



**CENTRO UNIVERSITÁRIO JORGE AMADO
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS**

ERIC TARSSIO SOUZA DA SILVA

**EFEITO DE ÓLEOS VISCOSOS NO BOMBEIO CENTRÍFUGO
SUBMERSO**

Salvador

2013

ERIC TARSSIO SOUZA DA SILVA

**EFEITO DE ÓLEOS VISCOSOS NO BOMBEIO CENTRÍFUGO
SUBMERSO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Petróleo e Gás, do Centro Universitário Jorge Amado, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo e Gás.

Orientador: Prof. Rinaldo Antonio de Melo Vieira

Salvador

2013

EFEITO DE ÓLEOS VISCOSOS NO BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Petróleo e Gás, do Centro Universitário Jorge Amado, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo e Gás.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rinaldo Antonio de Melo Vieira (Orientador)
Centro Universitário Jorge Amado

Prof. Dr. Roni Fábio Dalla Costa
Centro Universitário Jorge Amado

Prof. Dr. Carlos Roberto Santos Silva
Centro Universitário Jorge Amado

Nas minhas vitórias durante o trajeto estudantil, nos meus momentos de dificuldades, de desânimos, e até de indecisão, sempre tive ao meu lado uma pessoa carinhosa, mas firme, forte e decidida que me fez encarar de frente os obstáculos que encontrei nessa caminhada. Essa pessoa, verdadeiro “Anjo da Guarda” é minha mãe, a quem dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre esteve presente em minha vida, iluminando meus caminhos, me protegendo e fazendo dos meus sonhos e objetivos, realidade.

À minha mãe Jocenilda e meu pai Jerônimo por ter propiciado esse sonho e estado comigo em todos os momentos vividos até aqui.

A minha família como um todo, pois sei que sempre esteve orando por mim, e confiando no meu sucesso. E um agradecimento especial a Tia Josângela que conseguiu me aturar cinco anos, lado a lado.

Aos meus avôs, Sergio e Domingas e minha bisavó Lina (In memoriam) pelas orações, palavras de Deus e por desejarem sempre meu sucesso.

Aos meus bons colegas de faculdade, pois com eles a caminhada se fez agradável, alegre, e pudemos degustar vários quilos de camarões.

Ao meu orientador, Rinaldo Vieira, que após longas conversas, foi possível ter uma pessoa de uma competência exemplar para cumprir este início de trajeto.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho. Aos que não impediram a finalização deste estudo.

RESUMO

O presente trabalho monográfico objetiva salientar a relevância do Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), método de elevação artificial de grande importância na área de petróleo e gás. Ressalto ainda que esta técnica vem tendo crescente aceitação para a produção petrolífera, pois é bastante eficaz em poços de alta produtividade, sendo utilizado também em poços de médias e baixas vazões, propiciando maior sustentabilidade, por evitar vazamentos e exposição de fluidos ao meio ambiente, além do BCS ser um recurso que apresenta grande flexibilidade operacional, quando utilizado conjuntamente com um variador de frequência (USD). Como as curvas de desempenho das bombas são fornecidas para água e normalmente os óleos produzidos apresentam viscosidades muito superiores, não se pode aplicar as curvas dos fabricantes diretamente em um projeto. Com isso, são utilizados sistemas computacionais, em sua maioria baseados no método da *Hydraulic Institute – USA*, com a finalidade de corrigir estas curvas do fabricante. Diante dessa importância do método, neste trabalho será feito, através de uma pesquisa exploratória, um estudo do método *Hydraulic Institute – USA*, fazendo um comparativo com os resultados experimentais feitos na UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) por Amaral (2007), que elaborou experimentos em diversas bombas centrífugas submersas, entre elas a BCS do modelo REDA GN 7000, em variadas condições de operação e viscosidades do fluido, objetivando desenvolver um modelo de representação do escoamento monofásico em BCS operando com fluidos viscosos. Com a finalidade de obter mais subsídios para a fundamentação teórica do trabalho, realizei pesquisas também em informativos, artigos científicos e monografias de mestrado referentes ao tema.

Palavras-chave: BCS, *Hydraulic Institute – USA*, resultados experimentais, curvas de desempenho.

ABSTRACT

This monograph aims to highlight the relevance of Electrical Submerged Pumps (ESP), method of artificial lift of great importance in the area of oil and gas. Further emphasize that this technique has been growing acceptance for oil production, because it is fairly effective in wells with high productivity and is also used in wells of medium and low flows, providing greater sustainability, to avoid leaks and fluid exposure to the environment, beyond the BCS is a feature that has great operational flexibility when used in conjunction with a variable of frequency (USD).

As the performance curves of the pumps are provided for water and oil produced normally have much higher viscosities, the industry can not apply the curves directly from manufacturers on a project. Thus, computer systems are used mostly based on the method of Hydraulic Institute - USA, in order to correct these curves manufacturer. Given this importance of the method, this work will be done through an exploratory research, a study of the Hydraulic Institute method - USA, making a comparison with the experimental results made at UNICAMP (University of Campinas) by Amaral (2007), who prepared experiments on various Electrical Submerged Pumps, including the ESP model REDA GN 7000, in varying operating conditions and fluid viscosities, aiming to develop a model of representation of single phase flow in BCS operating with viscous fluids. In order to get more support for the theoretical basis of the work, also performed research in informational, scientific articles and monographs masters on the topic.

Keywords: ESP, Hydraulic Institute – USA, experimental results, performance curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamentos de Bombeio Centrífugo Submerso. (Fonte: THOMAS, 2004)	15
Figura 2 - Exemplos de bombas centrífugas, difusor e impulsor. (Fonte: BARBOSA, 2008)	16
Figura 3 - Motor elétrico utilizado em BCS. (BARBOSA, 2008)	17
Figura 4 - Cabos elétricos: (a) Chato e (b) redondo. (Fonte: BARBOSA, 2008)	18
Figura 5 - Ábaco de Stepanoff.....	22
Figura 6 - Definições gráficas do <i>Hydraulic Institute-USA</i> para bombas centrífugas de 2" a 8"	24
Figura 7 - Curva do fabricante do desempenho da Bomba BCS REDA GN-7000. Fonte: Amaral (2007)	28
Figura 8 - Curvas de desempenho de dados experimentais da BCS GN-7000 a 3500 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)	30
Figura 9 – Curvas de eficiência de dados experimentais da BCS GN-7000 a 3500 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)	31
Figura 10 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 60 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).	32
Figura 11 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 270 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).	32
Figura 12 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 720 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).	33
Figura 13 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 1020 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).	33
Figura 14 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação de 3500 rpm para 3000 rpm. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).	35
Figura 15 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação de 3500 rpm para 2400 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)	36
Figura 16 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação de 3500 rpm para 1800 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)	36

Figura 17 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 3000 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute –USA*, de 1cP para 270 cP. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)38

Figura 18 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 3000 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute –USA* de 1cP para 1020 cP . Fonte: Adaptado de Amaral (2007)38

Figura 19 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 1800 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute –USA* de 1cP para 270 cP . Fonte: Adaptado de Amaral (2007)39

Figura 20 - Comparativo de curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 1800 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute –USA* de 1cP para 1020 cP .Fonte: Adaptado de Amaral (2007) 40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCS	bombeio centrífugo submerso
ANP	agencia nacional de petróleo, gás natural e biocombustíveis
RPM	rotação por minuto
SI	sistema internacional
Head	altura de elevação
HI-USA	hydraulic institute - USA
°API	densidade do petróleo - graduação API
BEP	<i>best efficiency point</i> (melhor ponto de eficiência)
τ	tensão
ν	viscosidade cinemática
μ	viscosidade dinâmica
z	variável para dedução dos fatores de correção do método da HI - USA
y	variável para dedução dos fatores de correção do método da HI - USA
F _T	força de escoamento
A	área
N	eficiência
Q	vazão
H	<i>head</i>
H _{BEP}	<i>head</i> no BEP
Q _{BEP}	vazão no BEP
C _q	fator de correção da vazão do método da HI - USA
C _N	fator de correção da eficiência do método da HI - USA
C _{H1}	fator de correção 1 do <i>head</i> do método da HI - USA
C _{H2}	fator de correção 2 do <i>head</i> do método da HI - USA
C _{H3}	fator de correção 3 do <i>head</i> do método da HI - USA
C _{H4}	fator de correção 4 do <i>head</i> do método da HI - USA
Pa.s	pascal por segundo
m ² /s	metro quadrado por segundo (medida de aceleração)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO	15
1.1 Equipamentos de subsuperfície	16
1.1.1 Bomba de múltiplos estágios	16
1.1.2 Admissão da bomba ou <i>intake</i>	17
1.1.3 Motor Elétrico Trifásico	17
1.1.4 Protetor	18
1.1.5 Cabo Elétrico	18
1.2 Equipamentos de superfície	19
1.2.1 Quadro de Comandos	19
1.2.2 Transformador	19
1.2.3 Cabeça de Produção.	19
1.3 Fluido e Viscosidade	20
1.4 Correção de curvas da Bomba Centrífuga para fluidos viscosos	21
1.5 Leis de Afinidade	26
2 ESTUDO COMPARATIVO.....	28
2.1 O efeito da viscosidade sobre os resultados experimentais.....	29
2.2 Estudo da viscosidade utilizando método do HI-USA direto	31
2.3 Estudo da alternância de rotação e das Leis de Afinidade.....	34
2.4 Análise das curvas de desempenho, a partir da variação de velocidade de rotação e viscosidade	37
CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE A.....	44
APÊNDICE B.....	53
APÊNDICE C.....	57
ANEXOS.....	61

INTRODUÇÃO

O petróleo é considerado uma matriz energética nacional e mundial. É possível observar a produção petrolífera se alavancar consideravelmente com diversas novas descobertas de jazidas e novas licitações feitas pela ANP (Agência Nacional do Petróleo). A partir dessa abundância e da necessidade de produção, buscam-se técnicas para aperfeiçoar e aumentar a retirada de hidrocarbonetos destas jazidas.

Conforme Nascimento (2005) no início da vida produtiva de um reservatório, a pressão normalmente é elevada, sendo suficiente para que o fluido presente no reservatório tenha capacidade de escoar livremente para a superfície. Denomina-se este fenômeno como Elevação Natural e os poços que detêm esta capacidade de produção são chamados de poços surgentes.

Contudo, no decorrer do tempo, o poço inicialmente surgente, vai perdendo pressão, até que o mesmo não tenha condições de produzir sozinho. Buscando a solução deste problema, existem os métodos de Elevação Artificial, que tem como finalidade fornecer energia ao fluido no interior do poço para que o mesmo possa escoar até a superfície. Os métodos de maior uso são:

- Bombeio Mecânico;
- Bombeio de Cavidade Progressiva (BCP);
- Gás Lift Contínuo (GLC) e Intermitente (GLI);
- Bombeio Centrífugo Submerso (BCS).

Este trabalho será direcionado para o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), um método de elevação artificial de grande importância na área de petróleo e gás. Esta técnica vem tendo crescentes aceitações para a produção petrolífera, pois é bastante eficaz em poços de alta produtividade, sendo utilizado também em poços de médias e baixas vazões, propiciando maior sustentabilidade, por evitar vazamentos e exposição de fluidos ao meio ambiente, além do BCS ser um recurso que apresenta grande flexibilidade operacional, quando utilizado conjuntamente com um variador de frequência (USD).

