

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Sistema Especialista para Dimensionamento de Sistemas de Bombeio Mecânico

AUTORES:

Cássio Higino de Freitas, Felipe Barros de Paula Leite, Jair Cavalcanti Leite

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO

Abstract

The sucker-rod pumping design is fundamental for the success in the petroleum exploitation using this technique. The choice of equipments and pumping scheme must comply with oil flow stated in accordance with reservoir engineering staff. To find the most suitable set requires experience and an exhaustive process of trial-and-error on the choice of equipments. This paper describes a fuzzy expert system for sucker-rod pumping design that aims to help an engineer in this task, saving time in choosing the equipments and in using expert knowledge on the operational parameters calculation. The preliminary results were encouraging to generate equipment configurations similar to those considered ideal in some production context.

Introdução

Sistemas de bombeio mecânico têm sido usados para produção de poços terrestres desde o nascimento da indústria petrolífera. Mesmo com o surgimento de outras técnicas de produção, como o bombeio de cavidades progressivas (BCP), bombeio de cavidades submersas (BCS) e *gas-lift*, seu uso ainda é majoritário nos campos de produção do Brasil, onde está presente em 71% dos campos de produção. Isso se dá 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 (Costa, 2005).

O dimensionamento de um sistema de bombeio mecânico é a atividade na qual são escolhidos os equipamentos de superfície e de fundo a serem instalados no poço, além de serem calculados os parâmetros operacionais indicativos da dinâmica de funcionamento a que serão submetidos para fazê-lo produzir a vazão ideal. O dimensionamento é um procedimento de suma importância para a utilização adequada do bombeio mecânico tentando equilibrar maior produtividade, maior vida útil dos equipamentos, menor número de falhas e menor dano ao poço. A determinação precisa de tais condições operacionais é fundamental no projeto de novas instalações e também na análise e otimização das instalações existentes. Os principais valores a serem calculados são a carga máxima na haste polida (*Peak Polished Rod Load* - PPRL), a carga mínima na haste polida (*Minimum Polished Rod Load* - MPRL), o torque máximo no redutor (*Peak Torque* - PT), as tensões máxima e mínima de trabalho na coluna de hastes (SMAX e SMIN, respectivamente) e a tensão máxima admissível na coluna de hastes (SADM).

Ao fazer o dimensionamento, o engenheiro não tem como garantir a obtenção de um valor de vazão desejado, já que este é um dos resultados dos cálculos realizados, e não uma variável de entrada. Caso alguém parta do princípio de se atender a algum valor de vazão e deseje chegar a um modo de operação que atenda a este critério, um processo de tentativa e erro entrará em curso até que uma configuração de equipamentos adequada seja encontrada (Takács, 1993). Além disso, ele deverá estar atento a três forças: aos valores de carga suportada pela unidade de bombeio, à tensão na coluna de hastes e ao torque no redutor. Estas forças não poderão exigir por parte dos equipamentos um esforço além daquele que possam suportar sob pena de desgaste precipitado de alguma das partes do equipamento e conseqüentemente a interrupção da produção. Um processo de escolha eficaz dos equipamentos e que atenda à demanda de produção exige experiência por parte do engenheiro na combinação dos equipamentos de fundo e de superfície.

Neste trabalho descrevemos um sistema especialista na tarefa de dimensionar sistemas de bombeio mecânico. Tal artefato é capaz de identificar situações em que um especialista escolheria determinado equipamento (unidade de bombeio, coluna de hastes e bomba de fundo) em detrimento de outros levando em consideração as características dos poços e dados dos equipamentos.

