanto mais elevado for o grau de utilização, determinado pelas tensões que atuam ao longo de seu comprimento durante o ciclo alternativo, maior o risco de ruptura do equipamento. Em condições hostis, como presença de ácidos, produção de areia ou parafinação, esse risco é ainda maior pois tais fatores aceleram seu processo de desgaste ao reduzir a tensão máxima suportada pelo equipamento. Em contrapartida, se o grau de utilização for muito baixo, indica que a coluna de hastes está sendo subutilizada, o que se configura numa desvantagem econômica na utilização deste recurso. O grau de utilização das hastes é calculado da seguinte forma:

$$Util\ Hastes = \frac{S_{max}}{S_{adm}} \quad (5.1)$$

onde S_{max} é a tensão máxima de trabalho na haste e S_{adm} é a tensão máxima admissível, também denominada o nível de resistência à fadiga da haste. O cálculo destes parâmetros são mostrados na seção 2.5. A utilização das hastes terá graus de pertinência aos conjuntos “Baixo”, “Médio” e “Alto” de acordo com o seu valor obtido, obedecendo à função mostrada pelo gráfico da Figura 22.

A coluna de hastes é composta por diversas hastes concatenadas que juntas, são capazes de alcançar a bomba de fundo, ligando-a à coluna de hastes. Estas hastes pos-

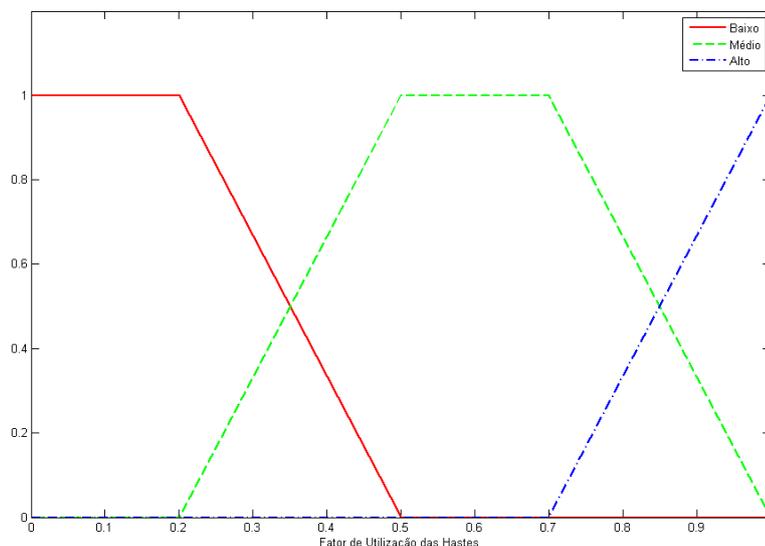


Figura 22: Funções de fuzzificação da variável “Grau de Utilização da Coluna Hastes”

suem diâmetros de diferentes tamanhos padronizados pela norma API SPEC 11B [American Petroleum Institute, 1998] e cujos percentuais de combinação foram normalizados pela norma API RP 11L [American Petroleum Institute, 1988]. Especialistas avaliam que, para grandes profundidades, deve-se preferir o uso de hastes heterogêneas (compostas por hastes de diferentes diâmetros), pois estas reagem melhor ao movimento alternado imprimido pela unidade de bombeio [COSTA, 2005]. É possível verificar esta heterogeneidade através do número API da coluna de hastes. O número é composto por dois códigos, que mostram o maior e o menor diâmetro presente na composição da coluna, bem como os diâmetros intermediários, em oitavos de polegada. Por exemplo, o código 86 denota que a coluna é composta por hastes de $1, \frac{7}{8}$ e $\frac{3}{4}$ de polegada.

O custo de utilização desta coluna é levado em consideração pelo engenheiro no momento de projetar o sistema de bombeio mecânico. Este valor aumenta à medida que são escolhidas hastes de diâmetros maiores. Outro fator determinante para o custo da coluna é o grau do aço da haste, já que o custo varia de acordo com a liga que seja utilizada. Cabe frisar aqui que, ao montar a coluna, todas as hastes devem ter o mesmo grau. Estas informações foram obtidas através de entrevistas com especialista e baseado nelas uma função de custo da coluna de hastes foi então modelada. Ela é dada pela fórmula abaixo:

$$Custo = M \sum_{i=0}^n (D_i^2 R_i)$$

onde n é o número de seções de hastes de diferentes diâmetros que podem formar a coluna, D_i é cada um dos tipos de diâmetros que compõem a coluna, R_i é o percentual de cada tipo de haste na coluna em questão, e M é o custo relativo do material da haste em comparação com aquelas de menor valor de mercado, estabelecido conforme a Tabela 11.

Custo Relativo do Material	
Grau do Aço	Custo
<i>Grau C</i>	1.0
<i>Grau D</i>	1.0
<i>Grau K</i>	1.2
<i>Electra</i>	1.2
<i>UHS</i>	1.5

Tabela 11: Custo relativo de hastes de bombeio por material

As funções de fuzzificação do custo da coluna de hastes podem ser visualizadas na Figura 23. São definidas funções de pertinência aos conjuntos “Baixo”, “Médio” e “Alto”, respectivamente.

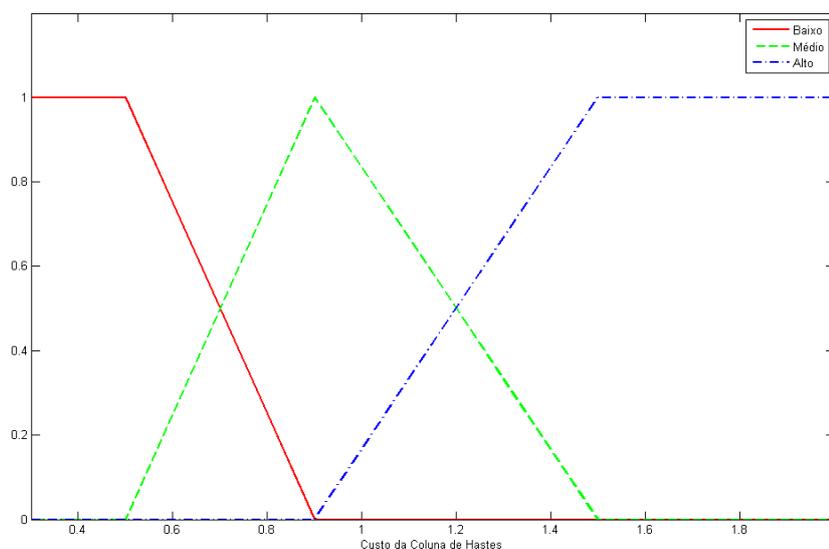


Figura 23: Funções de fuzzificação da variável “Custo da Coluna de Hastes”

Após a atribuição de valores a estas variáveis lingüísticas, cada coluna de hastes é submetida a um conjunto de regras de inferência para que se possa classificá-las. As regras são do formato *IF x is A THEN y is B*, sendo x e y as variáveis lingüísticas de entrada e saída, respectivamente, e A e B os valores lingüísticos que podem ser atribuídos a cada uma. As regras de inferência são mostradas na Tabela 12. Elas foram especificadas partindo da tese de que uma situação ideal é quando o desgaste de utilização e o custo de construção das hastes seja o menor possível. Quando algum destes valores já chega a

um patamar um pouco maior, eles ainda são considerados interessantes para utilização, mas quando se aproximam dos níveis máximo, o uso de tal coluna de hastes já não é tão atrativo para produção naquele contexto.

Coluna de Hastes			
	Custo		
%Util. Hastes	Baixo	Médio	Alto
Baixo	Ótimo	Bom	Ruim
Médio	Bom	Bom	Ruim
Alto	Ruim	Ruim	Ruim

Tabela 12: Regras de Inferência para classificação da Coluna de Hastes

O seguinte exemplo ilustra o processo descrito. Suponha que, após os cálculos de dimensionamento, tenha-se obtido os valores de $7766.37psi$ para a tensão máxima de trabalho e de $25008.25psi$ para a tensão máxima admissível. Dessa forma, chega-se ao percentual de utilização das hastes de 0.3106. Pelas funções de fuzzificação definidas, chega-se aos graus de pertinência 0.6317 ao conjunto “Baixo”, 0.3683 ao conjunto “Médio” e 0.0 ao conjunto “Alto”. Além disso, foi calculado um custo relativo de 0.8305 para a coluna de hastes montada. De acordo com as funções de fuzzificação, chega-se aos graus de pertinência 0.1737 ao conjunto “Baixo”, 0.8263 ao conjunto “Médio” e 0.0 ao conjunto “Alto”. Submetendo estes valores lingüísticos às regras de inferência elaboradas, obter-se-ia o resultado descrito na Tabela 13.

Coluna de Hastes			
	Custo		
%Util. Hastes	Baixo=0.1737	Médio=0.8263	Alto=0.0
Baixo=0.6317	Ótimo=0.1737	Bom=0.6317	Ruim=0.0
Médio=0.3683	Bom=0.1737	Bom=0.3683	Ruim=0.0
Alto=0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0

Tabela 13: Exemplo de classificação da Coluna de Hastes

Uma outra decisão a ser tomada pelo sistema especialista é o número de tipos de hastes que irão compor a coluna, que será determinada pela profundidade de assentamento da bomba de fundo. Esta etapa é um processo à parte do sistema especialista, e não tem impacto sobre o processo de inferência da coluna de hastes. Optou-se por definir limites discretos para a mudança de classificação da profundidade da bomba, que pode ser rasa, intermediária, funda e muito funda. A opção por esta abordagem foi feita por ser a saída do processo de decisão um elemento naturalmente preciso, que é o número de tipos de haste. Para cada uma delas, a coluna pode ter um, dois, três ou quatro tipos de hastes. Os limites podem ser visualizados na Tabela 14. Os intervalos de profundidade foram estabelecidos após entrevista realizada com engenheiro especialista em dimensionamento.

Classificação do Poço	Profundidade	Número de Tipos de Haste
Raso	até 600m	1
Intermediário	entre 601 e 900m	2
Fundo	entre 901 e 1500m	3
Muito Fundo	a partir de 1501m	4

Tabela 14: Relação Profundidade do Poço *versus* Heterogeneidade da Coluna de Hastes

5.2.3 Classificação da unidade de bombeio

A unidade de bombeio será escolhida a partir de dois critérios distintos: a utilização da sua estrutura e a solicitação do seu redutor durante sua operação. Os parâmetros utilizados para a classificação da utilização da estrutura da unidade de bombeio são a Carga máxima na haste Polida (*Peak Polished Rod Load* – PPRL) e a Carga Mínima na Haste Polida (*Minimun Polished Rod Load* - MPRL). Para a classificação do nível de solicitação do redutor, são utilizadas os parâmetros de Torque Máximo no redutor (*Peak Torque* – PT) e a frequência de bombeamento (CPM).

5.2.3.1 Classificação da Exigência do Redutor

O nível de solicitação do redutor de velocidade da unidade de bombeio pode ser verificado por meio do parâmetro operacional *Peak Torque* (também chamado de Torque máximo no redutor) e do parâmetro de entrada frequência de bombeio. O *Peak Torque* é calculado pela norma API RP 11L de acordo com a fórmula descrita pela equação 2.15 (ver Seção 2.3). Este valor é então comparado com a capacidade ao torque (*Reducer Rating* - RR) da unidade de bombeio (obtida de seu código API [American Petroleum Institute, 1994]), que é o torque máximo que pode ser exigido do eixo de saída do redutor, quando em operação [COSTA, 2005]. O valor máximo de torque não poderá ser maior que a capacidade do redutor, o que poderia causar a quebra do equipamento. Para efeito de comparação, optou-se então pela *fuzzificação* da razão entre o *Peak Torque* e a capacidade ao torque do redutor:

$$\%Torque = \frac{PT}{RR} \quad (5.2)$$

Assim, são definidos valores lingüísticos que podem ser atribuídos a esta razão do torque. Foram definidas funções de pertinência aos conjuntos “Baixo”, “Médio” e “Alto” que variam de acordo com a proximidade do *Peak Torque* à capacidade determinada pela unidade de bombeio. O gráfico destas funções pode ser visualizado na Figura 24.