A utilização do BCS possui limitações quanto ao dimensionamento da mesma para a produção de óleos viscosos, visto que os fabricantes as dimensionam visando ao bombeamento de água. Considerando a diferença de viscosidade entre

os fluidos, constatou-se que esta diferença de características físicas, provoca mudanças no funcionamento e desenvolvimento adequado das bombas.

Havia uma dificuldade por parte das empresas operadoras de poços, que recebem as bombas dos seus fabricantes, com as curvas de desempenho, pois são feitas a partir do uso da água como fluido de referência. A partir da necessidade de correção das curvas de desempenho das bombas centrífugas para fluidos viscosos, criaram-se métodos com a finalidade de corrigir estas curvas para fluidos com viscosidade relativamente maior que a da água.

As empresas de produção de petróleo utilizam sistemas computacionais baseados no *Hydraulic Institute-USA* objetivando tornar o BCS propício e eficiente para a produção de óleos viscosos. Contudo, alguns pesquisadores identificaram que não é um método que traz resultados que condizem integralmente com dados experimentais.

Com a necessidade de correção das curvas de desempenho das BCSs, e dada a relevância dos métodos criados para tais correções, optei pela abordagem de “Efeito de fluidos viscosos para o Bombeio Centrifugo Submerso”, como tema para o desenvolvimento deste trabalho monográfico.

Visando a realizar um estudo efetivo e direcionado, estabeleceu-se como objetivo geral, “Analisar comparativamente o uso da técnica de elevação artificial por Bombeio Centrifugo Submerso com fluidos de alta viscosidade, verificando o método utilizado em sistemas computacionais para corrigir curvas de desempenho de BCSs.” Para a consecução desta meta, estabeleceram-se como objetivos específicos: a) fazer um comparativo do método *Hydraulic Institute-USA (HI-USA)* com resultados experimentais obtidos a partir de Amaral (2007); b) apresentar as devidas diferenças de resultado; c) analisar se o método HI-USA é aplicável para a BCS GN 7000.

Em busca de uma fundamentação teórica com bases científicas, foi estudada uma tese de mestrado publicada por Gilmar Amaral (2007), que tem como título “Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrifuga Submersa operando com Fluidos Viscosos” tendo em vista que o referido autor utilizou de procedimentos experimentais a fim de buscar resultados de comportamento de bombas centrífugas operando com fluidos viscosos. Utilizaram-se ainda como fontes de pesquisa, informativos, artigos e publicações outras pertinentes ao tema.

A fim de analisar se o método HI-USA é aplicável a BCS GN 7000, serão utilizados os resultados experimentais da BCS GN 7000, obtidos por Amaral (2007) e comparados com um estudo do método do *Hydraulic Institute-USA*.

Na realização de qualquer trabalho técnico ou científico, faz-se o detalhamento exato de toda a ação desenvolvida no seu percurso, e a isso chamamos de *metodologia*. A pesquisa exploratória tem como objetivo o conhecimento profundo do problema, permitindo a construção de hipóteses, levando em conta o levantamento bibliográfico realizado. O método de abordagem utilizado neste trabalho é o dedutivo, pois possibilita alcançar somente a generalizações empíricas de observações. Segundo Rene Descartes, o método dedutivo é aquele que possibilita a aquisição do conhecimento através da elaboração lógica de hipóteses e da busca de sua confirmação ou negação.

No trabalho, foi feito um estudo comparativo, baseado em revisões bibliográficas, a fim de buscar um conhecimento abrangente sobre o Bombeio Centrífugo Submerso. Será feito um estudo de teorias e métodos criados por estudiosos como Stepanoff e Turzo et. al. e entidade como o *Hydraulic Institute-USA*, com o objetivo de corrigir as curvas de bombas para operar com fluidos viscosos.

1 BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO

O Bombeio Centrífugo Submerso é uma das mais importantes técnicas na indústria petrolífera brasileira, principalmente ao tratar de produções de óleo com baixo °API, conclusão retirada a partir do Boletim de Produção de Petróleo e Gás Natural – Maio 2013, disponibilizado pela ANP.

Segundo Monte Verde (2011), o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um método de elevação artificial bastante utilizado. O referido método consiste na utilização de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios, geralmente instalada na extremidade da coluna de produção, dentro do poço de petróleo. Pode-se observar na Figura 1 os principais equipamentos que compõem o BCS.

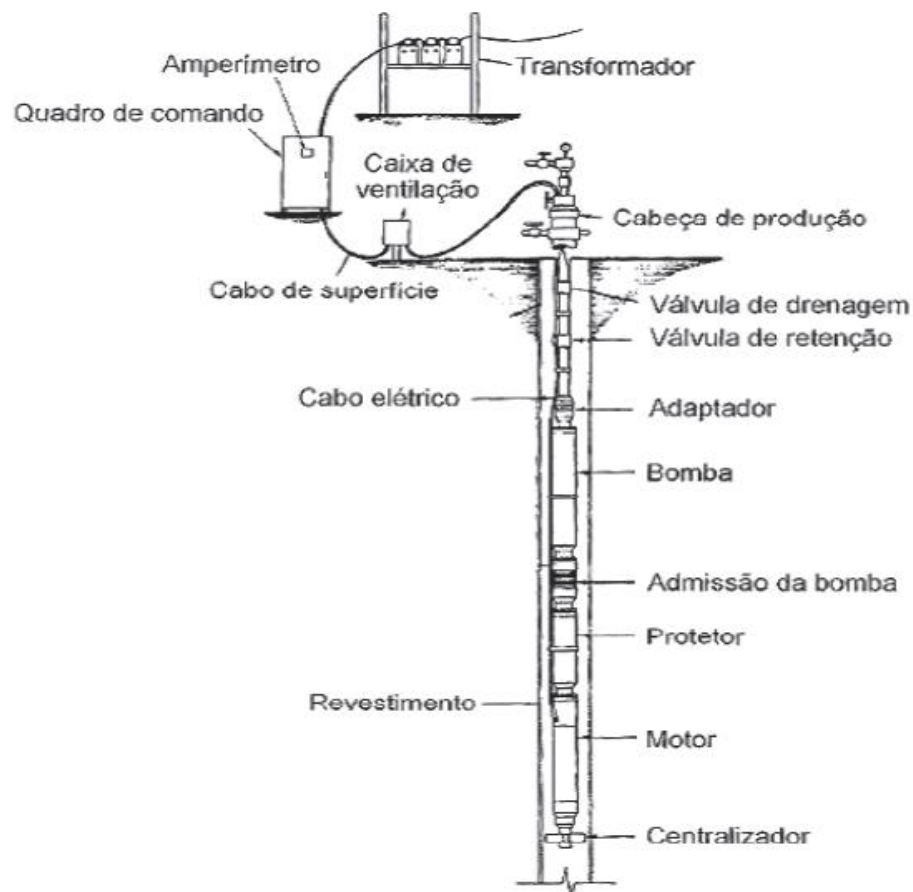


Figura 1 - Equipamentos de Bombeio Centrífugo Submerso. (Fonte: THOMAS, 2004)

Tomando como base a classificação de Thomas (2004), apresento a seguir os Equipamentos de Bombeio Centrífugo Submerso, como se observa:

1.1 Equipamentos de subsuperfície

Os equipamentos de subsuperfície são instrumentos que ficam no interior do poço. São eles:

1.1.1 Bomba de múltiplos estágios

As bombas de múltiplos estágios são compostas por um conjunto de impulsores e difusores trabalhando em série. Cada estágio da bomba centrífuga é composta por um impulsor (e), que fica preso a um eixo, girando a altas rotações (aproximadamente 3500 rpm), transferindo energia ao fluido e conseqüentemente aumentando sua velocidade; e um difusor (e), elemento estacionário da bomba, que tem como função direcionar o fluido impulsionado para o estágio imediatamente superior. São os estágios que fornecem a energia que o fluido necessita para chegar até a superfície. Este equipamento, que pode ser observado na figura 2 (a, b ou c), determina a vazão que será bombeada o fluido.

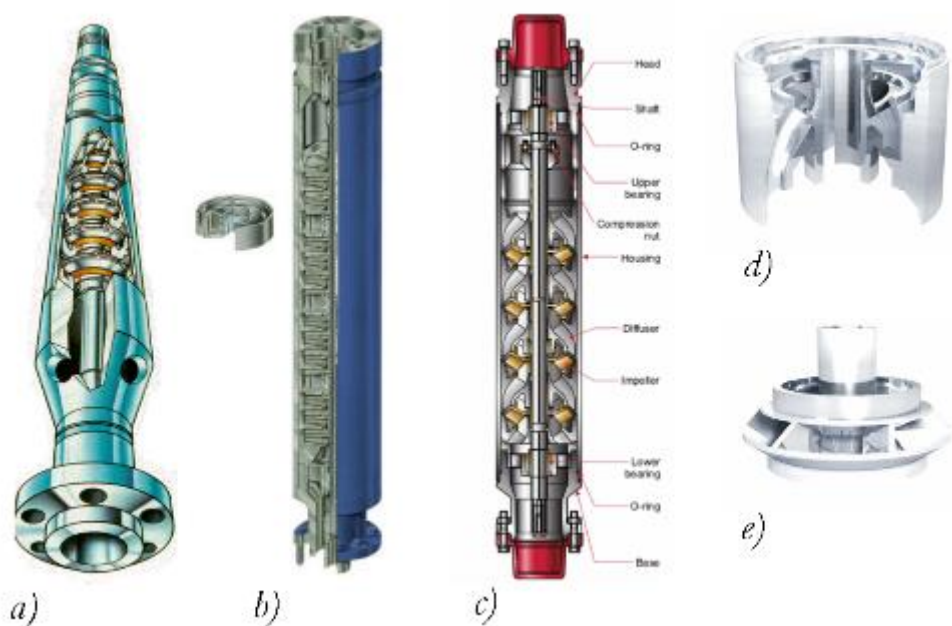


Figura 2 - Exemplos de bombas centrífugas, difusor e impulsor. (Fonte: BARBOSA, 2008)

1.1.2 Admissão da bomba ou *intake*

A admissão é um equipamento que encaminha o fluido para o primeiro estágio da bomba. Este equipamento pode ter a forma de um separador de gás, de modo a evitar que a bomba faça a sucção de gás livre, tornando-se muito importante para poços que tenham produção de gás livre e que utilizam o BCS como método de elevação artificial. “A escolha da admissão da bomba, seja do tipo simples ou do tipo separador de gás, é feita em função da série da bomba, da vazão de líquido e da razão gás-líquido nas condições de bombeio.”

1.1.3 Motor Elétrico Trifásico

O motor elétrico trifásico é fabricado para trabalho em condições severas, por estar sempre imerso em fluidos viscosos, a altas pressões e temperaturas bastante elevadas. Este tem a função de transformar energia elétrica em energia mecânica para acionar o eixo da bomba. Pode ser visualizado o interior deste equipamento na figura 3.



Figura 3 - Motor elétrico utilizado em BCS. (BARBOSA, 2008)

1.1.4 Protetor

O protetor está localizado entre a bomba e o motor e tem as seguintes funções:

- Fazer a ligação da carcaça do motor com a carcaça da bomba, assim como os eixos da bomba e do motor;
- Evitar a entrada de fluido produzido no motor;
- Equalizar as pressões do motor e do fluido produzido, a fim de evitar diferencial de pressão no motor;
- Prover o volume necessário para a expansão do óleo do motor devido ao seu aquecimento;
- Alocar o mancal responsável por absorver os esforços axiais transmitidos pelo eixo da bomba.