Ferramentas de Dimensionamento pelo Método API

Um método de dimensionamento foi desenvolvido pela American Petroleum Institute, publicado como norma API RP 11L (API RP 11L, 1988). O método API, como ele é conhecido, foi desenvolvido a partir de 1954 por um consórcio de fabricantes e usuários de equipamentos de bombeio mecânico dispostos a estudar a fundo os muitos problemas associados à elevação do poço. Nessa norma, os cálculos de dimensionamento são baseados em correlações de dados de teste obtidos durante a fase de pesquisa do projeto. O estudo concentrou seus esforços, sobretudo, nos seguintes tópicos: características de vibração da coluna de hastes, características físicas das hastes e análise dimensional dos sistemas de bombeio mecânico. Foram então desenvolvidos dois programas de computador para análise dos dados obtidos. O primeiro foi responsável pela elaboração de uma tabela na qual eram combinados diâmetros de pistão de bomba de fundo e configurações de colunas de hastes. Tal tabela é um dos pilares desta norma, a partir da qual se pode chegar aos parâmetros adimensionais utilizados nos cálculos do dimensionamento. O outro programa desenvolveu uma série de curvas utilizadas na seleção da unidade de bombeio e várias taxas de produção e combinação de tamanho de hastes, bomba de fundo e velocidade de bombeio.

Vários sistemas de dimensionamento já foram desenvolvidos. O API-97 é uma ferramenta computacional que foi desenvolvida para a realização dos cálculos do dimensionamento (Costa, 1997). Nele, o sistema informa os dados do reservatório, a unidade de bombeio, a configuração da coluna de hastes, o diâmetro do pistão da bomba de fundo e os parâmetros operacionais de funcionamento (curso de trabalho da UB, frequência de bombeio). Os cálculos do dimensionamento são feitos utilizando a norma API RP 11L (API RP 11L, 1988), ampliando o horizonte inicial de aplicação da norma, passando a abranger, dentre outras coisas, a inclusão do efeito da pressão de fluxo na cabeça e no anular, análise nodal com a bomba de fundo em qualquer profundidade e o cálculo do nível dinâmico considerando o fluxo multifásico no anular tubo revestimento (Costa, 1997).

Este sistema, inicialmente programado em Visual Basic, não utiliza dados reais com as características do poço para o qual o sistema esta sendo projetado, assim como nos casos de redimensionamento. O projeto SOLAR-BM teve como um de seus resultados a migração deste sistema para uma plataforma corporativa com acesso aos dados de produção dos poços analisados, tendo para isso seu código fonte convertido para a linguagem de programação Java. A migração do sistema também permitiu que ele fizesse parte de uma plataforma de análise de bombeio mecânico unificada.

A maioria dos sistemas para dimensionamento de bombeio mecânico são ferramentas que não utilizam dados históricos de produção e das condições operacionais que podem ser utilizados durante o projeto. O novo sistema oferece esta possibilidade, mas ela não está totalmente aproveitada no método do API-97. Mesmo com estas novas funcionalidades acrescentadas pelo novo sistema, o processo de tentativa e erro na escolha dos equipamentos ainda permanece. Quando uma configuração de equipamentos não satisfaz aos requisitos de produção, o engenheiro precisa escolher outros equipamentos que possam então satisfazer tais necessidades. Uma nova funcionalidade que vislumbramos para este novo sistema foi o desenvolvimento de um sistema especialista no dimensionamento de bombeio mecânico. A criação de configurações de equipamentos ficaria a cargo do sistema computacional, que avaliaria o nível de adequação das configurações geradas a partir do conhecimento de especialistas experientes na tarefa de dimensionar sistemas de bombeio mecânico. Tal conhecimento seria então avaliado por um

sistema de inferência baseado na lógica *fuzzy*, com o qual pode aproximar suas regras de avaliação da forma de raciocínio de especialistas humanos.

O sistema especialista

O sistema especialista SEDBM (Sistema Especialista no Dimensionamento de Bombeio Mecânico) parte do pressuposto de se atender a um valor de vazão determinado em conjunto com a equipe de engenharia de poço, que é passado como entrada na interface do sistema. Outros valores de entrada importantes e que são ser informados pelo usuário são a profundidade de assentamento da bomba de fundo, as pressões na cabeça do poço e no espaço anular entre o revestimento e a coluna de produção. Outro parâmetro a ser informado pelo usuário é se o óleo a ser produzido está misturado com elementos corrosivos ou se há possibilidade de bloqueio de gás, produção de areia ou parafinação.