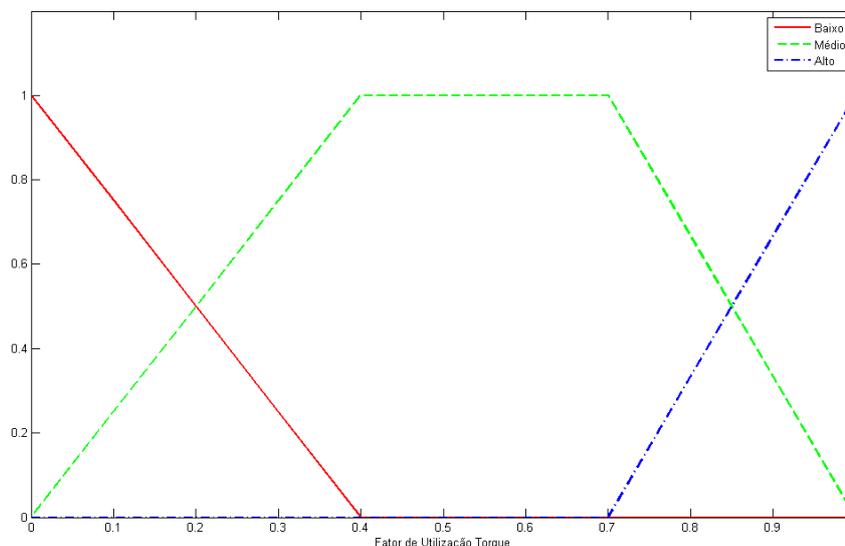


Figura 24: Gráfico da Função de Pertinência do *Peak Torque* aos seus respectivos conjuntos.

A frequência de bombeio é um valor de entrada do dimensionamento do sistema. No procedimento convencional, ele é informado pelo usuário na entrada do programa. Como este valor é diretamente proporcional ao deslocamento volumétrico (ver equação 2.19), valores maiores de frequência de bombeio contribuem diretamente também para o aumento da vazão bruta obtida (ver equação 2.21). Porém, a frequência de bombeio é também diretamente proporcional à potência requerida para guiar a haste polida (ver equação 2.13). Um valor de potência muito alto poderia levar a uma sobrecarga das partes da unidade de bombeio, sobretudo o motor que alimenta o movimento da viga. No contexto apresentado, verificou-se junto a especialista em bombeio mecânico as faixas de valores para se classificar a frequência de bombeio nos valores lingüísticos “Baixa”, “Média” e “Alta”. As funções de pertinência a estes conjuntos podem ser vistas na Figura 25.

Após avaliar os graus de pertinência das propriedades de uso do redutor mencionadas, é preciso submetê-las a um conjunto de regras de inferência para determinar o nível de adequação do redutor dentro desta configuração de unidade de bombeio gerada. Foram definidas nove regras de inferência no formato *IF x is A AND y is B THEN z is C*, onde x, y e z são as variáveis lingüísticas sendo avaliadas e A, B e C são os valores lingüísticos que podem ser atribuídos às variáveis são utilizadas. No processo de inferência, são utilizadas as operações *fuzzy* descritas na seção 3.2.

A consolidação das regras de inferência para o redutor pode ser visualizada na Tabela 15. Elas foram concebidas partindo do pressuposto de que a melhor situação para o torque

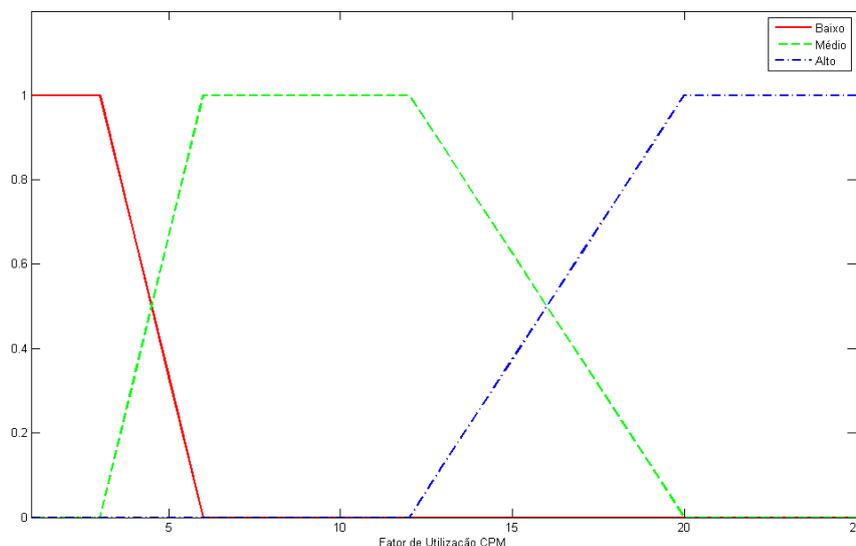


Figura 25: Gráfico da Função de Pertinência da Frequência de Bombeio aos seus respectivos conjuntos.

máximo no redutor e a frequência de bombeio atingem níveis intermediários. Em relação ao torque, se o valor for maior, poderá danificar o equipamento. Ao mesmo tempo, se forem valores muito baixos, o equipamento poderá estar sendo subutilizado e poderia, por exemplo, estar sendo utilizado em outro contexto de produção, onde pudesse ser mais exigido. Outro conceito pressuposto foi que frequências muito altas exigiriam potências cada vez mais altas. Ao mesmo tempo, valores muito baixos não seriam suficientes para uma lubrificação interna adequada no redutor [COSTA, 2005]. Além disso, para conseguir atingir a vazão desejada com baixa frequência, seria necessário compensar com cursos elevados, o que aumentaria a demanda por torque.

	Frequência de Bombeio		
Torque	Baixo	Médio	Alto
Baixo	Bom	Bom	Ruim
Médio	Bom	Ótimo	Ruim
Alto	Ruim	Ruim	Ruim

Tabela 15: Regras de Inferência para classificação da solicitação do Redutor

Um exemplo fictício ilustra a aplicação destas regras. Após os cálculos de dimensionamento, chega-se ao valor de Peak Torque igual a $24251.90 lb.in.$ Consultando o código API da unidade de bombeio (057-109-48), verifica-se que a capacidade ao torque é de $57000 lb.in.$ Com a obtenção destes dois valores, chega-se ao nível de exigência de torque. Aplicando as funções de fuzzificação especificadas, chega-se aos graus de pertinência 0.0 ao conjunto “Baixo”, 1.0 ao conjunto “Médio” e 0.0 ao conjunto “Alto”. Ainda

neste exemplo, tem-se como valor de frequência de bombeio 19 CPM. Para esta variável, obtém-se os graus de pertinência 0.0 ao conjunto “Baixo”, 0.125 ao conjunto “Médio” e 0.875 ao conjunto “Alto”. Submetendo estes valores lingüísticos às regras de inferência, obtém-se o resultado descrito na Tabela 16.

	Frequência de Bombeio		
Torque	<i>Baixo</i> =0.0	<i>Médio</i> =0.125	<i>Alto</i> =0.875
<i>Baixo</i> =0.0	Bom=0.0	Bom=0.0	Ruim=0.0
<i>Médio</i> =1.0	Bom=0.0	Ótimo=0.125	Ruim=0.875
<i>Alto</i> =0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0

Tabela 16: Exemplo de classificação da solicitação do Redutor

5.2.3.2 Classificação da Exigência da Estrutura

Os parâmetros de utilização da estrutura da unidade de bombeio dizem respeito às cargas a que a unidade de bombeio é submetida a cada ciclo. Os parâmetros operacionais calculados no dimensionamento que podem indicar esta característica são justamente as cargas máxima e mínima na haste polida. O cálculo da carga máxima (PPRL) é designado pela norma API RP 11L de acordo com a fórmula descrita pela equação 2.11 (ver Seção 2.3). Este valor é então comparado com a capacidade estrutural (*Structure Capacity* - SC) da unidade de bombeio (obtida de seu código API [American Petroleum Institute, 1994]). Seu valor não pode ser ultrapassado pela carga máxima sob o risco da quebra do equipamento. Mesmo sendo menor, engenheiros consideram um valor limite de carga máxima para um uso seguro da unidade de bombeio. Neste trabalho considera-se também um valor mínimo para a carga máxima, evitando que unidades de bombeio maiores, que suportam cargas maiores e custam mais caro, sejam utilizadas em situações onde não sejam razoavelmente exigidas. A variável a ser *fuzzificada* neste contexto será a razão entre os dois valores:

$$\%Carga_{Max} = \frac{PPRL}{SC} \quad (5.3)$$

Considera-se então um conjunto de funções de pertinência aos conjuntos “Baixa”, “Média” e “Alta”, aos quais a carga máxima pode pertencer de acordo com a sua proximidade ao valor da capacidade estrutural da unidade de bombeio. O grau de pertinência da razão de carga máxima a estes conjuntos citados pode ser visualizado no gráfico da Figura 26.

O cálculo da carga mínima é designado pela norma API RP 11L de acordo com a fórmula descrita pela equação 2.12 (ver Seção 2.3). Segundo especialistas, o valor da

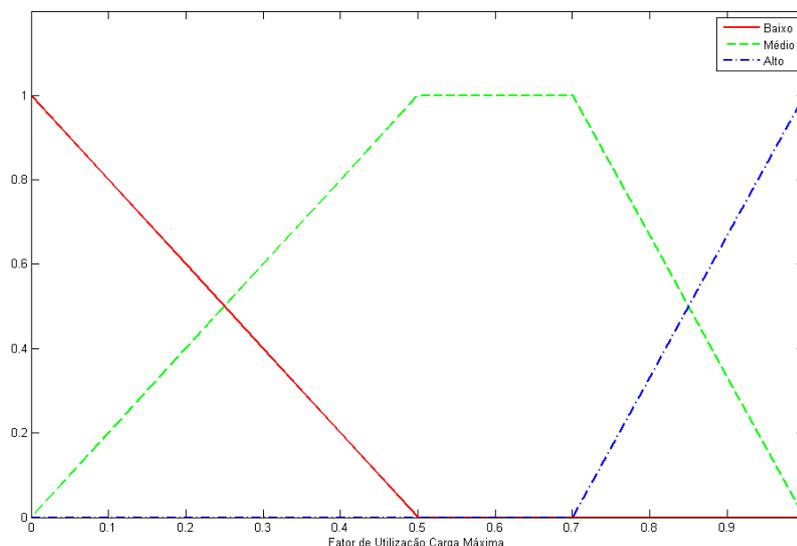


Figura 26: Gráfico da Função de Pertinência da carga máxima da Unidade de Bombeio aos seus respectivos conjuntos.

carga mínima deverá ser o mais distante possível de zero para evitar batidas de cabresto no ciclo descendente da unidade de bombeio. Para modelar esta propriedade de adequação do valor de carga mínima, foi definida a razão entre a carga mínima e a capacidade estrutural da unidade de bombeio, sendo então *fuzzificada*:

$$\%Carga_{Min} = \frac{MPRL}{SC} \quad (5.4)$$

Considera-se então um conjunto de funções de pertinência aos conjuntos “Baixa” e “Alta” aos quais a carga mínima pode pertencer de acordo com a sua proximidade ao valor da capacidade estrutural. O grau de pertinência da razão de carga mínima a estes conjuntos citados pode ser visualizado no gráfico da Figura 27.

Após avaliar o grau de pertinência das variáveis lingüísticas selecionadas para a unidade de bombeio, elas devem ser passar por um processo de inferência no qual a variável “Estrutura da UB” deverá ser assinalada com os valores de “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”, a depender das regras de avaliação determinadas e dos graus de pertinência que foram atribuídas às variáveis lingüísticas de entrada. A consolidação destas regras podem ser vistas na Tabela 17.

Como exemplo ilustrativo, tem-se que, após a realização dos cálculos de dimensionamento, obtém-se o valor de 6099.71lbs para a carga máxima na haste polida. Verifica-se no código API da unidade de bombeio (057-109-48) que a capacidade estrutural do

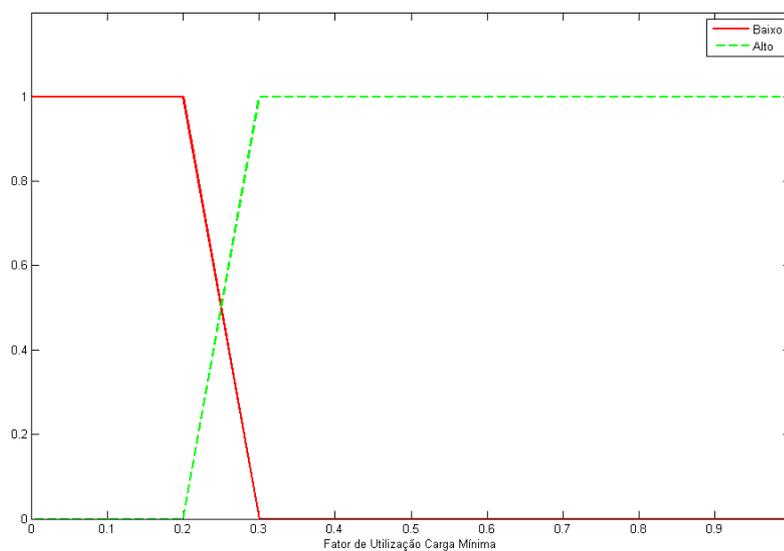


Figura 27: Gráfico da Função de Pertinência da carga mínima da Unidade de Bombeio aos seus respectivos conjuntos.