1.1.5 Cabo Elétrico

O cabo elétrico (figura 4) é responsável por transmitir a energia elétrica da superfície para o motor. Utiliza-se o cabo chato (a) para poços em que há pouco espaço para passagem no espaço anular; cabo redondo (b), quando possui maior espaço.

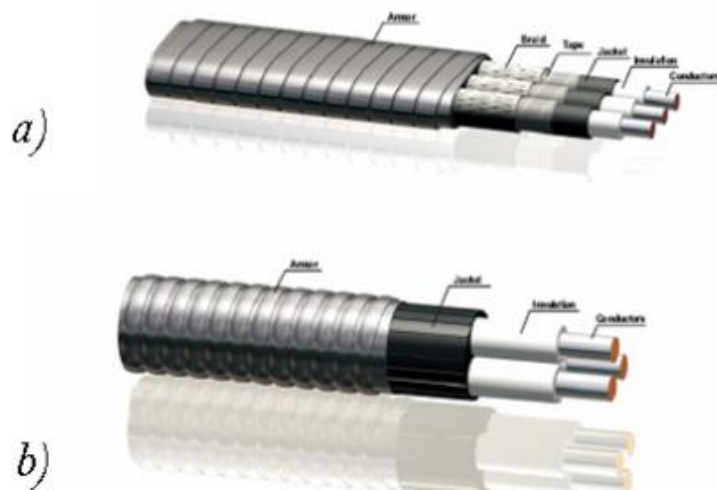


Figura 4 - Cabos elétricos: (a) Chato e (b) redondo. (Fonte: BARBOSA, 2008)

1.2 Equipamentos de superfície

Estes equipamentos se localizam na superfície de poços que produzem por BCS. Os principais equipamentos serão descritos a seguir.

1.2.1 Quadro de Comandos

O quadro de comandos tem a função de controlar e operar os equipamentos localizados ao fundo do poço. São divididos em dois compartimentos:

- Baixa Tensão – localizam-se os relés, amperímetro, temporizador (normalmente alimentados por tensão 110 volts);
- Média Tensão – que abriga os transformadores de corrente e de controles, fusíveis de proteção e a chave seccionadora.

1.2.2 Transformador

O transformador é um equipamento que tem a função de receber a tensão da rede elétrica e transformá-la em tensão correspondente a do motor, contabilizando também as perdas correspondentes ao cabo elétrico.

1.2.3 Cabeça de Produção.

Cabeça de produção é um equipamento especial com passagens para a coluna de produção e o cabo elétrico. Thomas (2004) afirma que:

- Em poços terrestres (normalmente com baixa pressão) utilizam-se flanges bipartido com borrachas;
- Em poços marítimos (normalmente com altas pressões e regido por normas de segurança rígidas) é utilizado um mandril enroscado.

1.3 Fluido e Viscosidade

O fluido é uma substância que se deforma continuamente, ao ser submetido a uma força tangencial constante qualquer. Sendo mais específico, fluido é uma substância que, submetida a uma força tangencial constante, não atinge uma nova configuração de equilíbrio estático (BRUNETTI, 2008).

Os fluidos a serem considerados neste trabalho são newtonianos, chamados dessa forma, pois seguem os princípios da Tensão de Cisalhamento - Lei de Newton da Viscosidade, que é a tensão (τ) gerada pela variação de velocidade ao longo da direção normal das paredes (dv/dy) e pode ser equacionada da seguinte forma (BRUNETTI, 2008):

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

O coeficiente de proporcionalidade (μ) é chamado de Viscosidade Dinâmica. “Pode-se dizer, então, que a viscosidade dinâmica é a propriedade dos fluidos que permite equilibrar, dinamicamente, forças tangenciais externas quando os fluidos estão em movimento.” (BRUNETTI, 2008). As unidades que a determinam pelo Sistema Internacional (SI) é o Pa*s, contudo utiliza muito o centipoise (cP).

Outro coeficiente bastante utilizado é a Viscosidade Cinemática (ν), que tem como unidades mais usuais no Sistema Internacional (SI) m²/s e o stoke (St):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

Para fluidos newtonianos a viscosidade é fixada pelo estado da substância (temperatura e pressão), neste trabalho o fluido de operação (glicerina) sofre variação da temperatura com o objetivo de mudar a viscosidade na qual o fluido é bombeado.

O escoamento de fluidos viscosos pode ser caracterizado por regime laminar e turbulento.

“Um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas misturam-se rapidamente enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.” (FOX, 2010).

1.4 Correção de curvas da Bomba Centrífuga para fluidos viscosos

Para possibilitar o bom funcionamento e a viabilidade técnica do BCS, foram necessários estudos de bombas centrífugas trabalhando com fluidos viscosos.

As características dos fluidos de trabalho das bombas centrífugas são de grande importância. As curvas de desempenho destas bombas servem para demonstrar o comportamento das mesmas, a partir da vazão, eficiência, *head* (altura de elevação) e potência. Contudo, estes resultados variam de acordo com a viscosidade.

Pesquisadores como Alexey Joakim Stepanoff (1948) e entidades como *Hydraulic Institute-USA* (1955) foram grandes responsáveis pela criação de métodos que são utilizados para modelagem de bombas centrífugas operando com fluidos viscosos, estes desenvolveram métodos empíricos, com o intuito de reproduzir as curvas das bombas operando em tais condições, a partir das curvas do fabricante que são levantadas com água.

O método de Stepanoff (1948) pode constatar que a rotação constante, a altura de elevação reduz à proporção que há um aumento na viscosidade do fluido de operação. De modo que a rotação específica (N_s) adotada por ele mantém-se constante, conforme a equação seguinte em função da velocidade angular (N), calculada em rotação por minuto, vazão (Q) em gal/min e altura de elevação (H) em pé (ft) (AMARAL, 2007):

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2.3)$$

Tomando como base relações empíricas, propôs-se uma relação entre a vazão (Q) e a altura de elevação (H) da bomba operando com água (índice “w”) e operando com fluidos viscosos (índice “o”), contudo considerando apenas o *BEP* -

Best Efficiency Point (Ponto de Melhor Eficiência da bomba, operando com água)
(AMARAL, 2007):

$$\frac{Q_o}{Q_w} = \left(\frac{H_o}{H_w}\right)^{1,5} \tag{2.4}$$

Visando a análise dimensional, Stepanoff criou um Número de Reynolds, que varia de acordo com a rotação da bomba (N), viscosidade cinemática do fluido (ν), head (H) e vazão (Q) operando com água. Este, tendo como finalidade substituir o valor em um ábaco criado pelo mesmo, e finalmente, encontrando o desempenho da bomba trabalhando com o fluido de viscosidade determinado (AMARAL, 2007).

$$Re_{Stepanoff} = \frac{N * Q_o}{\nu * \sqrt{H_w}} \tag{2.5}$$

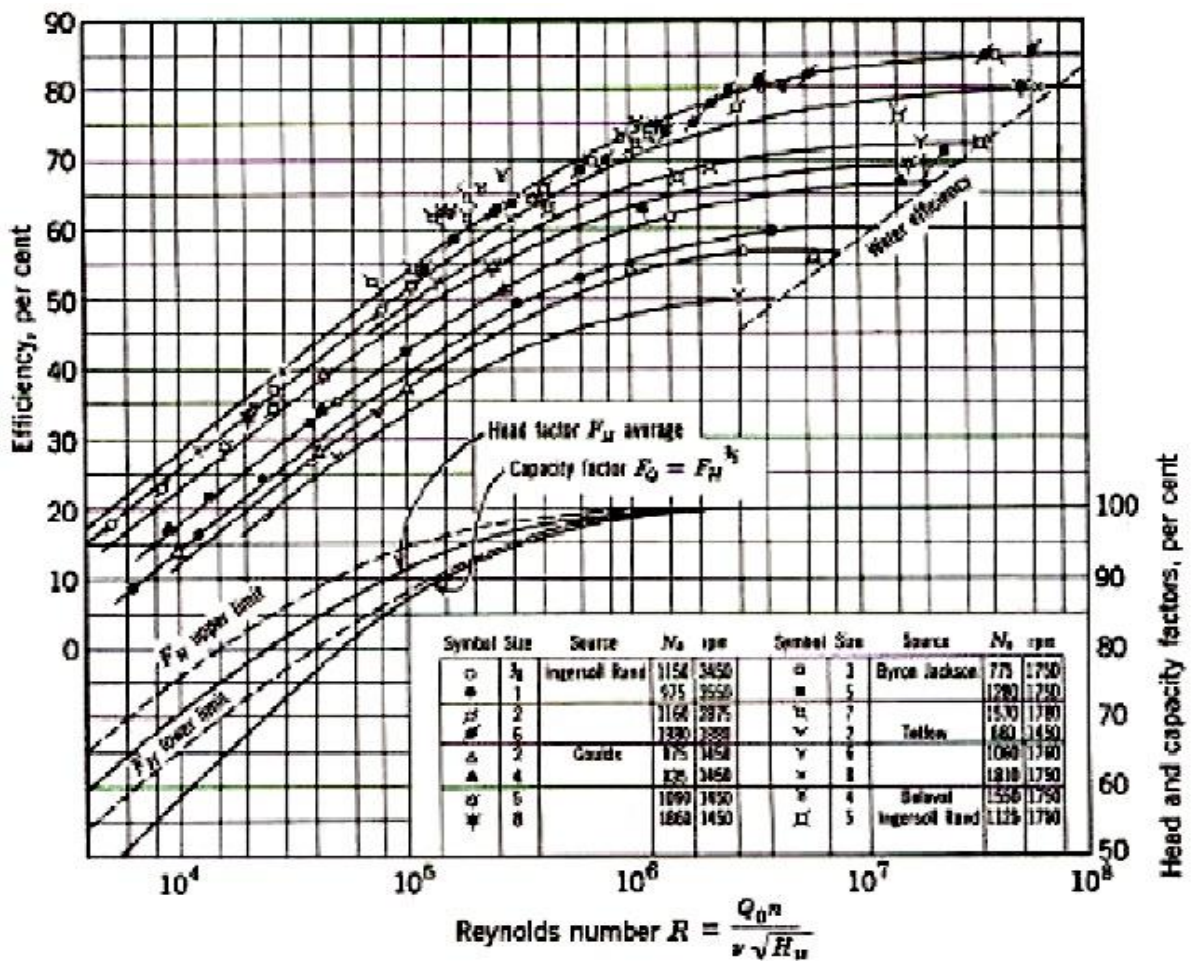


Figura 5 - Ábaco de Stepanoff

Amaral (2007) referindo-se ao método de Stepanoff, assim se posiciona:

O método tem desvantagem por ser iterativo; porém, a maior limitação é que os fatores de correção são válidos apenas para as condições operacionais similares (isto é, que atendem as condições ou relações de similaridade geométrica, cinemática e dinâmica do escoamento) às da operação com água no ponto de melhor eficiência.