O SEDBM realiza o dimensionamento a partir dos dados do fluido obtidos da base integrada e dos valores de entrada informados pelo usuário. Estes dados são analisados utilizando regras de inferência cujos resultados são configurações de equipamentos. Em vez da lógica clássica, foi adotada a lógica *fuzzy* (Klir & Yuan, 1995) para definição das regras de inferência. Tal decisão foi tomada com o intuito de aproximar as tomadas de decisão do sistema especialista da estrutura de raciocínio do ser humano, que é imprecisa e subjetiva (Negnevitsky, 2005).

No processo de dimensionamento, devem ser escolhidas a bomba de fundo, a coluna de hastes e a unidade de bombeio a serem instaladas no poço para produção. Apesar de cada equipamento ser escolhido separadamente, os cálculos dos parâmetros operacionais dependem de características de todos os equipamentos trabalhando em conjunto. Dessa forma, o SEDBM define a geração de configurações de bombeio mecânico, combinando as unidades de bombeio e bombas de fundo vindos da base de dados e as configurações de coluna de hastes definidas na norma API RP 11L. Tais configurações geradas deverão ser compatíveis com a norma, ou seja, as colunas de hastes somente poderão ser combinadas com aquelas bombas de fundo cujo diâmetro do pistão esteja tabelado para aquela coluna de hastes. As configurações consideradas incompatíveis são automaticamente descartadas neste ponto de execução do sistema. Além disso, para cada unidade de bombeio, são geradas configurações para cada curso de trabalho possível para ela e também para a faixa de valores de frequência de bombeio possível. Para esta última, definiu-se a faixa entre 1 e 25 ciclos por minuto.

Para se chegar a estas configurações, o SEDBM analisa as características de cada equipamento para classificar a adequação daquela configuração às características do fluido a ser explorado e à vazão e profundidade requeridas pelo usuário.

Na elaboração do sistema especialista, definimos as variáveis que deveriam ser adotadas como critério de escolha de cada equipamento. Tais variáveis passaram por um processo de *fuzzificação*, ou seja, foram convertidas em valores pertencentes a conjuntos *fuzzy*, aos quais possuirão um grau de pertinência entre totalmente não pertencente (valor 0) e totalmente pertencente (valor 1) a um conjunto. As chamadas *variáveis lingüísticas* são aquelas que terão valores do domínio a ela atribuídos. Tais valores têm avaliados seu grau de pertinência a um conjunto *fuzzy*, que no sistema de inferência dos sistemas especialistas representam as características imprecisas e subjetivas que se deseja tratar. Eles são denominadas *valores lingüísticos*.

Para a bomba de fundo, definimos como critério de classificação a vazão bruta calculada e o diâmetro do seu pistão. O valor da vazão bruta deverá atender à vazão de projeto determinada pelo usuário na interface do sistema. Este valor poderá ser maior que aquele determinado em projeto, porém, ele não poderá ser muito maior que a vazão de projeto determinada, sob pena de interferir na pressão de fundo do poço, o que poderia reduzir a vida útil de produção do reservatório. Caso a vazão obtida seja um pouco menor que a vazão de projeto, ela pode ser levada em consideração pelo projetista. Para que a

vazão seja considerada, foi estabelecido que a razão entre a vazão bruta e a vazão de projeto deverá estar dentro do intervalo [0.8, 1.5], levando em consideração que este valor deverá ser no mínimo 80% daquele definido em projeto e no máximo 1.5 vezes este valor. Este valor, denominado aqui de *fator de atendimento da vazão* (Δfav), será a variável a ser *fuzzificada* para indicar o nível de satisfação da vazão. Para este domínio, foi definido um único valor lingüístico, “Atende Vazão”, e seu grau de pertinência a este conjunto é definido da seguinte forma:

$$\mu_{\Delta fav}(x) = \begin{cases} 0.5 * \left(\frac{x - 0.8}{1.0 - 0.8} \right) & \text{se } x \in [0.8, 1.0] \\ \frac{x - 0.5}{1.5 - 0.5} & \text{se } x \in [1.0, 1.5] \end{cases}$$

O gráfico desta equação pode ser visto na Figura 1a.