Carga Mínima	Carga Máxima		
	Baixa	Médio	Alto
Baixa	Ruim	Ruim	Ruim
Alto	Bom	Ótimo	Ruim

Tabela 17: Regras de Inferência para classificação da exigência da estrutura

equipamento é 10900*lbs*. Assim, o grau de solicitação da estrutura da unidade de bombeio é de 0.5596. Submetendo este valor às funções de fuzzificação, chega-se aos graus de pertinência 0.0 ao conjunto “Baixo”, 1.0 ao conjunto “Médio” e 0.0 ao conjunto “Alto”. Neste mesmo contexto, encontra-se o valor de 3502.19*lbs* para a carga mínima na haste polida. Pelas funções de pertinência especificadas, encontra-se os graus de 0.0 ao conjunto “Baixo” e 1.0 ao conjunto “Alto”. A aplicação destes valores às regras de inferência do uso da estrutura da unidade de bombeio podem ser vistas na Tabela 18.

	Carga Máxima		
Carga Mínima	<i>Baixo</i> =0.0	<i>Médio</i> =1.0	<i>Alto</i> =0.0
<i>Baixo</i> =0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0	Ruim=0.0
<i>Alto</i> =1.0	Bom=0.0	Ótimo=1.0	Ruim=0.0

Tabela 18: Regras de Inferência para classificação da exigência da estrutura

5.2.3.3 Regras de Inferência para Informações da Unidade de Bombeio Consolidadas

Após a verificação destas propriedades separadamente, elas devem juntas chegar a um conceito único para a unidade de bombeio. As regras de inferência para avaliação terão como entrada as variáveis lingüísticas que classificaram a utilização da estrutura e a solicitação do redutor. A saída do processo de inferência classificará a unidade de bombeio com os valores lingüísticos “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”. O formato de descrição das regras segue a mesma linha daquele seguido para a classificação das propriedades em separado. As regras podem ser visualizadas na Tabela 19.

	Estrutura		
Redutor	<i>Ruim</i>	<i>Bom</i>	<i>Ótimo</i>
<i>Ruim</i>	Ruim	Ruim	Ruim
<i>Bom</i>	Ruim	Bom	Bom
<i>Ótimo</i>	Ruim	Bom	Ótimo

Tabela 19: Regras de Inferência para classificação da Unidade de Bombeio

5.2.4 Classificação do Sistema de Bombeio

Cada uma das configurações de bombeio deverá levar em conta os resultados do processo de inferência individual de seus equipamentos para então poderem ser classificadas e ordenadas de acordo com a sua adequação no contexto de produção. As variáveis “bomba de fundo”, “coluna de hastes” e “unidade de bombeio”, durante o processo de inferência, são atribuídas com os valores lingüísticos “Ruim”, “Bom” e “Ótimo” por diversas regras que lhes retornam diferentes graus de pertinência. Para se chegar a um

único valor, elas são submetidas a um processo de agregação pelo método de Sugeno (ver Seção 3.3), com o qual possam ter um único valor de pertinência aos respectivos conjuntos. A sobreposição dos diferentes valores encontrados para os conjuntos *singleton* de saída levam a um processo correspondente ao uso do operador *fuzzy* “OR”, que neste trabalho corresponde à operação “MÁXIMO”. Ou seja, a saída do processo de agregação será o maior valor daqueles encontrados para o valor lingüístico correspondente.

Após a agregação dos valores de saída dos equipamentos, os valores obtidos são submetidos a novas regras de inferência, estas relativas à classificação da configuração de bombeio mecânico. Estas regras seguem o mesmo formato das regras anteriores, em que todos os valores de entrada são avaliados pelo operador “AND” e então geram um grau de pertinência à variável lingüística de saída, que são também denominadas “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”. As regras de inferência podem ser visualizadas nas Tabelas 20, 21 e 22. Sua concepção seguiu o seguinte raciocínio: sempre que algum dos antecedentes for “Bom”, automaticamente o conseqüente também terá este valor lingüístico, com grau de pertinência que a regra determinar. Pela mesma idéia, sempre que algum dos antecedentes for “Ruim”, automaticamente o conseqüente também terá este valor lingüístico, sobrepondo a idéia anterior. A única regra cujo conseqüente será o valor lingüístico “Ótimo” é quando todos os antecedentes forem este próprio, como pode ser visto na Tabela 22.

Bomba de Fundo Ruim			
	Coluna de Hastes		
Unidade de Bombeio	<i>Ruim</i>	<i>Bom</i>	<i>Ótimo</i>
<i>Ruim</i>	Ruim	Ruim	Ruim
<i>Bom</i>	Ruim	Ruim	Ruim
<i>Ótimo</i>	Ruim	Ruim	Ruim

Tabela 20: Regras de Inferência para classificação da configuração (1)

Bomba de Fundo Boa			
	Coluna de Hastes		
Unidade de Bombeio	<i>Ruim</i>	<i>Bom</i>	<i>Ótimo</i>
<i>Ruim</i>	Ruim	Ruim	Ruim
<i>Bom</i>	Ruim	Bom	Bom
<i>Ótimo</i>	Ruim	Bom	Bom

Tabela 21: Regras de Inferência para classificação da configuração (2)

Bomba de Fundo Ótima			
	Coluna de Hastes		
Unidade de Bombeio	<i>Ruim</i>	<i>Bom</i>	<i>Ótimo</i>
<i>Ruim</i>	Ruim	Ruim	Ruim
<i>Bom</i>	Ruim	Bom	Bom
<i>Ótimo</i>	Ruim	Bom	Ótimo

Tabela 22: Regras de Inferência para classificação da configuração (3)

Ao final do processo de inferência, os resultados de saída são submetidos a um processo de agregação, da mesma forma como descrito para as saídas da inferência sobre os equipamentos individualmente. Os valores obtidos corresponderão então aos graus de pertinência da configuração de bombeio mecânico aos conjuntos “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”. Seus graus de pertinência podem ser vistos na Figura 28. Porém, tais resultados ainda não são o meio mais adequado para poder comparar as configurações umas com as outras. Por isso, o sistema especialista submete estes resultados a um processo de *defuzzificação* com o qual possa se chegar a um único valor, definido aqui para se situar entre 0 e 100. O método de *defuzzificação* definido para este processo foi a média dos pesos (ver seção 3.4) e se determinou que os conjuntos de saída *singleton* conteriam os elementos 15.625 no conjunto “Ruim”, 50 no conjunto “Bom” e 84.375 no conjunto “Ótimo”. Estes valores correspondem ao Centro de Gravidade de cada um dos gráficos das respectivas funções de pertinência, justamente o ponto em que sua área é dividida em partes iguais. A fórmula de *defuzzificação* ficará então da seguinte forma:

$$W_A = \frac{\mu(k1) \times 15.625 + \mu(k2) \times 50 + \mu(k3) \times 84.375}{\mu(k1) + \mu(k2) + \mu(k3)}$$

onde $\mu(k1)$, $\mu(k2)$ e $\mu(k3)$ correspondem aos graus de pertinência aos conjuntos “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”, respectivamente, obtidos do processo de agregação. O valor resultante deste cálculo indicará o nível de adequação daquela configuração para a produção no poço determinado e nas condições estabelecidas pelo usuário. Aquelas configurações que obtiverem os melhores resultados neste processo serão finalmente exibidas para o usuário como sugestões de dimensionamento, ordenadas de acordo por este valor obtido.

A última etapa do processo de inferência é a ordenação das configurações. Para cada configuração de equipamentos gerada, foram experimentados diversos regimes de bombeio, com diferentes valores de curso e frequência. A cada iteração, é realizada a *defuzzificação* da configuração com o regime adotado naquele passo. Após todos os regimes não descartados por vazão incompatível serem experimentados, as configurações se juntam a outras existentes e novamente ordenadas de acordo com o valor obtido na *defuzzificação*, para que então sejam descartadas as piores configurações obtidas até o momento. No fim deste processo, um número reduzido de configurações estará apto para a exibição na interface com o usuário, que tomará a decisão final de optar pela configuração que mais lhe agradar.

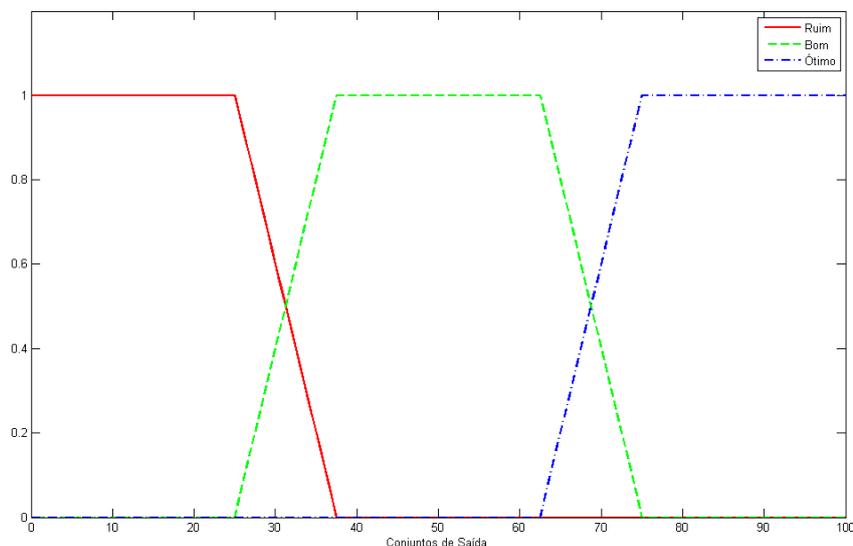


Figura 28: Gráfico da Função de Pertinência dos conjuntos de saída do processo de inferência.

5.3 Discussão sobre o Sistema de Inferência

A proposta deste sistema de inferência é prover a engenheiros de petróleo elementos que tornem mais rápida e eficiente a tarefa de dimensionar sistemas de bombeio mecânico de petróleo. São consideradas características dos equipamentos selecionados, da demanda de produção estimada de óleo e das características do poço completado. Além disso, são realizadas as tentativas de dimensionamento que o engenheiro realizaria na busca por uma configuração de bombeio adequada para realizar a elevação. O próprio sistema faz a avaliação das configurações inválidas e daquelas que não conseguem atender a demanda de óleo estipulada na vazão de projeto. Tais características fazem com que o usuário do sistema resultante obtenha resultados de dimensionamento satisfatoriamente e com menos esforço.

Os elementos de inferência utilizados neste trabalho foram baseados em critérios adotados por especialistas em seu cotidiano de trabalho de dimensionamento. Após anos de dedicação a esta atividade, os mesmos se tornaram bastante experientes nesta tarefa, e por isso conseguem chegar rapidamente a configurações de bombeio adequadas para instalação no poço. As regras de inferência foram baseadas em seus critérios pessoais para projetar o sistema e simulam sua atuação dentro de um sistema de dimensionamento convencional. Este elemento de apoio a decisão proporciona ao usuário a sensação de ter um especialista ao seu lado no momento de fazer o projeto, guiando suas escolhas

e poupando-lhe tempo ao não passar por escolhas errôneas. O artefato computacional baseado nesta especificação é descrito no capítulo 6 deste trabalho.

Apesar das regras de inferência descritas neste capítulo terem sido especificadas a partir do conhecimento de especialistas e bibliografia disponível, elas não devem ser tomadas como absolutas e irrefutáveis. Este trabalho requer uma abordagem experimental, de aprimoramento contínuo, que extrapola seu escopo temporal. O artefato computacional que vier a ser desenvolvido a partir desta especificação deverá ter algum mecanismo que permita o seu ajuste por outros engenheiros de conhecimento ou mesmo por especialistas que venham a fazer seu uso e não se sintam confortáveis com alguma parte do conhecimento nele representado.

Entretanto, a especificação descrita aqui passou por diversos ajustes, seja nas variáveis lingüísticas selecionadas, suas respectivas funções de fuzzificação ou nas regras de inferência para avaliação dos equipamentos. Ela foi baseada em fontes seguras de conhecimento e por causa disso, mesmo que venham a ser ajustadas por outros especialistas, seu conhecimento não pode ser considerado incorreto ou inadequado. Mesmo que o sistema que siga sua especificação tenha um mecanismo que permita ajustes, o artefato original estará apto a conseguir configurações de bombeio apropriadas ao contexto de produção oferecido.

6 Descrição do Sistema

O presente capítulo tem o objetivo de descrever a implementação relativa à especificação do sistema especialista descrita no capítulo 5. O sistema resultante foi feito sobre uma infraestrutura de software existente, o que possibilitou o reuso de diversas funcionalidades necessárias à sua construção que já estavam implementadas. Tais facilidades foram relativas principalmente ao acesso a base de dados integrada, à definição das regras de inferência por meio de conjuntos *fuzzy* e aos cálculos de dimensionamento. Os elementos deste arcabouço tecnológico são explanados nas primeiras seções deste capítulo, e são seguidas pela descrição da implementação resultante.