O método desenvolvido pelo HI-USA (1955) é o mais utilizado, por usar parâmetros adimensionais que permitem maiores aproximações dos resultados reais, conseguindo assim, convergir determinadas curvas de bombas operando com água, para a mesma operando com fluido de viscosidades elevada (BATISTA, 2009). Com o intuito de corrigir a curva da bomba operando com fluido viscoso, o HI-USA criou o procedimento expresso no gráfico abaixo:

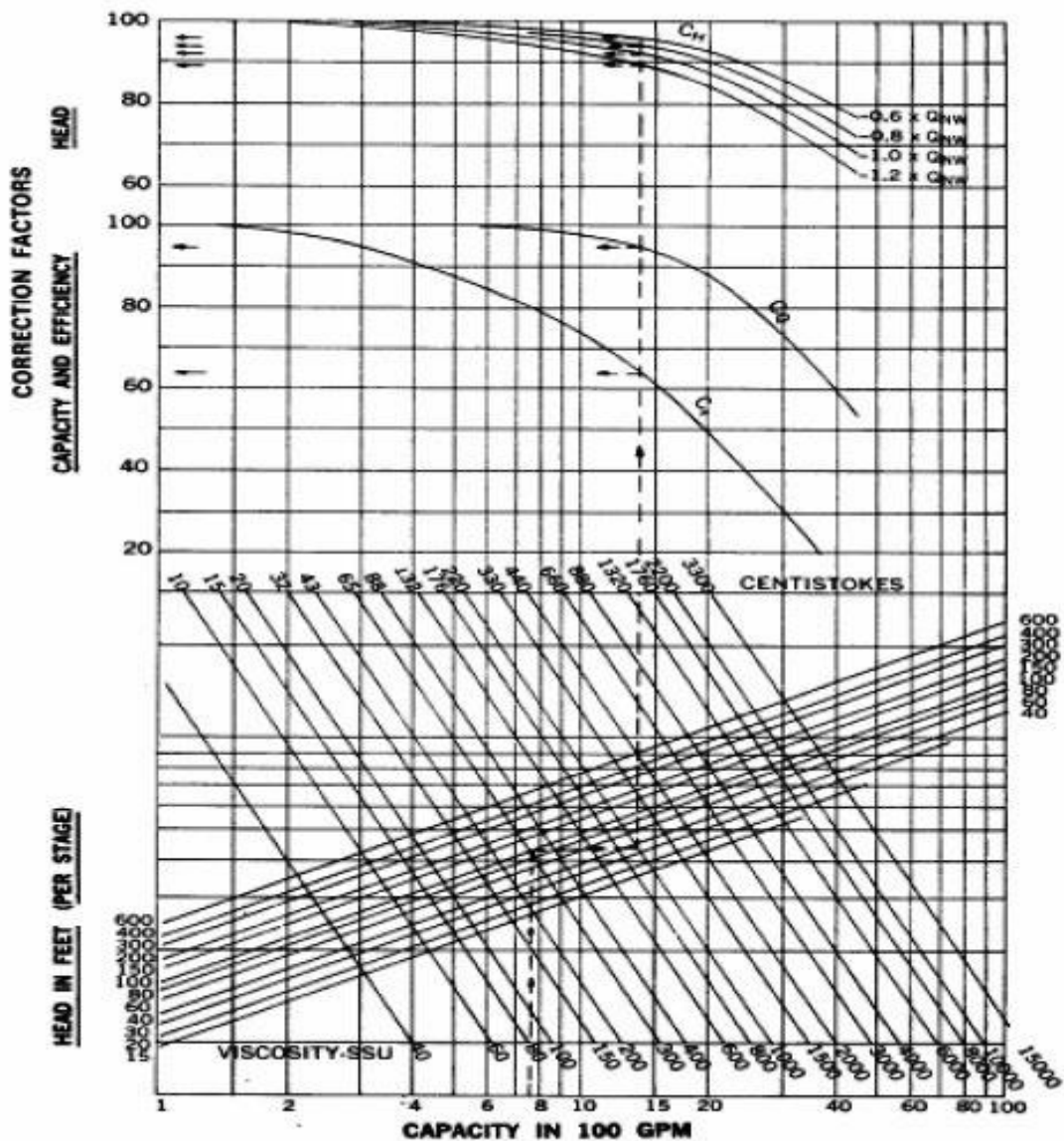


Figura 6 - Definições gráficas do *Hydraulic Institute-USA* para bombas centrífugas de 2" a 8".

Para o desenvolvimento de um sistema computacional que faça esta correção, foi criado um modelo numérico baseado em fórmulas e fatores de correção (expressões matemáticas) (Turzo et. Al.). Este modelo numérico utiliza o BEP , pois a partir da vazão (Q_{BEP}) e do $head$ (H_{BEP}), ambos no melhor ponto de eficiência, torna-se possível utilizá-los para encontrar os fatores de correção C_η (fator de correção da Eficiência), C_Q (fator de correção da vazão) e C_H (fator de correção do $head$) (BATISTA, 2009).

Para utilizar os fatores de correção, necessita-se calcular as variáveis auxiliares “y” e “z”:

$$y = -7,5946 + 6,6504 \cdot \ln(H_{BEP}) + 12,8429 \cdot \ln(Q_{BEP}) \quad (2.6)$$

$$z = \exp\left(\frac{39,5276 + 26,5605 \cdot \ln(v) - y}{51,6565}\right) \quad (2.7)$$

Através das variáveis auxiliares obtidas, calcula-se C_Q e C_η , objetivando encontrar a vazão e eficiência da bomba centrífuga em serviço viscoso:

$$C_Q = 1 - 4,0327 \cdot 10^{-3} \cdot z - 1,724 \cdot 10^{-4} \cdot (z)^2 \quad (2.8)$$

$$C_\eta = 1 - 3,3075 \cdot 10^{-2} \cdot z + 2,8875 \cdot 10^{-4} \cdot (z)^2 \quad (2.9)$$

Visando encontrar os fatores de correção do *head*, determinam-se quatro pontos na curva de desempenho da água, que estejam próximos do Melhor Ponto de Eficiência: 60% (C_{H1}), 80% (C_{H2}), 100% (C_{H3}), e 120% (C_{H4}). Indicando os fatores de correção, através das seguintes fórmulas, é possível gerar um gráfico da bomba corrigindo o desempenho para o uso com o fluido de trabalho (viscoso):

Quando a vazão corresponder a 60% do BEP ($0,6 \cdot Q_{BEP}$):

$$C_{H1}(0,6) = 1 - 3,68 \cdot 10^{-3} \cdot z - 4,36 \cdot 10^{-5} \cdot (z)^2 \quad (2.10)$$

Quando a vazão corresponder a 80% do BEP ($0,8 \cdot Q_{BEP}$):

$$C_{H2}(0,8) = 1 - 4,4723 \cdot 10^{-3} \cdot z - 4,18 \cdot 10^{-5} \cdot (z)^2 \quad (2.11)$$

Quando a vazão corresponde a 100% do BEP (Q_{BEP}):

$$C_{H3}(1,0) = 1 - 7,00763 \cdot 10^{-3} \cdot z - 1,41 \cdot 10^{-5} \cdot z^2 \quad (2.12)$$

Quando a vazão corresponder a 120% do BEP ($1,2*Q_{BEP}$):

$$C_{H4}(1,2)=1-9,01*10^{-3}*z-1,31*10^{-5}*z^2 \quad (2.13)$$

No dimensionamento de uma bomba centrífuga, como a potência da mesma varia de acordo com a vazão (Q) em bpd (barril por dia), a altura de elevação ou *head* (H), em ft (pé), a gravidade específica do fluido (Y) e a eficiência (η). Para calcular a Potência da Bomba (BHP-Break Horse Power) usa-se a fórmula (FOX, 2010):

$$BHP=7,368*10^{-6}*\left(\frac{Q*H*Y}{\eta}\right) \quad (2.14)$$

1.5 Leis de Afinidade

Segundo MAITELLI (2010), as mudanças rotacionais provocam modificações nas curvas características da bomba, podendo ser derivadas por análise adimensional, que já foram comprovadas experimentalmente, as chamadas Leis de Afinidade. Estas são definidas por expressões matemáticas que designam vazão, altura de elevação e potência no eixo (BHP), ao ocorrer mudanças na velocidade de rotação da bomba centrífuga.

Considerando que há variação na vazão, a mesma é diretamente proporcional a variação da velocidade de variação da bomba centrífuga, representada pela equação abaixo:

$$Q_2=Q_1\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad (2.15)$$

Já a altura de elevação da bomba, varia diretamente proporcional ao quadrado da variação de velocidade da bomba, conforme a equação:

$$H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (2.16)$$

A Potência no eixo (BHP) varia proporcionalmente ao cubo da variação de velocidade da bomba, como se pode observar na equação abaixo:

$$\text{BHP}_2 = \text{BHP}_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \quad (2.17)$$

2 ESTUDO COMPARATIVO

O método de abordagem utilizado neste trabalho é o dedutivo, pois possibilitou alcançar generalizações empíricas de observações. No trabalho, foi feito um estudo comparativo, baseado em revisões bibliográficas, a fim de buscar um conhecimento abrangente sobre o Bombeio Centrífugo Submerso. Efetuou-se também, um estudo do método criado pela entidade *Hydraulic Institute - USA*, com o objetivo de corrigir as curvas de bombas para operar com fluidos viscosos.

O sistema real para calcular as vazões, altura de elevação, eficiência e potência de uma BCS é muito complexo, o que impossibilita a busca por soluções analíticas diretas. Deste modo, as empresas fabricantes de bombas centrífugas como a Reda Schlumberger, responsável pela fabricação da BCS GN-7000, realizam testes a fim de disponibilizar uma Curva de Desempenho padrão para cada equipamento.

Na Curva de Desempenho da Figura 6, é possível visualizar como o *head*, a potência e a eficiência, da bomba variam em função da vazão, contudo, são levantadas para água que possui viscosidade, usualmente, inferior ao petróleo.

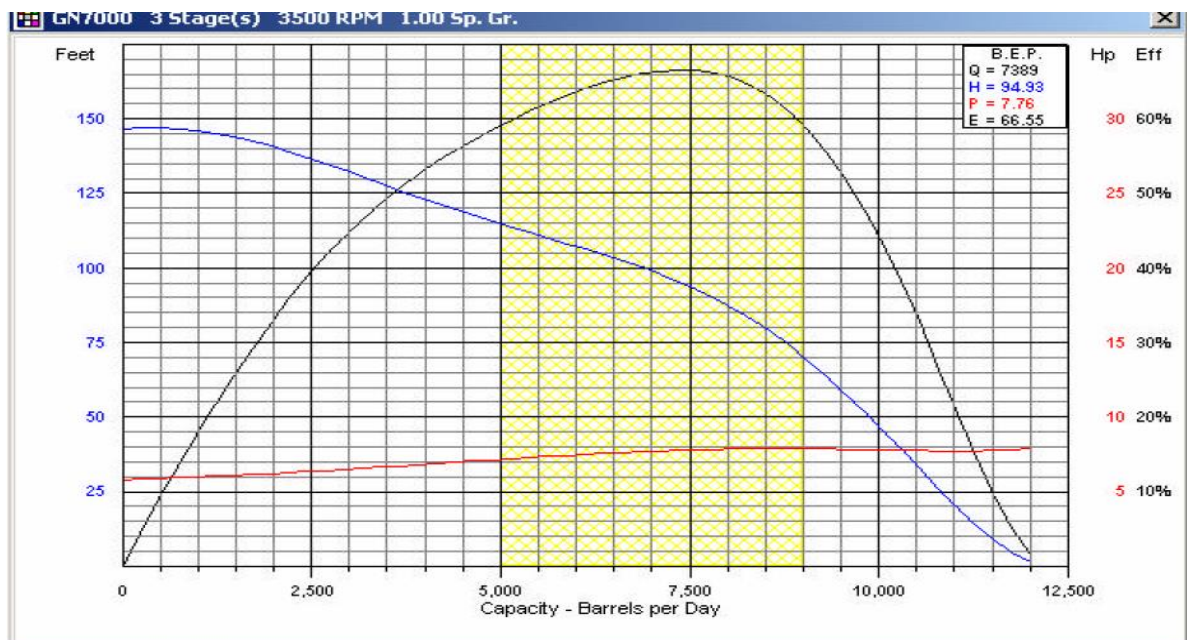


Figura 7 - Curva do fabricante do desempenho da Bomba BCS REDA GN-7000. Fonte: Amaral (2007)

Para a realização de um estudo sobre a correção destas curvas de desempenho, foram utilizados resultados experimentais de um trabalho que tematiza

a Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos (que utiliza a glicerina em diversas condições de viscosidade, com o intuito de simular o petróleo), O referido estudo foi realizado por Amaral (2007), na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

A partir desse, fizeram-se estudos comparativos da aplicação do método do *Hydraulic Institute - USA* (utilizado em diversos programas computacionais, para corrigir as curvas das bombas que operam com fluidos viscosos) com os resultados do experimento, para averiguar a aplicabilidade da utilização desse método para a correção de curvas de desempenho operando com fluidos viscosos.