O outro critério de escolha da bomba de fundo é o diâmetro do seu pistão. Especialistas recomendam que se evite o uso de bombas de diâmetro muito grande ou muito pequeno (Costa, 2005). A partir disso, definimos três valores lingüísticos no processo de *fuzzificação* do diâmetro do pistão: “Pequeno”, “Médio” e “Grande”. Optamos por definir três funções trapezoidais (Negnevitsky, 2005) para definir o grau de pertinência do diâmetro do pistão a estes três conjuntos. Estas funções foram projetadas para que, nos intervalos em que o grau de pertinência não fosse total, elas fossem complementares (Klir & Yuan, 1995). Elas podem ser visualizadas, na ordem citada, na Figura 1b.

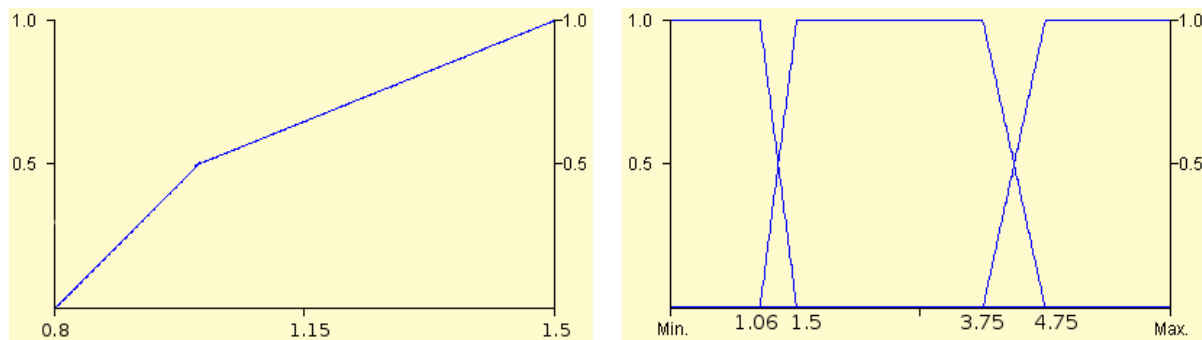


Figura 1: Gráficos das Funções de Pertinência: (a) de “Atende Vazão” (b) e do Diâmetro do Pistão aos conjuntos “Pequeno”, “Médio” e “Grande”

Para a coluna de hastes, definimos como critério de classificação o seu grau de utilização. Este valor já é calculado pelos sistemas de dimensionamento convencionais e é dado pela razão entre a tensão máxima nas hastes e a tensão máxima admissível. Quanto mais elevado for este valor, maior o risco de ruptura do equipamento. Em condições hostis, como a presença de ácido sulfídrico, produção de areia ou parafinação, esse risco é ainda maior, pois tais fatores aceleram seu processo de desgaste. No processo de *fuzzificação* desta variável, ela terá graus de pertinência aos conjuntos “Baixo”, “Médio” e “Alto”, de acordo com o seu valor obtido. As funções de pertinência a estes conjuntos podem ser visualizadas na Figura 2a.

Este gráfico sofre um ligeiro deslocamento para o caso da coluna de hastes estar trabalhando em condições adversas. Neste caso, as faixas de tolerância que classificam as hastes são reduzidas, prevendo o desgaste maior ao qual a haste será submetida. Esta característica é informada ao sistema por meio da interface com o usuário. O gráfico das funções de pertinência com tal modificação pode ser visto na Figura 2b.