6.1 Ambiente SLR

O ambiente SLR ¹ é uma plataforma corporativa desenvolvida com a linguagem Java por uma empresa do ramo petrolífero atuante no Brasil e em outros países do mundo. Ele permite que diversos sistemas computacionais direcionados à indústria petrolífera sejam disponibilizados para uso em qualquer computador interligado à rede de computadores da empresa. Além disso, ele possui uma base de dados integrada, onde estão disponibilizadas informações sobre as jazidas petrolíferas sob administração da instituição. A plataforma foi concebida para permitir que tais informações sejam disponibilizadas para todos os membros da companhia, além de permitir que as soluções computacionais desenvolvidas localmente pudessem ser incorporadas e disponibilizadas para todas as partes da companhia.

A arquitetura do ambiente SLR possui dois pacotes principais: o pacote *BM*, responsável pela implementação dos elementos de domínio de bombeio mecânico (unidade de bombeio, coluna de hastes, bomba de fundo, coluna de produção, revestimento, etc.) e dos cálculos relativos à dinâmica de funcionamento dos equipamentos e às condições a que os

¹Nome fictício, omitido por questões de segredo industrial

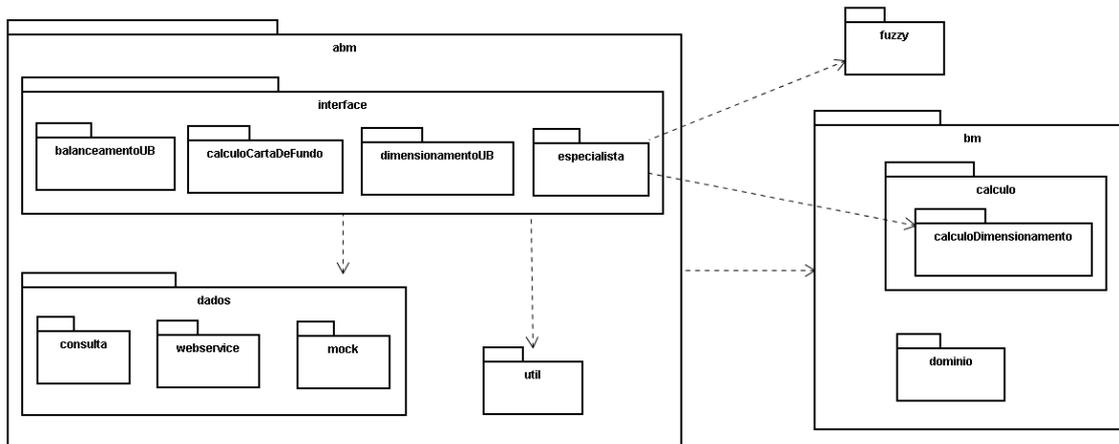


Figura 29: Arquitetura do Ambiente SLR

sistemas de bombeio são submetidos; e o pacote *ABM*, responsável pela implementação das funcionalidades de análise e projeto de bombeio mecânico.

A estrutura interna destes pacotes pode ser visualizada na Figura 29. O pacote *BM* possui bem modularizados os elementos de domínio e de cálculo, com as classes relativas a tais elementos alocadas em pacotes distintos. No pacote *ABM*, as classes são modularizadas em três pacotes principais: o pacote *modulos*, o principal destes, que engloba a implementação das funcionalidades de análise, apropriadamente separadas em módulos de cálculo da carta de fundo, balanceamento e dimensionamento de bombeio mecânico; o pacote *dados*, que separa as diferentes formas de acesso a dados que o sistema pode fazer uso (consultas a banco de dados, acesso via *Web Service* e *mocks* com dados de teste); e finalmente o pacote *util*, que disponibiliza algumas funcionalidades genéricas usadas pelos módulos de análise. No diagrama, pode-se observar a dependência do pacote *ABM* ao pacote *BM*. Isso ocorre devido à dependência dos módulos de análise aos elementos de cálculo e de domínio de bombeio mecânico.

6.2 Módulo de Cálculos de Dimensionamento

Visando atender a uma demanda crescente de aplicações para a plataforma SLR, foi desenvolvida uma biblioteca de funções com o intuito de prover o reuso de uma série de cálculos usados recorrentemente nos processos da indústria petrolífera. A motivação inicial para a sua criação foi a migração para o ambiente SLR de sistemas computacionais relacionados à análise e projeto de bombeio mecânico e bombeio de cavidades progressivas progressivas. O escopo desta migração estava dentro do mesmo projeto do qual o sistema especialista descrito neste trabalho faz parte, ainda que tenham sido feitos por

grupos distintos de pessoas.

Uma parte do módulo de cálculos está voltada para o processo de dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico. A preocupação dos desenvolvedores deste módulo foi a de permitir que outras aplicações que viessem a ser desenvolvidas pudessem utilizar as funções já existentes. Os cálculos dos parâmetros operacionais foram escritos segundo a descrição da norma API RP-11L (ver Seção 2.3), o que está alinhado aos interesses do presente trabalho. Sendo assim, pode-se considerar que a implementação do API-97 serviu como especificação do módulo de cálculos de dimensionamento. Eles foram incorporados à biblioteca de funções a partir da migração do sistema API-97 (ver Seção 2.6) para o ambiente SLR. Os métodos relacionados à obtenção dos parâmetros operacionais de dimensionamento foram alocados em métodos estáticos, sem que haja a necessidade de criar instâncias de classe para que possam ser utilizados. Além disso, os gráficos utilizados na obtenção dos parâmetros adimensionais da norma são representados por tabelas, que mapeiam pontos estratégicos do gráfico. Isso permite que os outros pontos do gráfico sejam encontrados por meio de interpolação numérica, da mesma forma como feito pelo API-97.

Uma outra preocupação dos responsáveis pela criação deste módulo foi a criação de métodos de conversão de valores. Os parâmetros de entrada dos cálculos podem estar em unidades diferentes daquelas em que foram inicialmente projetadas. Os cálculos elaborados pela norma API RP-11L seguem o Sistema Imperial Britânico de medidas; porém, as interfaces dos sistemas computacionais podem estar habilitadas a trabalhar com valores no Sistema Internacional de Unidades, mais comum em território brasileiro. Nesta situação, a conversão dos valores é de vital importância para a execução correta dos métodos de cálculo implementados.

A estrutura interna do módulo de cálculos de dimensionamento pode ser visto na Figura 30. Nela, pode-se perceber a relação de dependência entre classes, que ocorre principalmente pela chamada dos métodos estáticos de algumas destas, como é o caso de `ClassePotenciaMotor`, `DimensionamentoAPIFormatacaoValor`, `NormaAPIRP11L` e `TensaoRupturaGrauAco`. Tal especificação dos métodos é uma herança do sistema de dimensionamento API-97, migrado para a plataforma SLR, que foi originalmente desenvolvido em Fortran. A separação de tais funções em classes foi feita com o intuito de agrupá-las logicamente, deixando a implementação do código com um formato típico dos módulos utilizados em programação estruturada. Fica claro nesta separação que os cálculos são referentes à formatação de valores, aos procedimentos da norma API RP-11L e a procedimentos de dimensionamento não previstos pela norma citada, que é o caso dos cálculos de tensão de ruptura da coluna de hastes e da potência do motor da

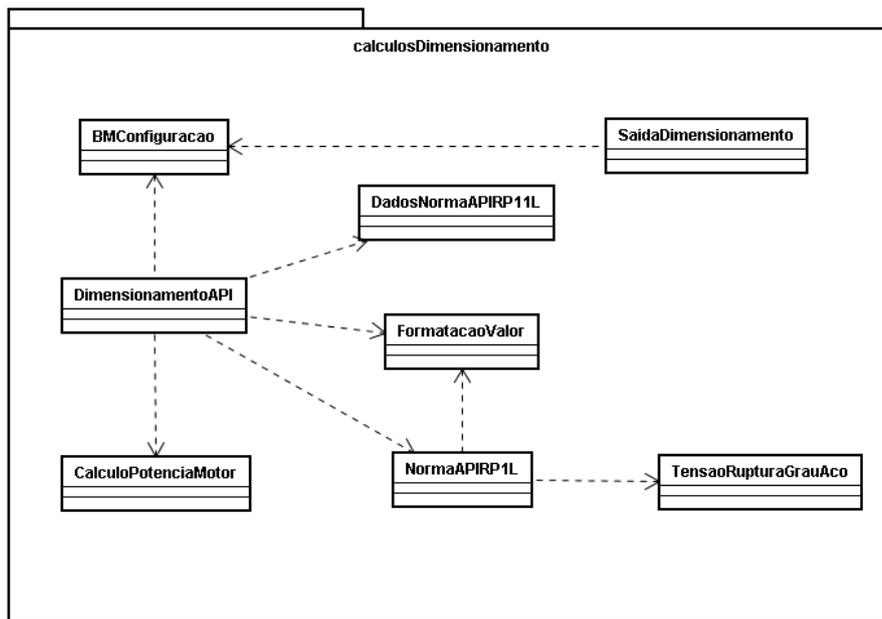


Figura 30: Classes do Módulo de Cálculos de Dimensionamento

unidade de bombeio.

6.3 Módulo *Fuzzy*

Este módulo foi desenvolvido com o intuito de facilitar a construção de sistemas que venham fazer uso de lógica *fuzzy*, seja em sistemas especialistas ou em quaisquer outros contextos em que o uso de elementos *fuzzy* seja conveniente. Apesar do intuito de oferecer esta facilidade de implementação para a criação de novos sistemas dentro da plataforma SLR, ele foi desenvolvido de tal forma que poderia ser utilizado no desenvolvimento de qualquer aplicação feita na linguagem Java.

A principal contribuição deste módulo é prover a possibilidade de especificar variáveis, valores lingüísticos e regras de inferência de forma declarativa, similar à maneira como são intuitivamente modeladas. A estrutura algorítmica do processamento computacional das regras de inferência fica totalmente delegada ao módulo *fuzzy*, o que exige o usuário de ter que lidar com estas questões. O módulo faz a análise sintática das regras de declaradas pelo programador da aplicação e procede com o processamento conforme descrito.

As classes responsáveis pela implementação do módulo *fuzzy* podem ser visualizadas na Figura 31. A classe `SistemaFuzzyBuild` inicia o procedimento, fazendo a análise

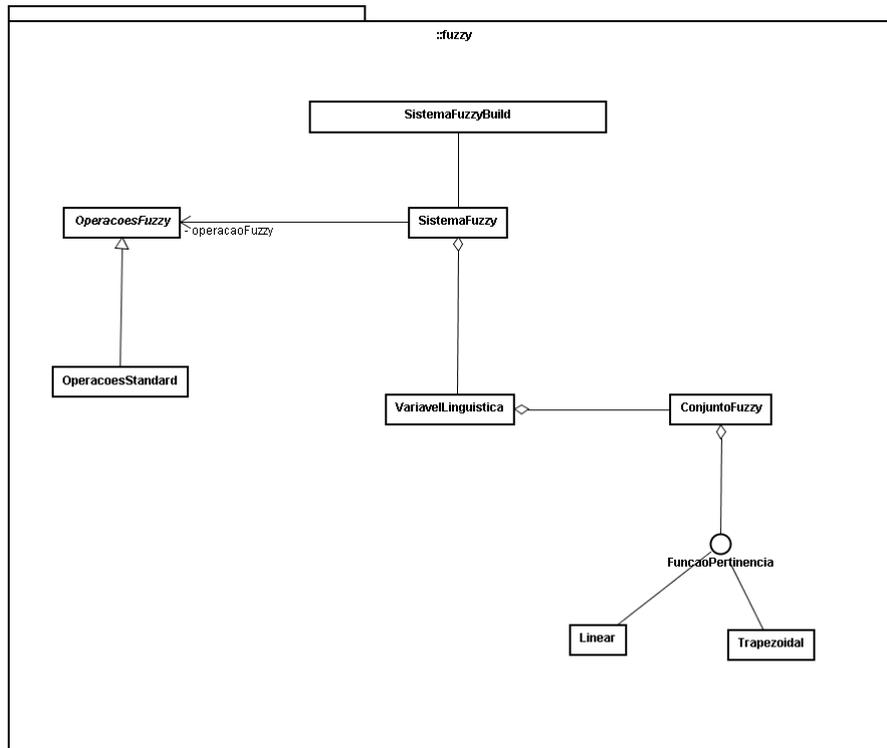


Figura 31: Classes do Módulo *Fuzzy*

sintática das regras de inferência, que são declaradas num arquivo texto segundo uma notação estabelecida. Neste arquivo, são declaradas as variáveis lingüísticas, os valores que eles podem assumir, as funções de fuzzificação dos parâmetros especificados, as regras de inferência elaboradas a partir das variáveis declaradas e o método de defuzzificação selecionado. O resultado do *parser* deste arquivo é passado para a classe `SistemaFuzzy`, que é responsável pelo processamento das regras de inferência. Ela está associada a outras duas classes fundamentais ao processamento: `OperacoesFuzzy`, responsável por indicar quais as operações *fuzzy* que devem ser utilizadas na computação das regras; e `VariavelLinguistica`, que representa cada uma das variáveis utilizadas na declaração das regras. Para cada variável, podem ser associados diversos `ConjuntosFuzzy`, que são justamente os valores lingüísticos que podem ser atribuídos a variável. Cada uma delas pode ter seu grau de pertinência representado por algumas das funções comumente utilizadas, como a trapezoidal, a triangular e a linear, dentre outras.