2.1 O efeito da viscosidade sobre os resultados experimentais

A partir de um estudo dos resultados experimentais, mostrado nas tabelas do Anexo I, torna-se possível observar a influência da viscosidade nas curvas de desempenho das bombas, conforme será estimado nos gráficos a seguir.

Fazendo um comparativo de curvas de desempenho da BCS GN 7000, obtidas a partir de dados experimentais de um estudo relacionado à Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos (AMARAL, 2007), conforme a figura 8 que aborda um gráfico de Vazão (Q) x *Head* (H), este possibilita observar-se que com o aumento da viscosidade e a bomba operando com mesma vazão, a altura de elevação de fluido (*head*) diminui relativamente. Além disso, a capacidade de vazão da bomba diminui à proporção que o fluido de trabalho é mais viscoso, a uma mesma potência.

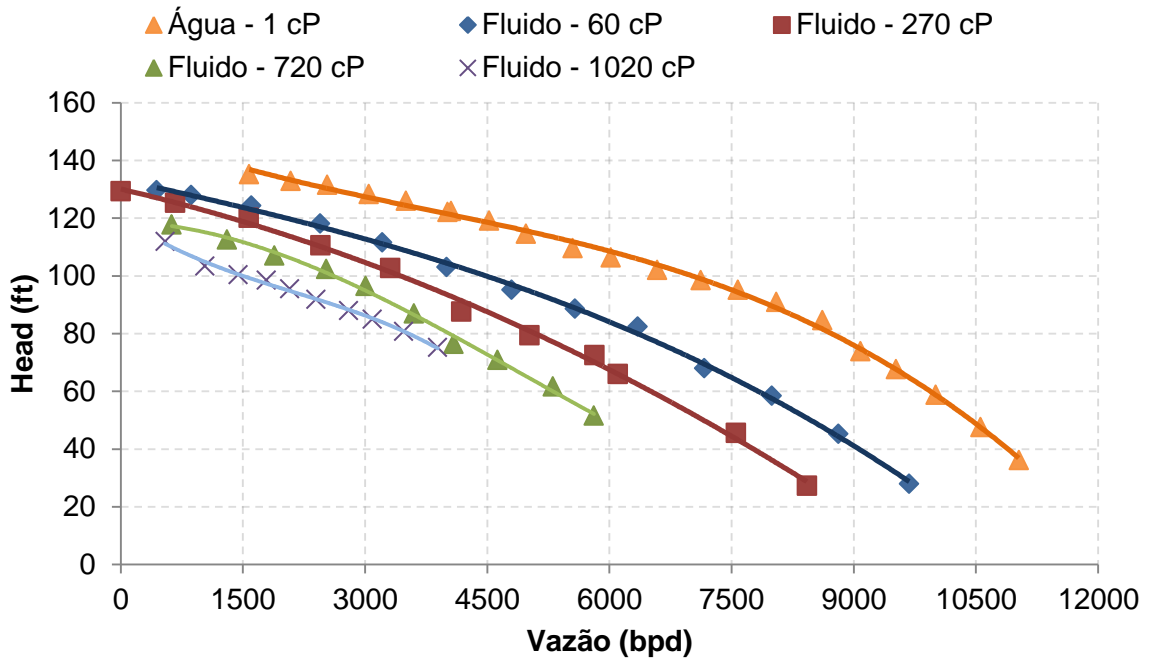


Figura 8 - Curvas de desempenho de dados experimentais da BCS GN-7000 a 3500 rpm.
Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

À medida que a viscosidade do fluido aumenta, diminui-se a vazão máxima e a eficiência da bomba, como é mostrado na Figura 9. Conseqüentemente, o *range* de operação da BCS GN 7000 vai diminuir, à medida que o fluido tenha maior viscosidade, caracterizando o que se chama de degradação da curva de comportamento da bomba.

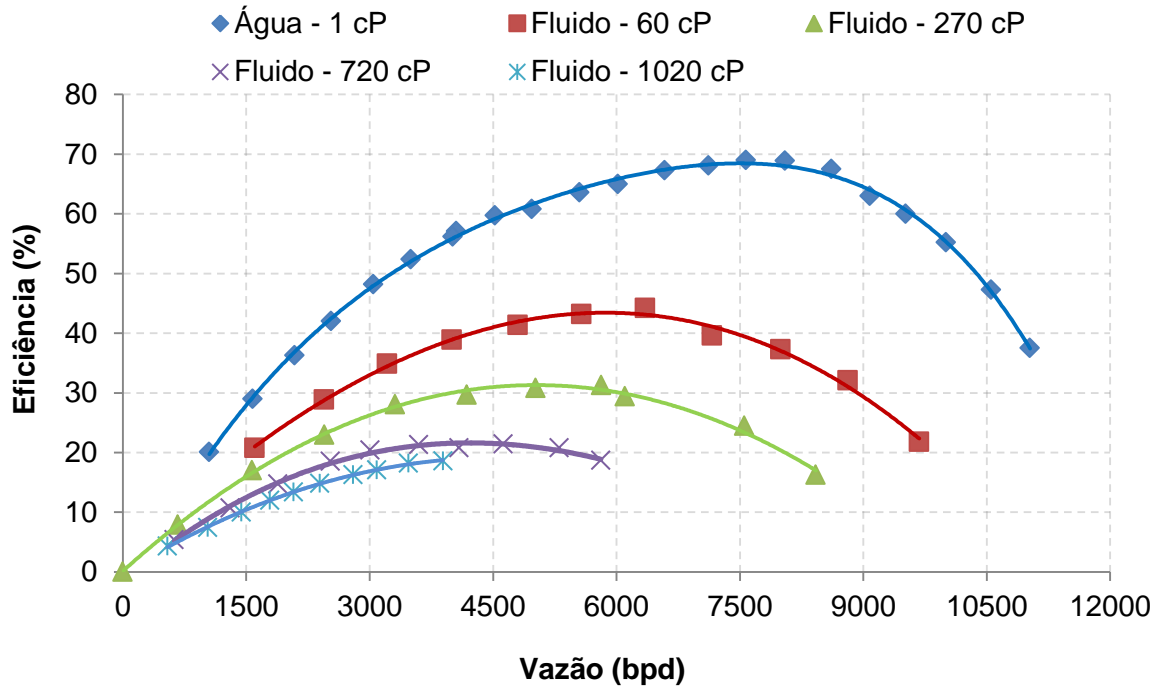


Figura 9 – Curvas de eficiência de dados experimentais da BCS GN-7000 a 3500 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

2.2 Estudo da viscosidade utilizando método do HI-USA direto

As Figuras 10 a 13 objetivam fazer uma analogia através de gráficos, da curva obtida a partir dos cálculos feitos pelo método do *Hydraulic Institute-USA* (representado por linhas cheias) presentes no Apêndice A; os resultados experimentais de Amaral (2007) da BCS GN 7000 operando com água a 3500 rpm (sendo demonstrado por triângulos) e com glicerina a viscosidades diferentes em cada gráfico (evidenciando seus pontos por quadrados). Estes dados estão identificados no Anexo I, nas tabelas I-1 a I-5.

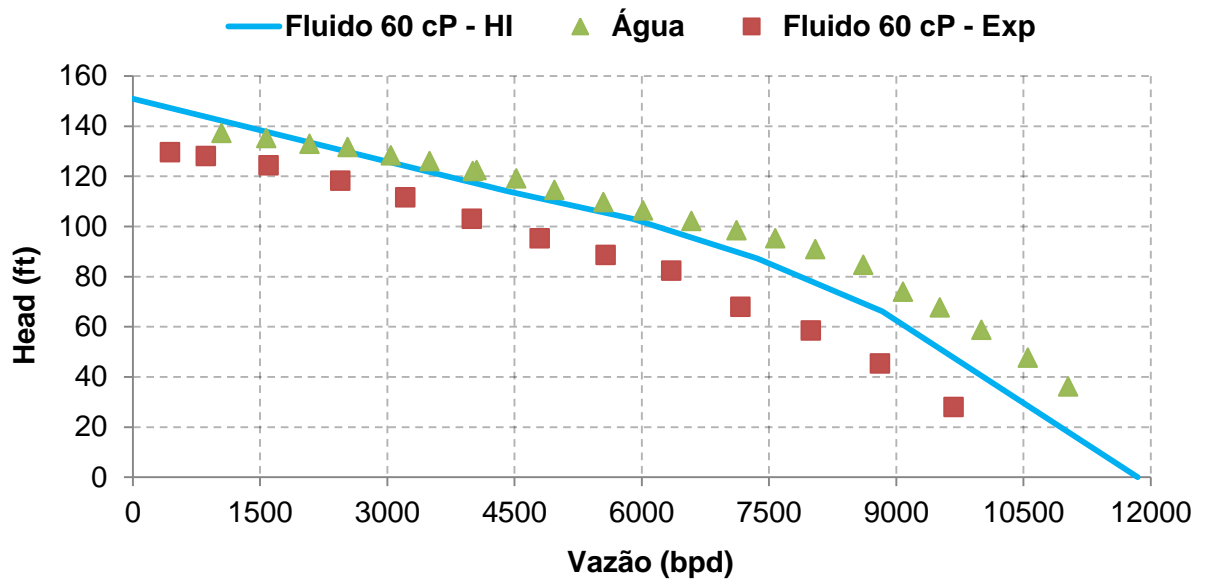


Figura 10 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 60 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).