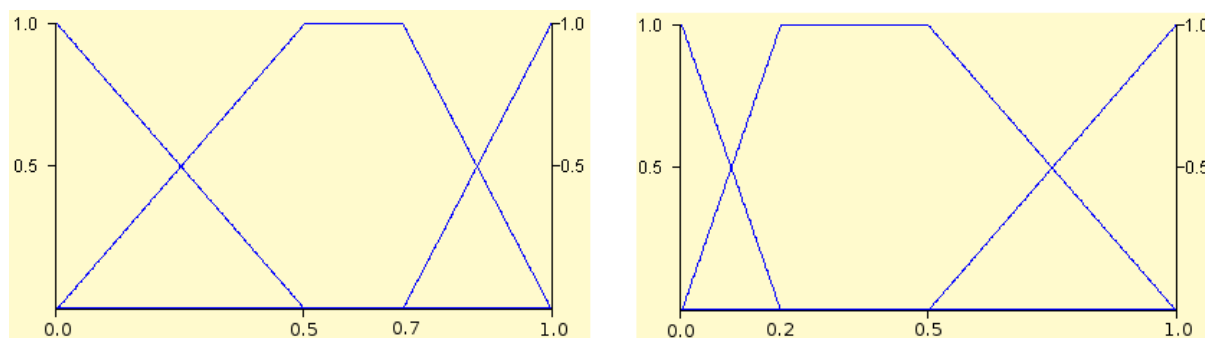


Figura 2: Gráficos das Funções de Pertinência do Grau de Utilização das Hastes: (a) em condições normais e (b) em Condições Hostis

Outra questão da coluna de hastes tratada pelo sistema especialista é o número de diferentes diâmetros das hastes que compõem a coluna. Cada haste pode possuir diâmetros de diferentes tamanhos, conforme padronizado pela norma API SPEC 11B (API SPEC 11B, 1998). Os percentuais de combinação de hastes estão padronizados pela norma API RP 11L (API RP 11L, 1988). Especialistas avaliam que, à medida que a profundidade do poço aumenta, se deva optar por um número maior de tipos de haste compondo a coluna. Isso se deve ao fato de que hastes heterogêneas reagem melhor ao movimento alternado imprimido pela unidade de bombeio (Costa, 2005). Na norma, API RP 11L, é possível verificar quantos tipos de haste compõem uma configuração de coluna através do seu código. Por exemplo, o código 86 mostra o maior e o menor diâmetro (em oitavos de polegada) pertencente à configuração, além dos diâmetros intermediários; no caso, a coluna é composta por hastes de 1, 7/8 e 3/4 de polegada. No sistema especialista, definimos que o número de combinações de hastes que a coluna poderá ter será determinado pela profundidade de assentamento da bomba. Neste caso, somente as colunas com o número de combinações determinado serão utilizadas para a geração das classificações. Os limites estabelecidos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação da Profundidade de Assentamento da Bomba de Fundo

Profundidade	Classificação do Poço	Número de tipos de hastes
Até 600m	Raso	1
Entre 601 e 900m	Intermediário	2
Entre 901 e 1500m	Fundo	3
A partir de 1501m	Muito Fundo	4

Para a unidade de bombeio, dois fatores foram definidos como critério de classificação. O primeiro é quanto sua estrutura está será exigida no processo de produção. O segundo é quanto o redutor de velocidade será exigido durante a operação. Para verificar a utilização da estrutura, utilizamos como parâmetros as cargas máxima e mínima na haste polida. Já para a verificação da solicitação do redutor, utilizamos como parâmetros o torque máximo no redutor e a frequência de bombeio definida para a configuração de bombeio mecânico.