6.4 Módulo Especialista em Dimensionamento de Bombeio Mecânico

O módulo especialista em dimensionamento foi feito a partir da especificação descrita no capítulo 5. Sua implementação foi feita para ser incorporada ao ambiente SLR como um de seus módulos, juntamente com os módulos já existentes e fazendo uso de sua estrutura já utilizada. Os cálculos de dimensionamento feitos pelo sistema especialista foram reusados do módulo correspondente, cuja biblioteca de funções pôde ser totalmente aproveitada para este sistema especialista. As regras de inferência foram modeladas segundo a especificação do módulo *fuzzy* descrito na seção anterior. Este sistema pôde aproveitar as facilidades providas pela arquitetura *fuzzy* e não teve que lidar diretamente com as questões de execução das regras modeladas. O sistema especialista pode ser visto na Figura 29, onde fica evidenciado a dependência do módulo especialista aos módulos de cálculos de dimensionamento e ao módulo *fuzzy*.

A partir dos cálculos dos parâmetros operacionais, é possível o cálculo das variáveis lingüísticas colocadas na entrada das regras de inferência do sistema especialista. Os fatores de utilização da unidade de bombeio são obtidos a partir das cargas atuantes na haste polida e do torque no redutor. Tais valores são comparados com os valores de capacidade da unidade de bombeio, obtidos da base integrada ao ambiente SLR. O grau de utilização das hastes, que já é calculado no processo de dimensionamento, é necessário à aplicação das regras de avaliação da coluna de hastes. O valor calculado da vazão é utilizado nos dois parâmetros utilizados para a classificação da bomba de fundo, a eficiência volumétrica e o nível de atendimento da vazão.

O diagrama de seqüência do módulo especialista pode ser visto na Figura 32. O processo de inferência é iniciado pela classe `CalculoDimBMInteligente`, que inicia sua execução enviando uma mensagem para a classe `CalculoDimensionamentoBM`, do módulo de cálculos de dimensionamento. Ela recebe como resposta uma lista de configurações de bombeio dimensionadas. Seus cálculos foram feitos seguindo a norma API RP 11L e apenas as configurações em que nenhum dos parâmetros resultantes extrapolou os limites suportados pelos equipamentos foram retornadas. Após isso, cada configuração da lista retornada foi convertida na classe `BMInteligenteConfiguracao`. Além dos dados de projeto existentes na classe original, ela possui funcionalidades adicionais utilizadas apenas pelo sistema especialista, que são para comparar configurações umas com as outras e para conseguir o custo da coluna de hastes. Após isso, cada configuração é avaliada pelo módulo de inferência. É então enviada uma mensagem para a classe `SistemaFuzzy`, pertencente ao módulo *fuzzy*. Ela recebe como parâmetros as variáveis

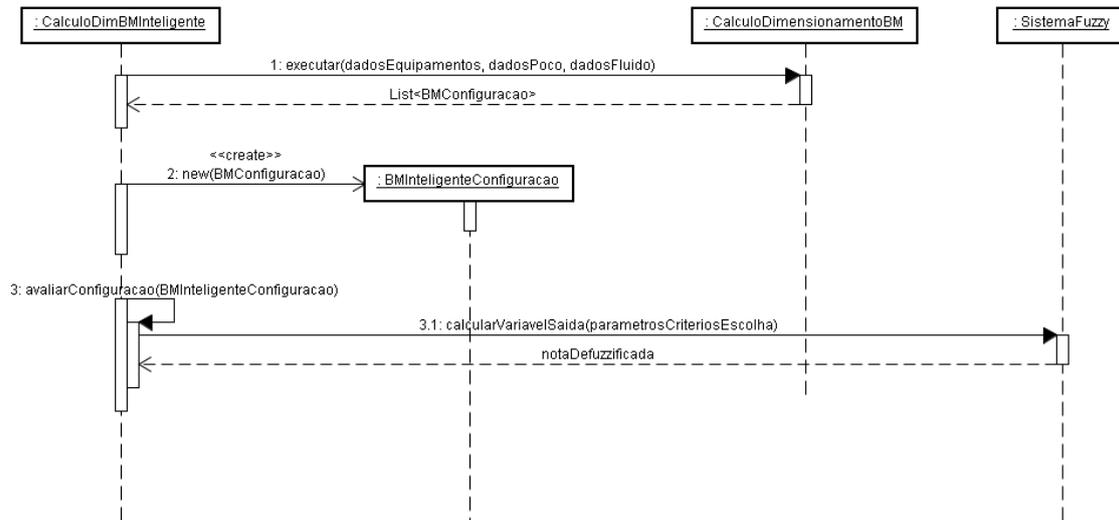


Figura 32: Diagrama de Seqüência do Módulo Especialista

utilizadas como critério de escolha das configurações de bombeio mais adequadas. Neste ponto, o módulo *fuzzy* já foi inicializado com o arquivo `bmInteligente.properties`, que declara toda a especificação do sistema definida no capítulo 5 segundo uma notação própria. Este arquivo inclusive pode ser modificado por outros especialistas. Ele pode alterar qualquer um dos parâmetros declarados com o intuito de aprimorar as regras declaradas, contribuindo para o processo de melhoria contínua da aplicação.

Após o processamento do sistema especialista, é retornado o valor defuzzificado fruto do processo de inferência, que indica o nível de adequação da configuração de bombeio para produção no contexto informado. A cada iteração, elas são ordenadas de acordo com a nota defuzzificada obtida e, finalmente, a lista é retornada para a interface com o usuário. A Figura 33 mostra uma tela do sistema desenvolvido com o resultado de um processo de inferência. Os dados de entrada descritos na seção 5.1 são apresentados nos painéis “Dados de Reservatório” e “Dados de Projeto”. A janela exibida no centro da tela exibe uma das configurações de equipamentos válidas obtidas por meio do sistema especialista. A Figura 34 mostra a mesma tela anterior mas desta vez exibindo a aba seguinte da configuração gerada, com os valores dos parâmetros operacionais calculados.

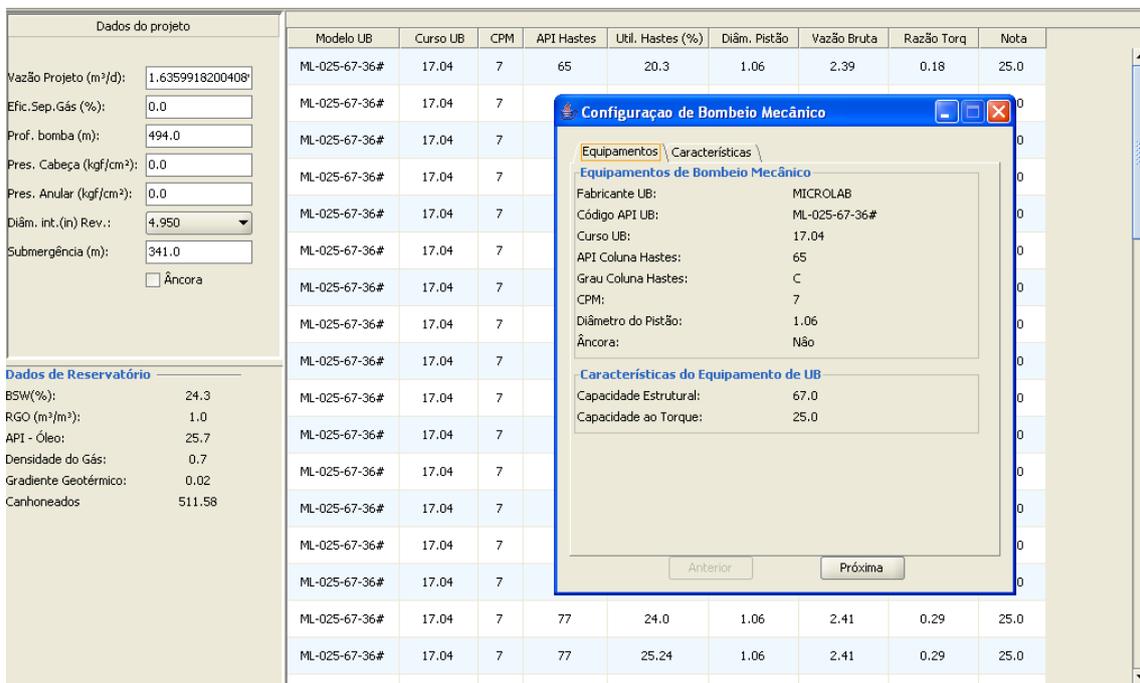


Figura 33: Exemplo de Dimensionamento Realizado pelo Sistema Especialista

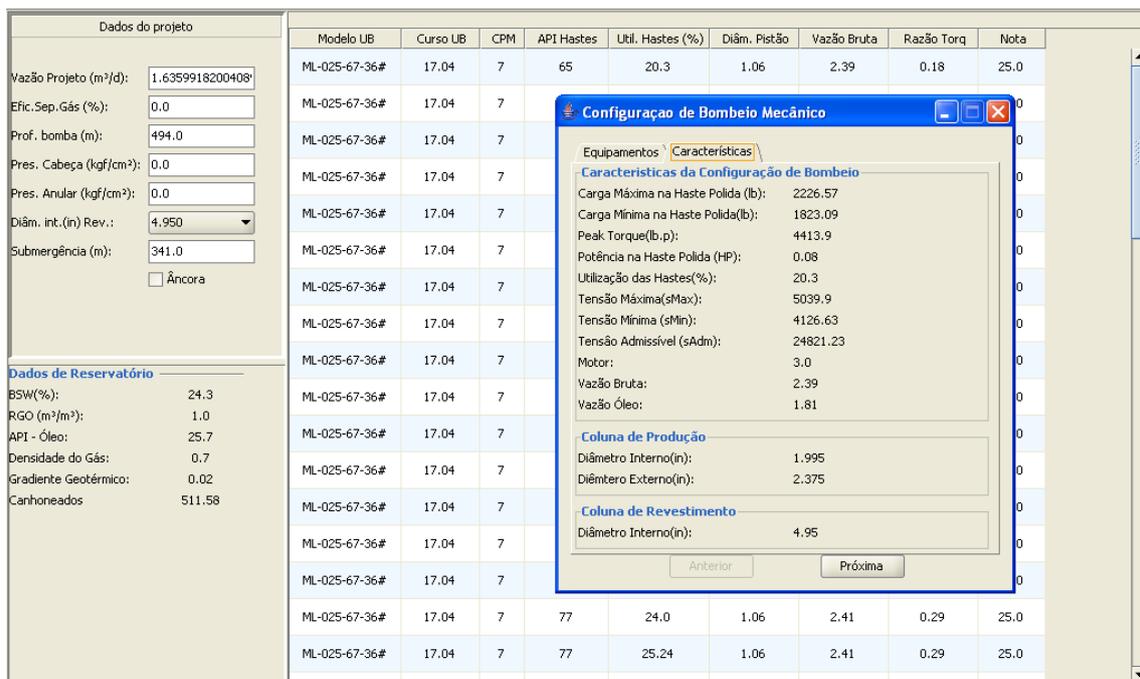


Figura 34: Exemplo de Dimensionamento Realizado pelo Sistema Especialista

7 Validação do Sistema Especialista

Este capítulo tem o objetivo de descrever o procedimento adotado para validar a especificação do sistema especialista e o módulo desenvolvido a partir dela (ver capítulos 5 e 6). Nele, é tratada a importância da verificação e validação de software e dos elementos considerados para validar o sistema em questão.

7.1 Verificação e Validação de Software

Verificação e Validação (V & V) são os processos de análise que asseguram que o software desenvolvido cumpra suas especificações e atenda às necessidades do usuário [SOMMERVILLE, 2003]. Idealmente, elas constituem um ciclo de vida completo, começando pelas revisões de requisitos, passando pelas revisões de projeto e inspeções de código até chegar aos testes de produto. Deveriam haver atividades de verificação e validação em cada estágio do processo de software. Estas atividades verificam se os artefatos gerados nas etapas do processo seguem as especificações.

Apesar destes termos costumeiramente aparecerem juntos na literatura, eles não são a mesma coisa. A verificação checa se o software desenvolvido cumpre com suas especificações. Ou seja, encarrega-se de verificar se o sistema cumpre com os seus requisitos funcionais e não funcionais especificados. A validação é um processo mais amplo, que trata de assegurar que o software atenda às expectativas do usuário. Seu objetivo é mostrar que o software faz o que o cliente espera que ele faça.

Dentro do processo de validação, uma técnica de checagem e análise bastante empregada é a aplicação de *testes de software* [SOMMERVILLE, 2003]. Trata-se da execução de uma implementação do software com dados de teste e examinar suas saídas e seu comportamento operacional. Faz-se isso com o intuito de verificar se a execução está se dando como esperada. Testes de software são uma técnica dinâmica de verificação e validação de software, já que trabalham com uma versão executável do sistema.