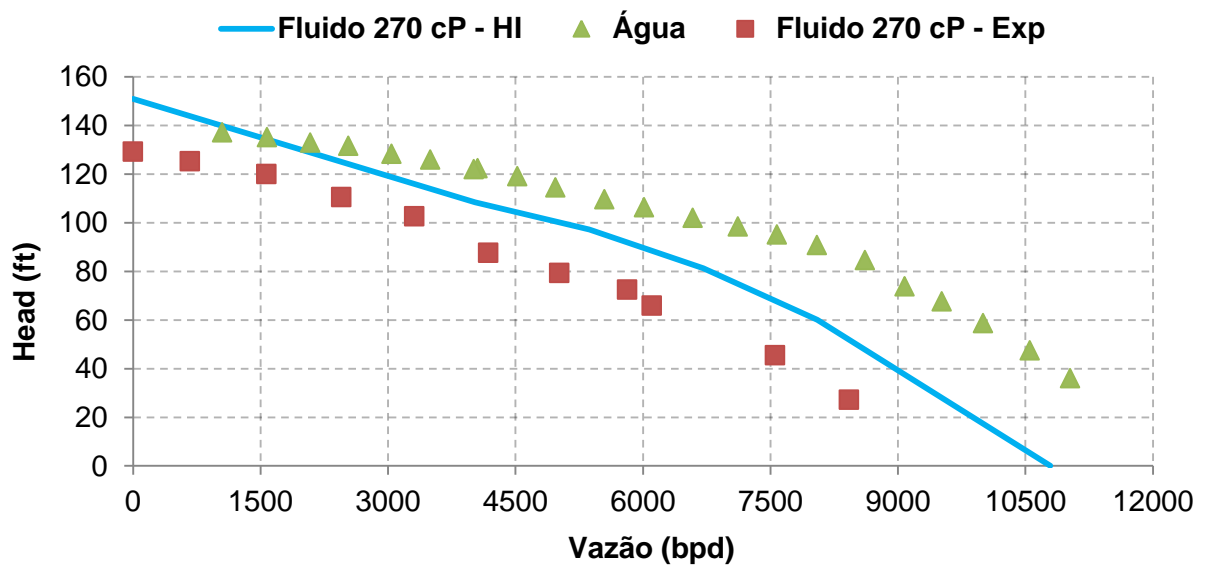


Figura 11 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 270 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).

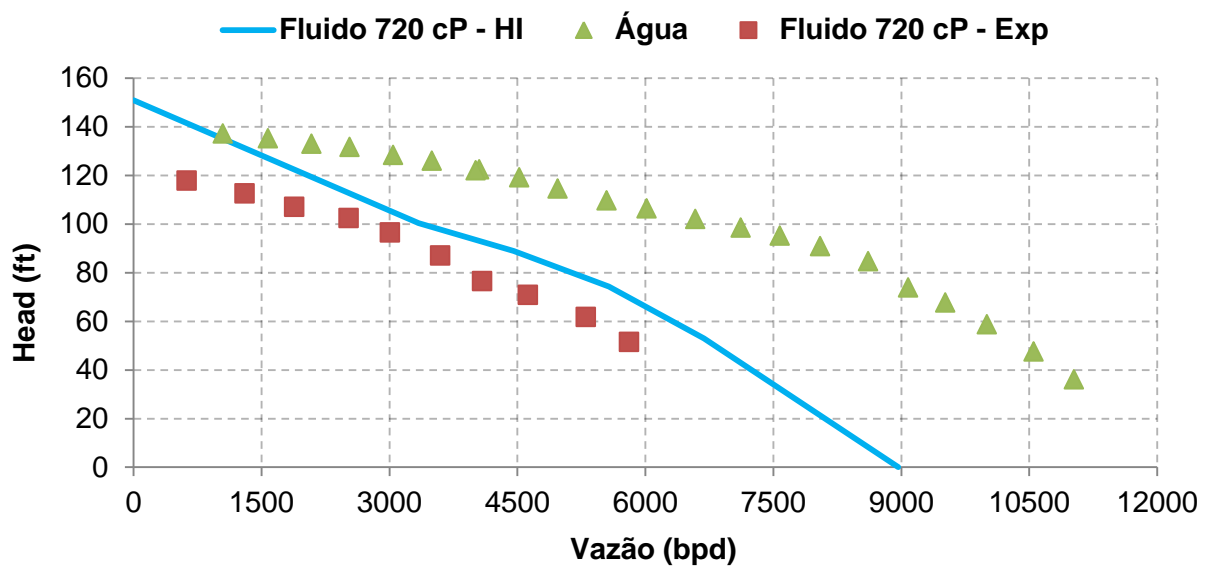


Figura 12 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 720 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).

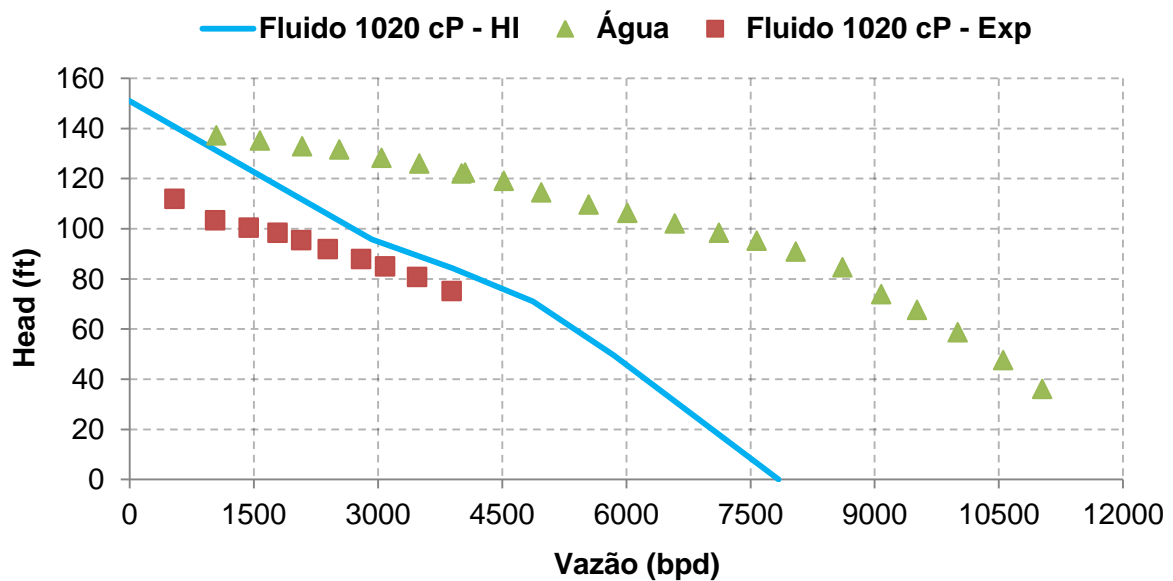


Figura 13 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 a 3500 rpm, utilizando glicerina a 1020 cP. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).

Analisando as Figuras acima, sequencialmente apresentadas, levando em consideração o aumento da viscosidade (Figura 10, 11, 12 e 13 representam respectivamente glicerina a 60 cP, 270 cP, 720 cP e 1020 cP), é possível identificar que há uma grande influência da viscosidade sobre o desempenho da bomba.

Comparando os pontos experimentais da água com o do fluido viscoso, a BCS eleva o primeiro a uma altura de elevação maior do que o segundo. À proporção que se aumenta a viscosidade do fluido de operação, a condição de elevação da BCS sofre uma visível redução a uma mesma vazão, e observa-se a degradação da curva de desempenho.

Nas Figuras 10 (glicerina a 60 cP) e 11 (glicerina a 270 cP), os erros relativos entre as curvas do método do HI-USA e os pontos dos resultados experimentais são bastante similares e possuem erros relativos médios próximos, respectivamente 22,4% e 24,5%, conforme tabela B-1 e B-2 do Apêndice B. Observa-se em ambas que a discrepância é mais elevada a altas vazões e que vai diminuindo à medida que há redução na vazão da bomba.

Já as Figuras 12 (glicerina a 720 cP) e 13 (glicerina a 1020 cP), demonstram menores percentuais de erros, e conseqüentemente menor disparidade. Contudo, na primeira, identifica-se que há uma maior discordância do método do HI-USA com os resultados experimentais em condições extremas de vazão (baixas e altas vazões), segundo Tabela B-3 do Apêndice B; na segunda figura, verifica-se que o resultado do método tem maior distância dos pontos experimentais a baixas vazões, pois em altas vazões os erros relativos são inferiores a 10%, de acordo com a Tabela B-4 do Apêndice B.

2.3 Estudo da alternância de rotação e das Leis de Afinidade

Neste tópico, apresentar-se-á o efeito causado nas curvas características da bomba centrífuga a partir da variação de sua rotação. Para isto, utilizam-se as expressões das Leis de Afinidade e considera-se somente a água como fluido de trabalho. A partir dos dados dos resultados experimentais, disponíveis no Anexo I é possível também verificar quanto à conformidade das leis utilizadas. O desenvolvimento para desencadear o uso das Leis de Afinidade está exposto no Apêndice C.

As curvas da BCS GN 7000 operando a uma velocidade rotacional de 3000 rpm, 2400 rpm e 1800 rpm, obtida com os dados experimentais, respectivamente das tabelas I-6, I-11 e I-16 do Anexo I (representadas por linhas cheias), é comparada nos gráficos das Figuras 14, 15 e 16 com a curva da bomba com mesma rotação,

contudo construída a partir dos pontos adquiridos com o uso das Leis de Afinidade da tabela C-1 do Apêndice C (demonstrada graficamente a partir de quadrados).

Observa-se na Figura 14 que a utilização das Leis para quantificar os dados da mudança de rotação para 3000 rpm não estão integralmente coesos, mas aproxima-se das soluções do experimento, pois as curvas se equivalem em diversas vazões. Já na Figura 15, é possível analisar que o uso das Leis da Afinidade para variar a velocidade rotacional para 1800 rpm, está bastante compatível com pontos do resultado experimental. Contudo, ao abordar a figura 16, relacionada com a curva dos resultados experimentais da bomba a 2400 rpm existe uma elevada discrepância. Fazendo um comparativo com os dados da tabela C-2 do Apêndice C e a tabela I-11 do Anexo I, fica perceptível a diferença entre as curvas.

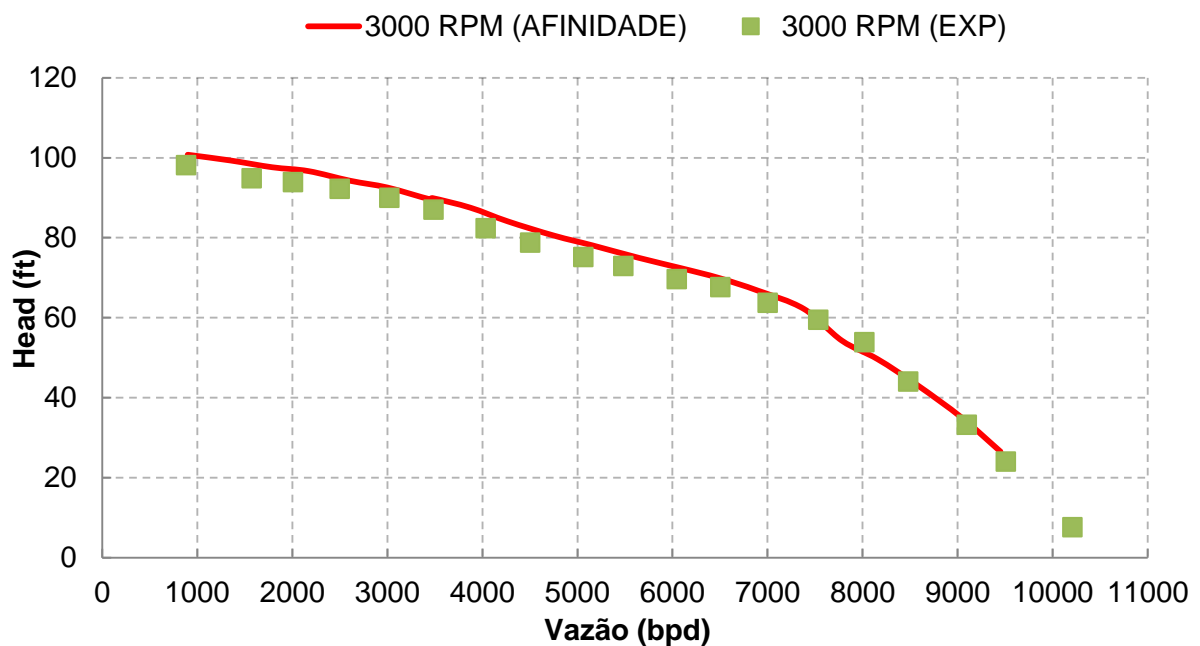


Figura 14 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação de 3500 rpm para 3000 rpm. Fonte: Adaptado de AMARAL (2007).