O SEDBM compara os valores de carga máxima e carga mínima com a capacidade estrutural da unidade de bombeio. Este valor pode ser obtido a partir de seu código API, onde também são especificados a capacidade ao torque e maior curso que o equipamento pode alcançar (API SPEC 11E, 1994). A carga máxima não pode ser maior que a capacidade estrutural sob o risco de quebra do equipamento. Mesmo se for menor, especialistas consideram um valor limite de carga máxima para um uso seguro da unidade de bombeio. Também consideramos uma margem de valor mínimo ideal

para a carga máxima, já que unidades de bombeio maiores, que suportam cargas maiores e custam mais caro, deveriam ser usadas em situações em que fossem razoavelmente exigidas, como na produção de um volume maior de fluido. O sistema especialista *fuzzifica* a razão entre a carga máxima e a capacidade estrutural. Definimos as funções de pertinência aos conjuntos “Baixa”, “Média” e “Alta”, cujos gráficos podem ser visualizados na Figura 3a.

Especialistas afirmam que a carga mínima deve ter o seu valor o mais distante possível de zero para evitar que ocorram batidas de cabresto no ciclo de bombeio. Este fenômeno consiste na descida da cabeça do cavalo mais rápida do que a haste polida (Costa, 2005). No sistema especialista, sempre que uma configuração gerada consegue um valor negativo de carga mínima, ela é automaticamente descartada. Para todas as outras cujo valor tenha sido maior que zero, este valor foi comparado com a capacidade estrutural da unidade de bombeio, a exemplo do que foi feito com a carga máxima. Porém, no processo de *fuzzificação* da razão entre estes valores, definimos funções de pertinência a apenas dois conjuntos, “Baixo” e “Alto”. Os gráficos destas funções de pertinência podem ser visualizados na Figura b3.

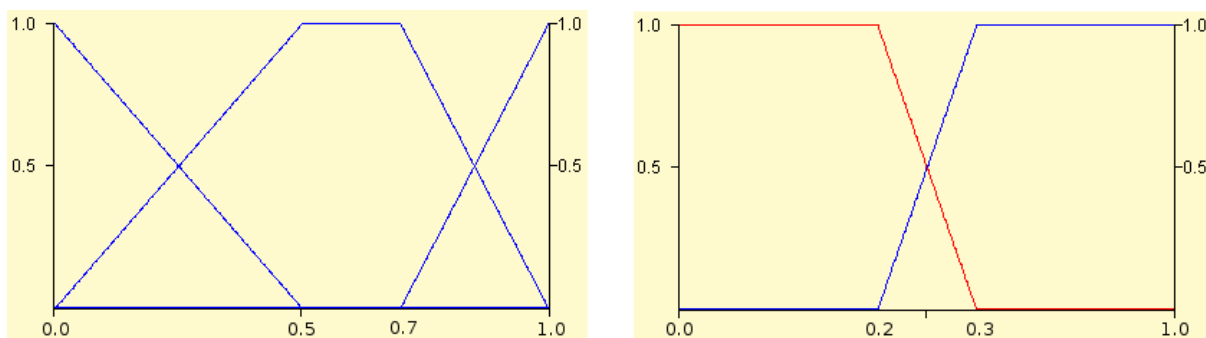


Figura 3: Gráficos das Funções de Pertinência: (a) da razão Carga Máxima/Capacidade Estrutural e (b) da razão Carga Mínima/Capacidade Estrutural

O outro critério de avaliação das condições de uso da unidade de bombeio é o nível de solicitação do redutor de velocidade do equipamento. Para estipular tal parâmetro, o sistema especialista utiliza o torque máximo no redutor e a frequência de bombeio. O critério utilizado é que torque máximo não poderá ser maior que o valor de capacidade ao torque definido no código API da unidade de bombeio (API SPEC 11E, 1994). Mesmo se for menor, especialistas sempre definem um valor máximo para servir como margem de segurança para reduzir a possibilidade de quebra do equipamento. Na implementação do sistema, este valor foi fixado em 70%. O sistema especialista *fuzzifica* a razão entre o torque máximo no redutor e a capacidade ao torque conseguida de seu código API. Foram então definidas funções de pertinência deste valor aos conjuntos “Baixo”, “Médio” e “Alto”. Os gráficos das funções de pertinência podem ser visualizados na Figura 4a.