Os *testes de caixa preta* são uma abordagem na qual os testes são derivados da especificação de programa ou de componente. O sistema é tratado como uma “caixa preta” cujo comportamento somente pode ser determinado através de suas entradas e saídas. Este modelo é também denominado *testes funcionais*, já que o testador está somente preocupado com a funcionalidade, e não com a estrutura interna da implementação. Assim como todas as outras abordagens, a elaboração destes testes é uma tarefa bastante dispendiosa, o que pode aumentar significativamente o tempo e os recursos do processo de desenvolvimento do software. Por isso, foram desenvolvidas diferentes ferramentas e recursos com o intuito de reduzir os custos de testes de software. Um destes recursos que podem ser utilizados para testes funcionais são os *oráculos* [SOMMERVILLE, 2003]. Eles geram previsões dos resultados esperados para os testes. Podem ser versões prévias do programa ou sistemas protótipos. O teste com o uso deste recurso consiste na execução paralela do oráculo e do programa a ser testado, para a posterior comparação das saídas geradas.

Um procedimento importante para a validação de um software é a realização do *teste de aceitação*. Trata-se do processo de comparar uma versão executável do sistema com seus requisitos iniciais e com as necessidades atuais do usuário final [MYERS, 2004]. Normalmente, ele é realizado pelo cliente do sistema ou um conjunto de usuários finais. No caso de um sistema contratado, o teste de aceitação é feito comparando a operação do programa com o contrato original. No caso de um sistema produto, o cliente primeiro realiza uma avaliação para determinar se o produto satisfaz suas necessidades. Como no caso de outros tipos de teste, a melhor maneira de realizar esta tarefa é criar casos de teste que tentem mostrar que o programa não cumpre o contrato. Casos estes testes falhem, o programa é considerado aceito.

7.2 Validação do Sistema Especialista

O objetivo da validação do sistema especialista é garantir que sua implementação irá atuar exatamente da maneira que os engenheiros de campo esperam. Para que o sistema possa ser efetivamente utilizado pelo seu público alvo, ele deverá realizar cálculos de dimensionamento corretamente, além de gerar configurações de bombeio adequadas ao contexto de produção provido pelas características de fluido e de poço. Estes elementos são fundamentais para inspirar a confiança necessária para que seu uso passe a ser corriqueiro junto ao pessoal de campo. As atividades realizadas para validar o sistema desenvolvido são detalhadas nas seções seguintes.

O processo de V & V foi baseado nas especificações do sistema, ou seja, no sistema API-97 e nas regras de inferência descritas no capítulo 5. A primeira etapa da validação

consistiu na verificação da correção dos cálculos de dimensionamento usados pelo sistema. A segunda etapa deste processo foi verificar se o sistema especialista foi implementado segundo a especificação determinada. Estas etapas são descritas nas subseções a seguir.

7.2.1 Validação dos Cálculos dos Parâmetros Operacionais

A garantia da correção dos cálculos do dimensionamento é o primeiro passo para a aceitação do sistema por parte do público alvo. Os engenheiros já lidam cotidianamente com sistemas computacionais que os auxiliam no projeto de bombeio mecânico, e a mudança para um novo paradigma de realização desta tarefa não será viável sem a segurança de que as configurações de bombeio obtidas estejam com os parâmetros operacionais corretamente calculados. Assim, a maneira mais adequada para a validação dos cálculos de dimensionamento é a comparação dos parâmetros operacionais calculados com as saídas geradas por um sistema de dimensionamento convencional. O sistema escolhido para esta tarefa foi o API-97 (ver seção 2.6), já que a implementação do sistema especialista foi feita sobre sua versão migrada para a plataforma SLR, servindo como a própria especificação do mesmo. Ele funcionou como um oráculo, gerando as saídas dos cálculos de dimensionamento que serviram de modelo para os cálculos realizados pelo sistema especialista.

O primeiro passo realizado para a validação dos cálculos do dimensionamento foi a criação de um projeto de bombeio com o sistema API-97. Foi-lhe fornecido um conjunto de equipamentos e um regime de bombeio além de características de fluido a ser produzido. Os dados utilizados neste exemplo podem ser vistos na Tabela 23.

Para comparar os valores resultantes dos cálculos de dimensionamento com os dados de referência do API-97, foram escritos pequenos trechos de código que tinham o objetivo de fazer chamadas aos métodos responsáveis pela implementação dos cálculos para a plataforma SLR. Esta decisão foi tomada em detrimento da execução do sistema completo devido à diferença de valores de entrada em comparação com o API-97. Para a migração do sistema de dimensionamento para o ambiente corporativo, os valores de cursos possíveis para cada unidade de bombeio foram ajustados para que pudessem condizer com o valor real usado no equipamento. O sistema API-97 ainda conta com os valores utilizados originalmente, o que, num primeiro momento, poderia dificultar o processo de validação. A solução foi fazer chamadas explícitas aos cálculos do código utilizando os valores originais de cursos de bombeio. Assim, os cálculos podem ser comparados diretamente sem a necessidade da análise da propagação da diferença dos resultados nos

Equipamentos Instalados	
Coluna de Produção (in)	2.875
Âncora	Não
Diâmetro do Pistão (in)	1.5
API da Coluna de Hastes	87
Grau das Hastes	C
Unidade de Bombeio	LFK-057-109-48
Características do Fluido	
BSW (%)	95.0
RGO (m^3/m^3)	1.0
API do Óleo	27.5
Densidade do Gás	0.7
Condições operacionais	
Curso (in)	28
Frequência de Bombeio	19
Pressão na Cabeça	1.0
Pressão no Anular	0.0
Profundidade de Instalação da Bomba (m)	626
Eficiência de Separação de Gás(%)	0.0
Submergência	0.0

Tabela 23: Dados de Teste para Validação dos Cálculos de Dimensionamento

	SLR	API-97	Diferença	Dif. Relativa
PPRL	7686.0	7877.0	191.0	0.0242
MPRL	3176.0	3088.0	88.0	0.0284
PT	32733.0	38312.0	5579.0	0.1456
PRHP	2.8	3.2	0.4	0.1250
SMAX	9786.0	10029.0	243.0	0.0242
SMIN	4043.0	3931.0	112.0	0.0284
SADM	24744.0	24711.0	63.0	0.0025
Vazão Bruta	18.3	19.4	1.1	0.056
Vazão Óleo	0.92	1	0.08	0.0800

Tabela 24: Comparação dos Resultados obtidos da Execução dos Cálculos de Dimensionamento

cálculos realizados.

Os cálculos resultantes podem ser vistos na Tabela 24. Apesar dos valores encontrados não terem sido idênticos para ambas as execuções, eles apresentaram erros relativos bastante pequenos. Em sua maioria, a diferença ficou em torno de 2% (dois por cento) do valor obtido pelo API-97, o que foi considerado aceitável por especialistas consultados. Esta diferença nos cálculos foi provavelmente decorrida das diferentes linguagens de programação utilizadas para desenvolvimento dos sistemas. O API-97 teve seus cálculos escritos em Visual Basic, ao passo em que o sistema migrado foi escrito em Java, e os erros dos cálculos podem ter sido ocasionados pelas diferentes abordagens que tais linguagens seguem para o tratamento numérico de dados em ponto flutuante.

7.2.2 Verificação da Implementação do Sistema Especialista

Nesta etapa, a especificação do sistema e a implementação resultante são confrontados, a fim de que se garanta que o programa execute da maneira como foi planejado. A abordagem seguida consistiu de dois passos. O primeiro passo foi inspecionar o código responsável pela implementação das regras de inferência para verificar se elas estavam de acordo com a especificação, mostrada no capítulo 5.

O primeiro item vistoriado foi o arquivo de configuração `bmInteligente.properties`, responsável pela declaração das regras de inferência. Nele foram declaradas as variáveis lingüísticas, os respectivos valores lingüísticos que podem ser atribuídos aos mesmos, as funções de pertinência aos conjuntos, as regras de inferência para se chegar aos valores lingüísticos de saída, o método de defuzzificação adotado e as normas *fuzzy* correspondentes aos operadores lógicos a serem utilizadas no processamento das regras. Neste arquivo, a única consistência encontrada foi referente aos elementos dos conjuntos unitários de saída, usados como pesos na etapa de defuzzificação. Havia valores arbitrários declarados, quando seria interessante seguir a especificação e colocar como valores unitários os centros de gravidade das respectivas funções de pertinência.

O outro item vistoriado nesta etapa foi a classe `CalculoDimBMInteligente`. Ela tem o papel de, a partir de um conjunto de configurações de bombeio, conseguir os parâmetros de avaliação e submetê-los ao processo de inferência. Após a avaliação de cada uma delas, elas são ordenadas segundo o parâmetro defuzzificado (ver seção 6.4). Ao inspecionar esta classe, verificou-se que o único erro encontrado era no envio do valor da eficiência volumétrica ao motor de inferência. A razão com o deslocamento volumétrico estava sendo feita com a vazão de projeto informada pelo usuário, quando na verdade deveria ser enviada a vazão bruta calculada no dimensionamento. Outras classes não foram verificadas, pois eram pertencentes ao módulo de cálculos de dimensionamento e ao módulo *fuzzy*. Como se tratava de componentes já prontos e estavam sendo reutilizados, presumiu-se que já estavam devidamente testados e validados pelos seus desenvolvedores.

O segundo passo foi testar partes da execução do sistema e confrontar com os dados esperados, obtidos manualmente. Para isso, criou-se uma classe de teste que atuava de forma semelhante à classe `CalculoDimBMInteligente`. Ela submetia dados fictícios de parâmetros de avaliação e submetia para o motor de inferência, que retornava o valor da nota defuzzificada resultante do processo de inferência. Os resultados dos valores experimentados foram então comparados com aquele obtido manualmente, a partir da especificação do sistema. Todos os valores coincidiram com o resultado esperado, o

que reafirmou a confiança no módulo de inferência *fuzzy* implementado previamente e reutilizado neste trabalho.

7.2.3 Validação das Configurações Geradas

Esta seção trata da questão das configurações resultantes da execução do sistema especialista. Um potencial usuário do sistema deve saber como um sistema de bombeio mecânico é dimensionado. Dessa forma, ao submeter uma configuração gerada pelo sistema especialista à opinião de um usuário, ele deverá ser capaz de emitir uma opinião sobre a aplicação daquela configuração de bombeio mecânico ao contexto de produção provido (perspectiva de produção, características de fluido, características do poço). O número de configurações consideradas adequadas por um conjunto de usuários indicará o *nível de aceitação* do sistema especialista para aplicação cotidiana no projeto de elevação por bombeio mecânico.

Para avaliar o nível de aceitação do sistema, elaboramos uma entrevista a ser aplicada a potenciais usuários do sistema especialista. Tratam-se de engenheiros de petróleo que lidam diariamente com a tarefa de dimensionar sistemas de bombeio mecânico para produção em campo. Esta avaliação foi feita em duas etapas. A primeira busca submeter as configurações de bombeio geradas pelo sistema especialista à opinião dos engenheiros. As questões feitas nesta etapa da entrevista trataram de gerar algumas configurações de bombeio a partir de um determinado contexto de produção, similares àquele observado na Tabela 23. Será perguntado então quais as configurações que, na sua opinião, mais se adequavam para produção. Outras questões que foram feitas nesta etapa foram sobre os critérios considerados pelos entrevistados para ordenar as configurações e parâmetros que ele observava para considerar um sistema de bombeio bem dimensionado. Esta etapa parte do pressuposto de que as regras de inferência definidas não são definitivas. Espera-se com este *feedback* aprimorar o estado da implementação, colocando o sistema num processo de melhoria contínua, aumentando seu espectro de aceitação.

A segunda etapa desta avaliação busca observar configurações de bombeio mecânico geradas pelos próprios engenheiros. Eles deverão dimensionar um sistema de bombeio mecânico a partir das mesmas condições de fluido e poço a que o sistema especialista foi submetido para gerar configurações. Será perguntado também se os dados de fluido e poço foram considerados suficientes para que o dimensionamento fosse feito a contento. A principal contribuição desta etapa será a possibilidade de comparar os resultados do sistema com configurações dimensionadas por especialistas humanos. Isso contribuirá também para o ajuste fino da implementação do sistema, assim como a etapa anterior.

Até o presente momento, a entrevista não foi realizada com os engenheiros por motivos operacionais. Esta última etapa do processo de validação complementar as etapas anteriormente realizadas, contribuindo para aceitação do sistema por parte de seu público alvo. Ela não invalidará o processo de engenharia de conhecimento feito, uma vez que este conhecimento foi obtido por especialistas reconhecidamente experientes e confiáveis, sendo perfeitamente possível sua aceitação como modelo canônico de dimensionamento. Espera-se com isso atingir o maior número possível de usuários do sistema, tornando-o atrativo e referencial para, sobretudo, novos projetistas de sistemas de bombeio mecânico. Um questionário foi formulado pelos autores do presente trabalho com o intuito de cumprir esta etapa de validação do sistema desenvolvido. Ele pode ser vista no Apêndice A.