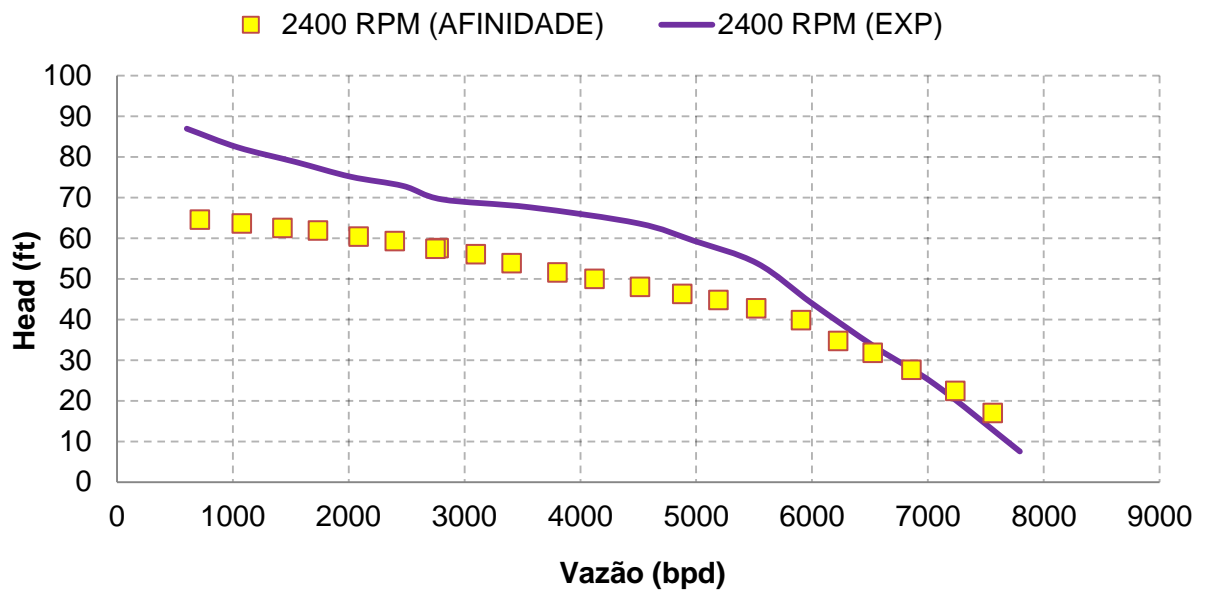


Figura 15 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação de 3500 rpm para 2400 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

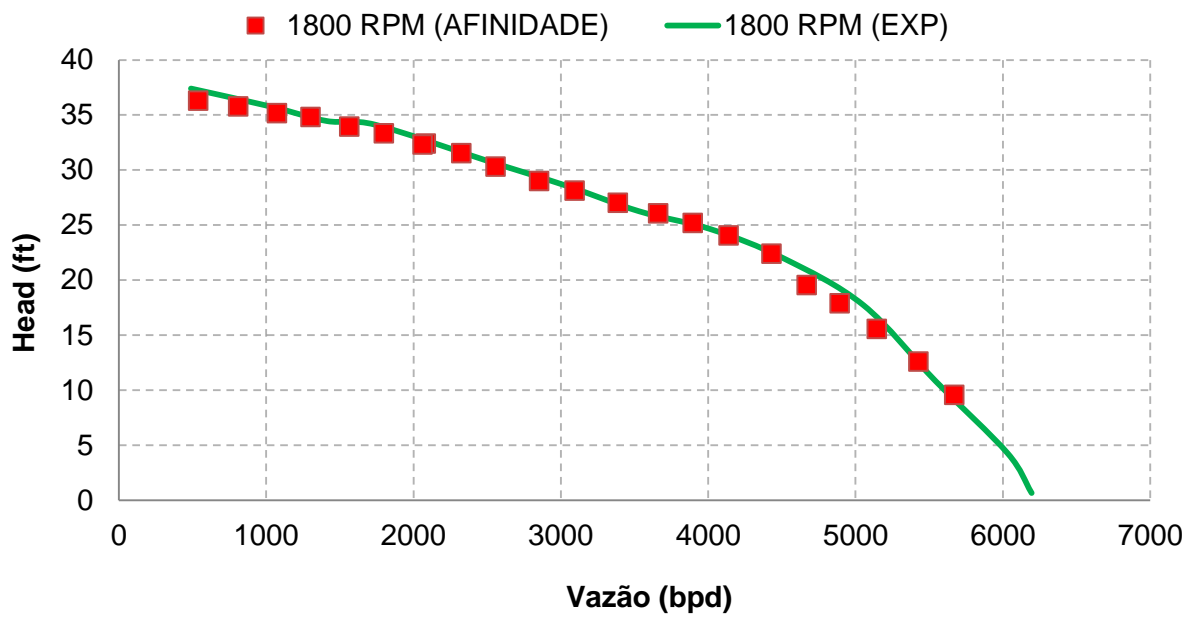


Figura 16 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação de 3500 rpm para 1800 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

O uso do conjunto de gráficos e tabelas do Apêndice C e do Anexo I permite constatar que as Leis de Afinidade foram eficazes nas mudanças rotacionais de

3500 rpm para 3000 rpm e de 3500 rpm para 1800 rpm, mas de 3500 rpm para 2400 rpm gerou uma discrepância elevada.

2.4 Análise das curvas de desempenho, a partir da variação de velocidade de rotação e viscosidade

A fim de analisar a aplicabilidade do uso do método do HI-USA na BCS GN 7000, utilizaram-se resultados experimentais da bomba operando com água a 3500 rpm (expostos no Anexo I), para encontrar as vazões e alturas de elevação da bomba operando com água a 3000 rpm a partir das Leis de Afinidade (mostrado no Apêndice C), e então variar a viscosidade (mudança da viscosidade da água, equivalente a 1 cP, para a da glicerina a 270 cP ou 1020 cP), conforme calculado no Apêndice B através do método do *Hydraulic Institute – USA*.

A altura de elevação é inversamente proporcional à viscosidade do fluido de operação a uma mesma vazão, visto que a capacidade de elevação de fluido da BCS GN 7000 tende a reduzir à proporção que o fluido de operação torna-se mais viscoso. Isto é notado nas Figuras 17, 18, 19 e 20, através do comportamento da bomba, variando a viscosidade de água (exibido por quadrados) para glicerina a 270 cP, seja a curva advinda de resultados experimentais (indicado por “X”) ou do método da HI-USA (exibido por linha cheia).

Na Figura 17, observa-se que a curva de desempenho do método do *Hydraulic Institute-USA*, utilizada após as aplicações das Leis de Afinidade (rotação passa de 3500 rpm para 3000 rpm), possui uma discrepância elevada quando comparada aos pontos dos resultados experimentais da bomba operando também com glicerina a 270 cP. Na Figura 18 (considerando-se que a bomba continua operando com a mesma velocidade rotacional), fica visivelmente claro que à medida que a viscosidade da glicerina aumenta para 720 cP há uma suave diminuição da diferença entre o resultado do método e os dados experimentais.

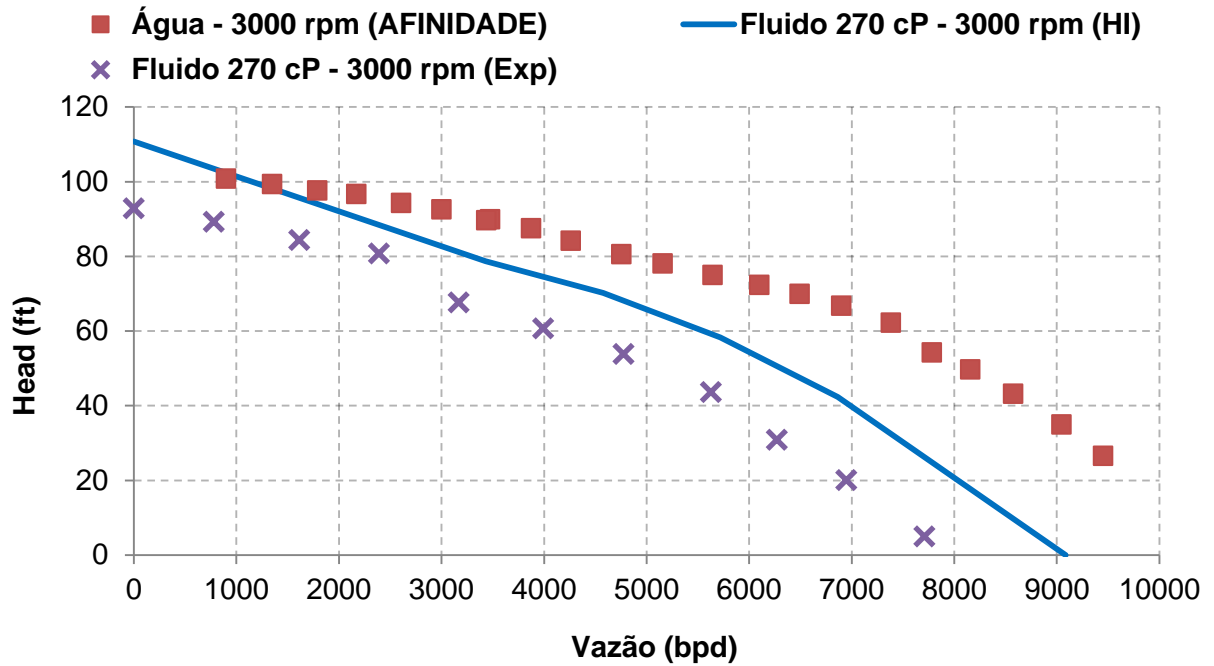


Figura 17 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 3000 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute* –USA, de 1cP para 270 cP. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

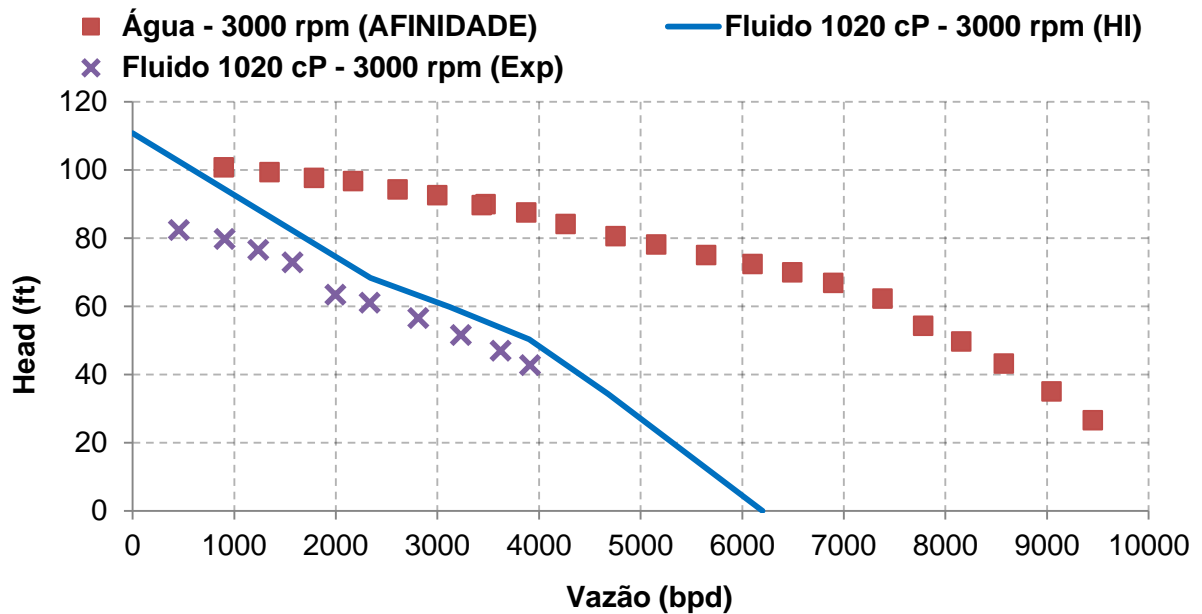


Figura 18 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 3000 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute* –USA de 1cP para 1020 cP. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

Nas Figuras 19 e 20, a bomba está operando com velocidade rotacional de 1800 rpm, respectivamente com glicerina a 720 cP e 1020 cP. Relacionando-as com as Figuras anteriores (com velocidade rotacional de 3000 rpm) nota-se que a curva do método HI-USA está mais próximo dos resultados experimentais, havendo uma menor disparidade entre elas. Contudo ainda não se assemelha à curva do experimento.