Nos sistemas de dimensionamento não-inteligente, a frequência de bombeio é um dos parâmetros de entrada informados pelo usuário na interface. Neste sistema especialista, as configurações geradas serão testadas com os valores de uma faixa de frequência de bombeio estabelecida entre 1 e 25 ciclos por minuto. Cada valor adotado pela classificação pertencerá aos conjuntos “Baixo”, “Médio” e “Alto” e terá seu grau de pertinência a cada um determinado pelas funções representadas, nesta ordem, no gráfico da Figura 4b.

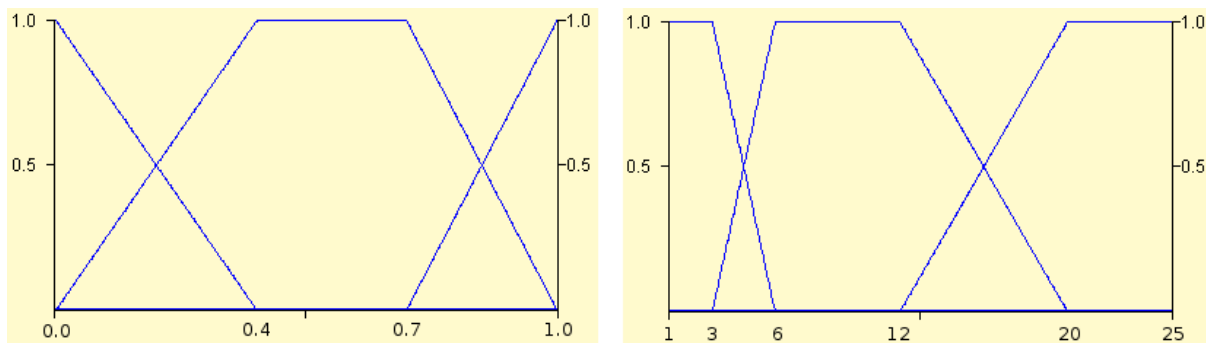


Figura 4: Gráfico das Funções de Pertinência: (a) da Razão Torque Máximo/Capacidade ao Torque e (b) da frequência de Bombeio

Após a classificação de cada parâmetro, determinada pelos graus de pertinência aos conjuntos mencionados, é feita a classificação de cada equipamento de cada configuração gerada. Esta classificação será feita a partir de um motor de inferência, que possui uma série de regras que vão determinar o nível de adequação dos equipamentos à produção no poço. As regras são do tipo *SE x é a ENTÃO y é b* . Entretanto, cada uma delas é regida pelos operadores da lógica *fuzzy* em vez daqueles típicos da lógica clássica.

Ao final do processo de inferência, cada uma das regras indicará também o nível de adequação de cada configuração como um todo, determinando graus de pertinência de cada configuração a conjuntos *fuzzy* representados pelos valores lingüísticos: “Ruim”, “Bom” e “Ótimo”. Após a obtenção destes valores, eles são submetidos ao processo de *defuzzificação*, no qual estes conjuntos de saída são convertidos em um único valor escalar (Ross, 2004). Este procedimento tem o intuito de ordenar as configurações geradas através de um único valor resultante do processo de inferência. Este valor indicará numa escala de 0 a 100 o nível de adequação da configuração às condições de produção requisitadas pelo usuário e às características do óleo a ser produzido. O método de *defuzzificação* utilizado por este sistema foi a média de pesos (Ross, 2004). A partir deste resultado, aquelas configurações que obtiveram melhor desempenho no processo de inferência são então exibidas na interface do sistema e submetidas à avaliação do usuário.