8 Conclusão

Este trabalho apresentou as principais idéias acerca da concepção e validação de um sistema especialista no dimensionamento de bombeio mecânico. As técnicas de dimensionamento já são largamente exploradas na indústria de petróleo, mas sua correta utilização demanda anos de experiência, além de um exaustivo processo de tentativa e erro por parte do projetista. Em tempos de instabilidade no valor de mercado do barril de petróleo, dificuldades na concepção do projeto de campo podem incorrer em prejuízos na produção e, em situações mais críticas, na perda de espaço no mercado para concorrentes. Um sistema especialista nesta atividade contribui significativamente para a obtenção de um projeto corretamente calculado e apropriado ao contexto de produção a que seria submetido, o que reduziria os riscos de acontecerem os problemas citados.

A principal contribuição deste trabalho em relação a outros existentes foi a concepção das regras de inferência com o auxílio da lógica *fuzzy*. Esta abordagem permitiu modelar o processo de tomada de decisão levando em consideração o raciocínio difuso típico da estrutura do pensamento humano. O conhecimento representado no sistema foi obtido de especialistas experientes no dimensionamento de bombeio mecânico, o que foi de fundamental importância para verificar quais os parâmetros mais adequados a se levar em consideração ao optar por uma configuração de bombeio em detrimento de outras. A opção pela norma API RP 11L se deu por ser uma técnica largamente utilizada e perfeitamente compatível com o contexto de produção no qual o sistema modelado será empregado. A partir destas premissas, o sistema desenvolvido pode auxiliar o projetista na tomada de decisão, visando a redução do custo, do esforço e do tempo dispensados para a geração de uma configuração de bombeio adequada.

O desenvolvimento do sistema a partir da especificação foi feito com o auxílio de outros membros da equipe do projeto do qual este trabalho fez parte. A construção da aplicação foi bastante facilitada devido à existência de um sistema de dimensionamento convencional já existente dentro do contexto do projeto. O sistema especialista aproveitou seus cálculos já implementados e ele foi incorporado à um ambiente corporativo integrado ao sistema de dimensionamento original, complementado as funcionalidades previamente

existentes e agregando valor ao produto final do projeto.

A abordagem seguida possui algumas vantagens em relação a outras existentes (ver Seção 4.2). Certamente um sistema especialista contribui para a obtenção de configurações dimensionadas mais rapidamente que sistemas convencionais, onde os equipamentos precisam ser selecionados um de cada vez e um processo de tentativa e erro é necessário para verificar se a demanda de produção não está sobrecarregando algum deles. O uso de lógica *fuzzy* se mostrou mais adequado que a opção pela lógica clássica, pois níveis de verdade são mais adequados para modelar a estrutura do pensamento humano. O uso de técnicas comuns no aprendizado de máquina, tais como algoritmos genéticos e redes neurais, não foram consideradas no desenvolvimento do sistema, já que o conhecimento processado pelo sistema foi obtido diretamente de especialistas. Tais técnicas para aprendizado poderiam ser consideradas caso o sistema tivesse que aprender sobre o domínio a partir de histórico de poços ou de configurações de bombeio existentes que sejam sabidamente eficientes em seus contextos de produção.

A última etapa deste trabalho foi a validação do sistema. Os parâmetros operacionais foram calculados e comparados com outro sistema de dimensionamento já largamente utilizado. Os valores, quando comparados, apresentaram erros relativos significativamente baixos, que mesmo assim só ocorreram devido a diferenças de tratamento de ponto flutuante nas linguagens de programação adotadas por cada uma. As diferenças foram consideradas irrelevantes pelos especialistas consultados. As configurações de bombeio geradas pelo sistema foram submetidas ao público alvo do sistema, os engenheiros de petróleo que trabalham cotidianamente com o dimensionamento de bombeio mecânico. Algumas divergências quanto ao ordenamento das configurações foram levantadas durante as entrevistas, e foram consideradas para um ajuste fino das regras de inferência criadas. Após os ajustes, o sistema foi considerado habilitado para utilização em larga escala e pode ser colocado dentro do contexto real de projeto de produção.

8.1 Limitações do Trabalho Realizado

As principais limitações do trabalho são inerentes à adoção da norma API RP 11L como técnica de dimensionamento de bombeio mecânico. O uso desta norma prevê que sejam utilizadas somente hastes de bombeio feitas de liga metálica, unidades de bombeio convencionais e os equipamentos normalizados pelo *American Petroleum Institute*. Isso limita o espectro de atuação do sistema ao não permitir que outros tipos de equipamentos possam ser levados em consideração na escolha dos equipamentos de bombeio. Isso se

deu ao optar-se pelo reuso dos cálculos do API-97, que por outro lado, facilitou significativamente o desenvolvimento do artefato computacional baseado nas regras de inferência especificadas neste trabalho.

8.2 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro a ser realizado ficou a aplicação de uma entrevista a um grupo de engenheiros potenciais usuários do sistema, conforme especificado na seção 7.2.3. Trata-se da última etapa do processo de verificação e validação do sistema, que já contou com etapas de validação dos cálculos do dimensionamento e da verificação da implementação do motor de inferência conforme especificado no presente trabalho. O funcionamento adequado do sistema especificado não depende desta etapa, sendo a realização da mesma importante para aprimoramento das regras de inferência e, conseqüentemente para a ampliação do espectro de usuários.

Um trabalho futuro a dar continuidade a este é a aplicação de técnicas de otimização para a escolha dos equipamentos e geração de configurações de bombeio mecânico. A combinação de todos os equipamentos disponíveis leva a geração de muitas configurações inválidas ou inadequadas, que precisam ser verificadas e posteriormente eliminadas. A aplicação de heurísticas na geração das configurações poderia reduzir significativamente o tempo de processamento do sistema especialista, já que as configurações indesejadas, ainda que não fossem totalmente evitadas, teriam o seu número reduzido pela aplicação.

Outro trabalho futuro que pode ser desenvolvido a partir deste é a aplicação de outras técnicas de inteligência artificial no projeto de sistemas de bombeio mecânico. Isso permitirá a geração de diferentes resultados e a sua comparação com aqueles obtidos a partir do módulo especialista aqui desenvolvido. Uma comparação mais ampla poderá ser feita por um usuário especialista, que terá discernimento para avaliar os resultados obtidos por cada um deles.

Referências

ALEGRE, L.; MOROOKA, C.; ROCHA, A. da. Intelligent diagnosis of rod pumping problems. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas: [s.n.], 1993. p. 3–6.

American Petroleum Institute. *Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems – API RP 11L*. 4th. ed. [S.l.], 1988.

American Petroleum Institute. *Specification for Pumping Units – API SPEC 11E*. 17th. ed. [S.l.], 1994.

American Petroleum Institute. *Specification for Sucker Rods – API SPEC 11B*. 26th. ed. [S.l.], 1998.

ASSMANN, B. W. *Estudo de Estratégias de Otimização para Poços de Petróleo com Elevação por Bombeio de Cavidades Progressivas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2008.

CORRÊA, J. F. dos S. *Sistema Inteligente para Aplicações de Soluções ao Bombeamento Mecânico de Petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1995.

COSTA, R. de O. Api-97: Projeto de bombeio mecânico em ambiente windows. In: *I Encontro Técnico Sobre a Informática na Engenharia de Poço*. [S.l.: s.n.], 1997.

COSTA, R. de O. *Curso de Bombeio Mecânico*. Petrobras UN-RNCE/ST/ELV, 2005.

ECONOMIDES, M. J.; HILL, D. A.; EHLIG-ECONOMIDES, C. *Petroleum Production Systems*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1993. ISBN 978-0136586838.

FOLEY, W.; SVINOS, J. Expert adviser program for rod pumping. *Journal of Petroleum Technology*, v. 41, n. 4, p. 394–400, 1989.

KLIR, G. J.; YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications*. [S.l.]: Prentice Hall Inc., 1995. ISBN 0-13-101171-5.

- LEEKWIJCK, W. V.; KERRE, E. E. Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 108, n. 2, p. 159 – 178, 1999. ISSN 0165-0114.
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Academic Press, Inc., Duluth, MN, USA, v. 51, n. 2, p. 135–147, 1999. ISSN 1071-5819.
- MARTINEZ, E. R. et al. Rod pumping expert system. In: *SPE Petroleum Computer Conference*. [S.l.: s.n.], 1993.
- MYERS, G. J. *The art of software testing*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2004. ISBN 0-471-46912-2.
- NEGNEVITSKY, M. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. 2nd. ed. [S.l.]: Addison Wesley, 2005. ISBN 0-321-20466-2.
- SOMMERVILLE, I. *Software Engineering*. 6th. ed. [S.l.]: Addison Wesley, 2003. ISBN 85-88639-07-6.
- SOUZA, A. M. F. de et al. Using artificial neural networks for pattern recognition of downhole dynamometer card in oil rod pump system. In: *AIKED'09: Proceedings of the 8th WSEAS international conference on Artificial intelligence, knowledge engineering and data bases*. Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2009. p. 230–235. ISBN 978-960-474-051-2.
- SUGENO, M. *Industrial Applications of Fuzzy Control*. New York, NY, USA: Elsevier Science Inc., 1985. ISBN 0444878297.
- SVINOS, J. G. Application of expert system technology to the design of rod pumping systems. In: *Southwestern Petroleum Short Course*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 391–417.
- TAKÁCS, G. *Modern Sucker-rod Pumping*. [S.l.]: PennWell Books, 1993. ISBN 0-87814-383-1.
- THETA Oilfield Services, Inc. 2009. Último acesso em 05 de Novembro de 2009. Disponível em: <<http://www.theta-ent.com/products.asp>>.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.
- ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-i. *Information Science*, v. 8, p. 199 – 249, 1975.

APÊNDICE A - Entrevista para Validação

A.1 Introdução

O projeto SOLAR-BM-BCP é uma parceria entre a Petrobras e o Departamento de Informática da UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte) que trata do desenvolvimento de novos sistemas computacionais e para a migração de sistemas existentes para análise e projeto de bombeio por meio das técnicas de bombeio mecânico (BM) e bombeio por cavidades progressivas (BCP). Tais sistemas foram desenvolvidos visando a integração com a plataforma SOLAR, disponível na rede corporativa, no qual uma série de outros sistemas de E&P estão disponibilizados.

Um dos sistemas desenvolvidos no contexto deste projeto é o SEDBM (Sistema Especialista para Dimensionamento de Bombeio Mecânico). Sua finalidade é prover ao engenheiro uma configuração de bombeio mecânico adequada para produção de um poço, tomando por base dados de poço e fluido, bem como a demanda econômica prevista para sua produção (a vazão bruta que se deseja alcançar).

Este questionário tem por objetivo avaliar a correção dos resultados obtidos até o presente momento e estimar o nível de aceitação destes resultados que o sistema vem obtendo até o momento. A partir desta avaliação, o sistema poderá sofrer possíveis ajustes para que possa ser efetivamente utilizado no dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico de maneira confiável. Maiores informações podem ser obtidas com Cássio Higino de Freitas (cassiohf@gmail.com) ou Jair Cavalcanti Leite (jair@dimap.ufrn.br).

A.2 Processo de Validação

Esta validação será realizada em duas etapas. A primeira busca submeter as configurações de bombeio geradas pelo sistema especialista à opinião de engenheiros de campo,

que lidam diariamente com atividades de dimensionamento. Espera-se com isso obter feedback sobre o estado atual da implementação e, se for o caso, adequá-la à realidade que a experiência com o usuário proporcionar.

A segunda etapa desta validação busca observar configurações de bombeio mecânico geradas pelos próprios engenheiros. Eles farão o dimensionamento a partir das mesmas condições de fluido e poço a que o sistema especialista foi submetido para gerar configurações de bombeio. Espera-se com esta etapa comparar os resultados do sistema com sistemas dimensionados por especialistas humanos.

Ao final de cada uma das etapas, são levantados alguns questionamentos referentes ao dimensionamento de bombeio mecânico. O engenheiro consultado esclarecerá detalhes relativos ao seu próprio processo cognitivo realizado durante o dimensionamento, mostrando os critérios que o levaram a tomar as decisões de projeto mostradas nas etapas anteriores.

A.2.1 Avaliação das Configurações de BM do Sistema Especialista

1. A partir das configurações de bombeio mecânico apresentadas abaixo, numere-as ordenadamente de acordo com sua preferência de adequação às condições de poço e fluido apresentadas

ENTRADA DO SISTEMA		
Dados do Reservatório:		
BSW: 24.3%	RGO (m^3/m^3): 1.0	Grau API do Óleo: 25.7
Densidade do Gás: 0.7		Gradiente Geotérmico: ($^{\circ}C/m$) : 0.02
Profundidade dos canhoneados: 0.0m (provavelmente está errado na base de dados)		
Dados de Projeto:		
Vazão Bruta de Projeto: $20m^3/dia$		
Eficiência de Separação de Gás: 80%		
Profundidade de Assentamento da Bomba: 200m		
Pressão na cabeça: $1kgf/cm^2$		
Pressão no anular: $1kgf/cm^2$		
Submergência: 10m		

SAÍDA DO SISTEMA		
1ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 114-173-64 (Capacidade ao torque: 114000 lb.in; Capacidade Estrutural: 17300 lbs; (Maior Curso da UB: 64 in)		
Curso da UB: 33.09 in	CPM: 6	
API da Coluna de Hastes: 55 (100% 5/8")	Grau do Aço: Electra	
Diâmetro do Pistão: 2.5 in		
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 2138.42 lbs	MPRL: 581.96 lbs	Peak Torque: 21190.97 lb.in
PRHP: 0.64 HP	Grau de Utilização das Hastes: 14.43%	
SMAX: 7217.29 psi	SMIN: 1847.47 psi	SADM: 50000 psi
Vazão Bruta: 21.87m ³ /dia		Vazão Óleo: 16.55m ³ /dia

SAÍDA DO SISTEMA		
2ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 114-173-64 (Capacidade ao torque: 114000 lb.in; Capacidade Estrutural: 17300 lbs; (Maior Curso da UB: 64 in)		
Curso da UB: 33.09 in	CPM: 18	
API da Coluna de Hastes: 55 (100% 5/8")	Grau do Aço: UHS	
Diâmetro do Pistão: 1.5 in		
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 1863.91 lbs	MPRL: 477.98 lbs	Peak Torque: 21322.25 lb.in
PRHP: 1.35 HP	Grau de Utilização das Hastes: 18.1%	
SMAX: 6489.43 psi	SMIN: 1507.53 psi	SADM: 35847.99 psi
Vazão Bruta: 24.1m ³ /dia		Vazão Óleo: 18.24m ³ /dia

SAÍDA DO SISTEMA		
3ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 057-109-48 (Capacidade ao torque: 57000 lb.in; Capacidade Estrutural: 10900 lbs; Maior Curso da UB: 48 in)		
Curso da UB: 23.11 in	CPM: 16	
API da Coluna de Hastes: 55 (100% 5/8")	Grau do Aço: D	
Diâmetro do Pistão: 1.75 in		
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 1733.01 lbs	MPRL: 530.69 lbs	Peak Torque: 11396.39 lb.in
PRHP: 0.79 HP	Grau de Utilização das Hastes: 20.94%	
SMAX: 6215.56 psi	SMIN: 1666.76 psi	SADM: 29687.55 psi
Vazão Bruta: 20.16m ³ /dia		Vazão Óleo: 15.26m ³ /dia

SAÍDA DO SISTEMA		
4ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 114-173-64 (Capacidade ao torque: 114000 lb.in; Capacidade Estrutural: 17300 lbs; Maior Curso da UB: 64 in)		
Curso da UB: 33.09 in	CPM: 8	
API da Coluna de Hastes: 65 (58.4% 3/4" e 41.6% 5/8")	Grau do Aço: UHS	
Diâmetro do Pistão: 2.25 in		
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 2232.09 lbs	MPRL: 716.76 lbs	Peak Torque: 24150.73 lb.in
PRHP: 0.78 HP	Grau de Utilização das Hastes: 17.67%	
SMAX: 5239.13 psi	SMIN: 1599.52 psi	SADM: 29649.73 psi
Vazão Bruta: 23.86m ³ /dia		Vazão Óleo: 18.07m ³ /dia

ENTRADA DO SISTEMA		
Dados do Reservatório:		
BSW: 93.2%	RGO (m^3/m^3): 1.0	Grau API do Óleo: 28.6
Densidade do Gás: 0.7		Gradiente Geotérmico: ($^{\circ}C/m$) : 0.02
Profundidade dos canhoneados: 0.0m (provavelmente está errado na base de dados)		
Dados de Projeto:		
Vazão Bruta de Projeto: $2.9748m^3/dia$		
Eficiência de Separação de Gás: 0.0%		
Profundidade de Assentamento da Bomba: 665m		
Pressão na cabeça: $3.5kgf/cm^2$		
Pressão no anular: $0.0kgf/cm^2$		
Submergência: 10m		

SAÍDA DO SISTEMA		
1ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 057-109-48 (Capacidade ao torque: 57000 lb.in; Capacidade Estrutural: 10900 lbs; (Maior Curso da UB: 48 in)		
Curso da UB: 23.54 in	CPM: 9	
API da Coluna de Hastes: 76 (28.5% 7/8" e 71.5% 3/4")	Grau do Aço: K	
Diâmetro do Pistão: 1.06 in	Âncora: Não	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 4807.1 lbs	MPRL: 3202.82 lbs	Peak Torque: 14000.43 lb.in
PRHP: 0.55 HP	Grau de Utilização das Hastes: 32.84%	
SMAX: 7976.05 psi	SMIN: 5395.45 psi	SADM: 24284.94 psi
Vazão Bruta: $3.91m^3/dia$	Vazão Óleo: $0.27m^3/dia$	
Potência do Motor: 5.0 HP		

SAÍDA DO SISTEMA		
2ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 080-133-54 (Capacidade ao torque: 80000 lb.in; Capacidade Estrutural: 13300 lbs; (Maior Curso da UB: 54 in)		
Curso da UB: 30.48 in	CPM: 6	
API da Coluna de Hastes: 77 (100% 7/8")	Grau do Aço: K	
Diâmetro do Pistão: 1.5 in	Âncora: Não	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 5582.15 lbs	MPRL: 4077.45 lbs	Peak Torque: 21371.14 lb.in
PRHP: 0.49 HP	Grau de Utilização das Hastes: 38.08%	
SMAX: 9523.64 psi	SMIN: 6680.55 psi	SADM: 25007.81 psi
Vazão Bruta: $3.44m^3/dia$	Vazão Óleo: $0.23m^3/dia$	
Potência do Motor: 7.5 HP		

SAÍDA DO SISTEMA		
3ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 114-173-64 (Capacidade ao torque: 114000 lb.in; Capacidade Estrutural: 17300 lbs; Maior Curso da UB: 64 in)		
Curso da UB: 33.99 in	CPM: 6	
API da Coluna de Hastes: 88 (100% 1")	Grau do Aço: K	
Diâmetro do Pistão: 1.06 in	Âncora: Não	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 7094.04 lbs lbs	MPRL: 5326.01 lbs	Peak Torque: 30921.35 lb.in
PRHP: 0.62 HP	Grau de Utilização das Hastes: 36.7%	
SMAX: 9181.93 psi	SMIN: 6704.86 psi	SADM: 25021.49 psi
Vazão Bruta: $3.88m^3/dia$	Vazão Óleo: $0.26m^3/dia$	
Potência do Motor: 10.0 HP		

SAÍDA DO SISTEMA		
4ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 057-109-48 (Capacidade ao torque: 57000 lb.in; Capacidade Estrutural: 10900 lbs; Maior Curso da UB: 48 in)		
Curso da UB: 32.01 in	CPM: 7	
API da Coluna de Hastes: 87 (24.3% 1" e 75.7% 7/8")	Grau do Aço: K	
Diâmetro do Pistão: 1.06 in	Âncora: Não	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 6080.42 lbs	MPRL: 4324.18 lbs	Peak Torque: 25214.15 lb.in
PRHP: 0.66 HP	Grau de Utilização das Hastes: 31.8%	
SMAX: 7741.82 psi	SMIN: 5505.71 psi	SADM: 24346.96 psi
Vazão Bruta: $4.24m^3/dia$	Vazão Óleo: $0.29m^3/dia$	

SAÍDA DO SISTEMA		
5ª Configuração	Indique aqui a ordem desta configuração ()	
Equipamentos de BM:		
API da Unidade de Bombeio: 025-67-36 (Capacidade ao torque: 25000 lb.in; Capacidade Estrutural: 6700 lbs; Maior Curso da UB: 36 in)		
Curso da UB: 34.15 in	CPM: 6	
API da Coluna de Hastes: 55 (100% 5/8")	Grau do Aço: K	
Diâmetro do Pistão: 1.06 in	Âncora: Não	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL: 3304.86 lbs	MPRL: 2046.88 lbs	Peak Torque: 25214.15 lb.in
PRHP: 0.49 HP	Grau de Utilização das Hastes: 43.74%	
SMAX: 10927.85 psi	SMIN: 6638.23 psi	SADM: 24984.0 psi
Vazão Bruta: $3.57m^3/dia$	Vazão Óleo: $0.25m^3/dia$	

2. Quais os critérios que você considerou para ordenar as configurações das perguntas anteriores?

Resposta:

3. Na sua opinião, as configurações de bombeio apresentadas fazem sentido?

Resposta:

4. O que você considera como um sistema de bombeio mecânico bem dimensionado? Quais parâmetros operacionais são priorizados na sua escolha? À qual regime de bombeio prefere submeter a unidade de bombeio selecionada?

Resposta:

A.2.2 Observação de Configurações de BM geradas por Engenheiros

5. A partir dos conjuntos de informações de poço e fluido a seguir, realize o dimensionamento de um sistema de bombeio mecânico que julgue adequado para a produção. Preencha o formulário abaixo de cada projeto de bombeio a seguir

1^o Projeto		
Dados do Reservatório:		
BSW: 24.3%	RGO (m^3/m^3): 1.0	Grau API do Óleo: 25.7
Densidade do Gás: 0.7	Gradiente Geotérmico: ($^{\circ}C/m$) : 0.02	
Profundidade dos canhoneados: 0.0m (provavelmente está errado na base de dados)		
Dados de Projeto:		
Vazão Bruta de Projeto: $20m^3/dia$		
Eficiência de Separação de Gás: 80.0%		
Profundidade de Assentamento da Bomba: 200m		
Pressão na cabeça: $1kgf/cm^2$		
Pressão no anular: $1kgf/cm^2$		
Submergência: 10m		

DIMENSIONAMENTO DE BM	
Equipamentos de BM:	
Unidade de Bombeio:	
Curso da UB:	CPM:
Coluna de Hastes:	Grau do Aço:
Diâmetro do Pistão:	Âncora:
Parâmetros Operacionais:	
PPRL:	MPRL:
PRHP:	Peak Torque:
SMAX:	SADM:
SMIN:	Grau de Utilização das Hastes:
Vazão Bruta:	Vazão Óleo:
Potência do Motor:	

2^o Projeto		
Dados do Reservatório:		
BSW: 93.2%	RGO (m^3/m^3): 1.0	Grau API do Óleo: 28.6
Densidade do Gás: 0.7	Gradiente Geotérmico: ($^{\circ}C/m$) : 0.02	
Profundidade dos canhoneados: 0.0m (provavelmente está errado na base de dados)		
Dados de Projeto:		
Vazão Bruta de Projeto: $2.9748m^3/dia$		
Eficiência de Separação de Gás: 0.0%		
Profundidade de Assentamento da Bomba: 665m		
Pressão na cabeça: $3.5kgf/cm^2$		
Pressão no anular: $0kgf/cm^2$		
Submergência: 0m		

DIMENSIONAMENTO DE BM		
Equipamentos de BM:		
Unidade de Bombeio:		
Curso da UB:	CPM:	
Coluna de Hastes:	Grau do Aço:	
Diâmetro do Pistão:	Âncora:	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL:	MPRL:	Peak Torque:
PRHP:	Grau de Utilização das Hastes:	
SMAX:	SMIN:	SADM:
Vazão Bruta:	Vazão Óleo:	
Potência do Motor:		

3º Projeto		
Dados do Reservatório:		
BSW: 95%	RGO (m^3/m^3): 1.0	Grau API do Óleo: 27.5
Densidade do Gás: 0.7	Gradiente Geotérmico: ($^{\circ}C/m$): 0.02	
Profundidade dos canhoneados: 0.0m (provavelmente está errado na base de dados)		
Dados de Projeto:		
Vazão Bruta de Projeto: $15m^3/dia$		
Eficiência de Separação de Gás: 0.0%		
Profundidade de Assentamento da Bomba: 626m		
Pressão na cabeça: $1kgf/cm^2$		
Pressão no anular: $0kgf/cm^2$		
Submergência: 0m		

DIMENSIONAMENTO DE BM		
Equipamentos de BM:		
Unidade de Bombeio:		
Curso da UB:	CPM:	
Coluna de Hastes:	Grau do Aço:	
Diâmetro do Pistão:	Âncora:	
Parâmetros Operacionais:		
PPRL:	MPRL:	Peak Torque:
PRHP:	Grau de Utilização das Hastes:	
SMAX:	SMIN:	SADM:
Vazão Bruta:	Vazão Óleo:	
Potência do Motor:		

6. Os dados de fluido e reservatório foram suficientes para que você dimensionasse o sistema a contento? Caso sua resposta seja negativa, descreva de quais dados sentiu falta.

Resposta:

7. Qual ferramenta/método de dimensionamento você utiliza para projetar sistemas de bombeio mecânico? Ela atende plenamente as suas necessidades?

Resposta:

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)