Resultados e Discussão

Este sistema especialista oferece alguns progressos no dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico em relação aos sistemas existentes anteriormente. Nele, os equipamentos são escolhidos pelo próprio sistema, a partir do projeto de vazão e profundidade determinados pelo usuário e das informações de reservatório conseguidas de uma base de dados integrada. A escolha de cada um deles é feita a partir do conhecimento obtido junto a especialistas experientes, cuja habilidade conseguida ao longo dos anos os leva a obtenção de soluções adequadas mais rapidamente. O processo de tentativa e erro, típico dos cálculos do dimensionamento, também fica a cargo do sistema, fazendo com que o usuário ganhe tempo na concepção do projeto de bombeio e no descarte de equipamentos inadequados.

O primeiro protótipo desenvolvido já realiza o dimensionamento do sistema de bombeio mecânico somente com os dados de vazão, profundidade e propriedades de reservatório. Um conjunto de configurações de dimensionamento é então obtido segundo o procedimento do sistema especialista descrito na seção anterior. Verificou-se em testes preliminares que aquelas configurações que obtiveram melhor desempenho foram bastante similares ao conjunto de equipamentos considerados mais adequados aos poços testados. Ou seja, se sobressaíram as bombas de fundo que ofereciam a vazão mais próxima daquela determinada em projeto, a coluna de haste mais adequada às tensões a que seriam submetidas e as unidades de bombeio mais apropriadas à carga e torque previstos nos

cálculos. O próximo passo no desenvolvimento deste sistema é a sua validação junto a um conjunto de engenheiros de petróleo especialistas.

Conclusões

Este artigo apresentou um sistema especialista no dimensionamento de sistemas de bombeio mecânico. Ele se valeu do uso de lógica *fuzzy* em lugar da lógica clássica, com o intuito de aproximar as regras de inferência da forma de raciocínio de especialistas humanos na escolha dos equipamentos e na determinação dos parâmetros operacionais. As principais contribuições deste trabalho foram:

- Geração de configurações de equipamentos para o usuário fazendo uso de conhecimento obtido de especialistas;
- Economia de tempo ao fazer a combinação dos equipamentos para o usuário e ao descartar aquelas configurações considerados inadequadas ou impossíveis de serem efetivamente usadas;

Espera-se que, ao final da validação dos resultados junto a engenheiros especialistas, este sistema seja utilizado em larga escala dentro de um ambiente de produção e que as configurações que forem geradas sejam efetivamente seguidas no projeto de sistemas de bombeio mecânico. A principal expectativa é que seu uso gere economia de tempo na elaboração dos projetos de bombeio e que engenheiros novatos possam adquirir experiência de projeto no uso do sistema a curto e médio prazo.

Agradecimentos

Agradecemos ao PRH-22 da ANP, à equipe do projeto SOLAR-BM, que nos auxiliou com a infraestrutura necessária à concepção e desenvolvimento deste sistema e aos engenheiros Rutácio Costa e Gustavo Moisés.

Referências Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Norma API RP 11L. *Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems (Conventional Units)*: API Recommended Practice 11L. 4th ed. 1988.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Norma API SPEC 11B. *Specification for Sucker Rods*: API Specification 11B. 26th ed. 1998.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Norma API SPEC 11E. *Specification form Pumping Units*: API Specification 11E. 17th ed. 1994.

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

COSTA, R. O. *API-97: Projeto de Bombeio Mecânico em Ambiente Windows*. I Encontro Técnico sobre a Informática na Engenharia de Poço. Petrobras. 1997.

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

NEGNEVITSKY, M. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. 2nd. ed. [S.l.]: Addison Wesley, 2005. ISBN 0-321-20466-2.

ROSS, T. J. *Fuzzy Logic for Engineering Applications*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0-470-86074-X.

TAKÁCS, G. *Modern Sucker-rod Pumping*. [S.l.]: PennWell Books, 1993. ISBN 0-87814-383-1.