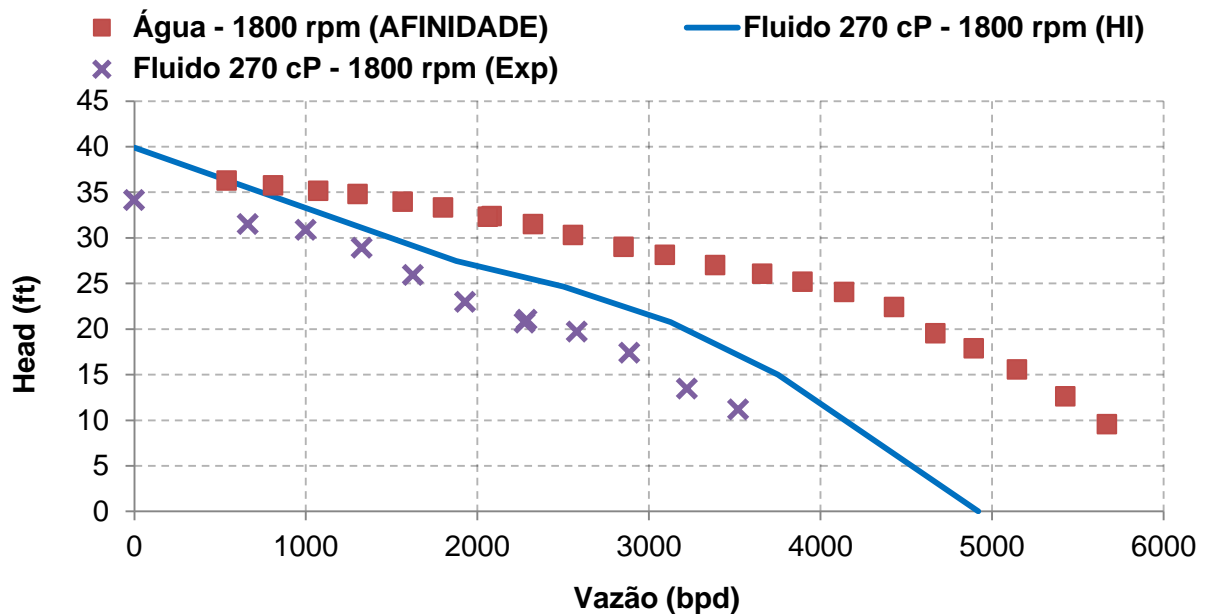


Figura 19 - Curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 1800 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute –USA* de 1cP para 270 cP . Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

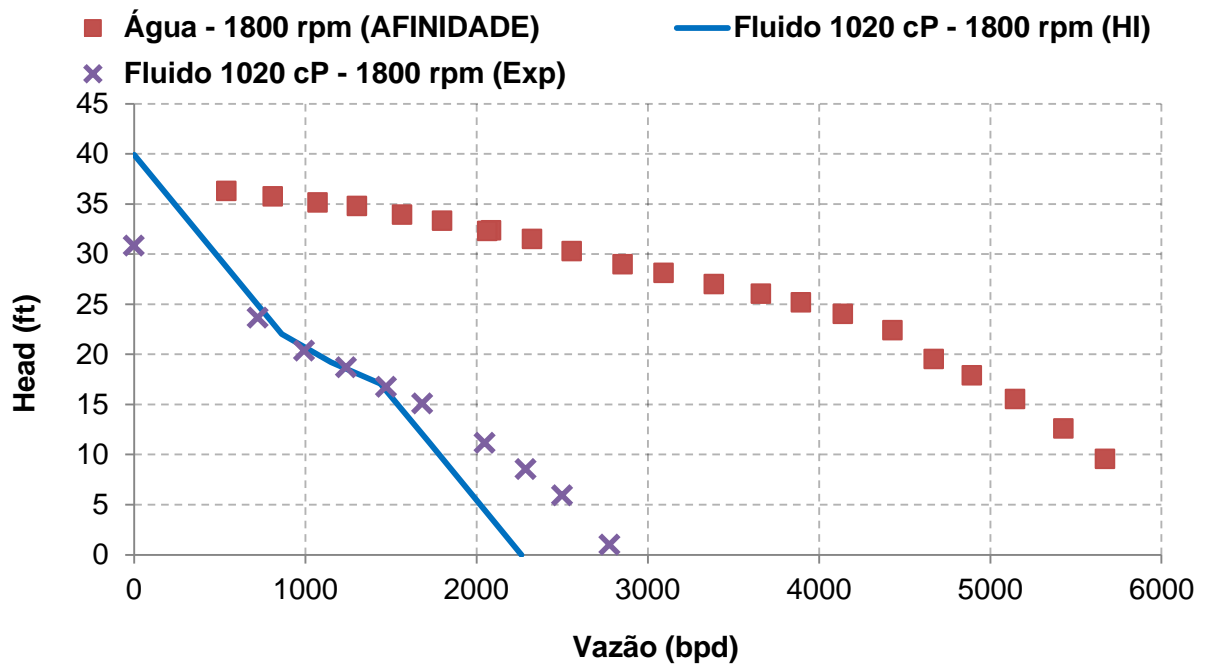


Figura 20 - Comparativo de curvas de desempenho da BCS GN-7000 variando a rotação pelas Leis de afinidade para 1800 rpm e viscosidade, pelo método da *Hydraulic Institute – USA* de 1cP para 1020 cP. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

Ao correlacionar os gráficos de diferentes velocidades rotacionais é possível observar em relação à BCS GN 7000, que:

- A diminuição da velocidade de rotação reduz consideravelmente a sua capacidade de elevar fluidos, chegando em determinados momentos a uma queda superior a 100%; observa-se a bomba operando com glicerina a 270 cP quando a rotação é 1800 e 3000 rpm (Figura 17 e 19). Neste caso, o *head* chega respectivamente 90 ft e 32 ft, que constata cerca de 280% de diferença;
- À baixa rotação, a degradação do desempenho da bomba é muito maior com o aumento da viscosidade. Pode-se verificar na figura 19 (glicerina a 270 cP) e 20 (glicerina a 1020 cP);
- Na figura 20 é perceptível que a curva de desempenho do método HI-USA decai a maiores vazões, mais do que nos pontos dos resultados experimentais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), método de Elevação Artificial, é largamente empregado nas produções de petróleo, tendo em vista que ele tem demonstrado bastante eficiência quando usado em poços anteriormente surgentes que perderam ou tiveram sua capacidade de elevação natural diminuída.

Com o estudo feito foi possível identificar as mudanças que a viscosidade provoca nas curvas de desempenho de uma Bomba Centrífuga Submersa. O seu efeito degrada a *performance* da BCS, diminuindo as condições de elevação do fluido e a vazão, a medida que aumenta-se a viscosidade do fluido de trabalho.

O método *Hydraulic Institute – USA* utilizado neste trabalho para correção das curvas de desempenho da BCS GN 7000 está explicitado no Apêndice A. Já no Apêndice B apresenta os erros relativos absolutos e médios do método *Hydraulic Institute-USA* com os experimentais..

Nele, observa-se que a BCS GN 7000 apresenta menores erros relativos quando operando com fluidos de maiores viscosidades, pois têm erro relativo médio com glicerina a 60 cP, 270 cP, 720 cP e 1020 cP respectivamente 22,4%, 24,5%, 14,4 % e 10,4%. Entretanto, a determinadas viscosidades do fluido de operação, o método do HI-USA apresenta erros relativos absolutos inferiores a 10%. Isto pode ser observado nas tabelas B-1 a B-4 do Apêndice B e nas Figuras 10, 11, 12 e 13.

A mudança de velocidade rotacional a partir das Leis de Afinidade, de acordo com estudos feitos no trabalho, pode ser utilizada com a bomba operando com água com velocidade rotacional de 3500 rpm passando posteriormente para 3000 rpm e 1800 rpm, conforme explicitado nas Figuras 14 e 16. Verificou-se na figura 15, elevada discrepância quanto aos dados do experimento da água a 2400 rpm, com a curva modificada (pelas Leis de Afinidade) para a mesma rotação, contudo as possíveis causas advindas desta diferença não foram identificadas.

Com a variação da velocidade rotacional e o aumento da viscosidade, as curvas corrigidas pelo método sofrem discrepância (com relação aos dados do experimento, nas mesmas condições). Contudo, à proporção que se reduziu a rotação e aumentou-se a viscosidade, a disparidade diminuiu e a curva de desempenho da bomba no método do HI-USA passou a sofrer decaimento, conforme é constatado nas Figuras 17, 18, 19 e 20.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – Maio de 2013**. Rio de Janeiro, 2013.

AMARAL, Gilmar Dutra Leite do. **Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos**. 2007. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

BARBOSA, Tiago de Souza. **Desenvolvimento da interface gráfica para um simulador computacional do sistema de elevação por Bombeio Centrífugo Submerso**. Natal, 2008.

BATISTA, Evellyne da Silva. **Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Aplicação no Método de Elevação por Bombeio Centrífugo Submerso**. 2009. 65. Trabalho de Conclusão de Curso - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2ª Edição. São Paulo: Pearson, 2010.

FOX, R.W.; Mc Donald, A.T. e Pritchard, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

IGNÁCIO, Raimundo. **Décima segunda aula de ME 5330 – Mecânica dos Fluidos para Engenharia Química**. 2010.

LEONEZ , Ronnifran Cabral. De Lima. **Métodos de elevação utilizados na Engenharia de Petróleo – Uma Revisão de Literatura**. Agincos, 2011. P. 75.

MAITELLI, Carla Wilza Souza de Paula. **Simulação do Escoamento Monofásico em um Estágio de uma Bomba Centrífuga Utilizando Técnicas de Fluidodinâmica Computacional**. 2010. P. 155. Tese de Doutorado do Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010.

MONTE VERDE, William. **Estudo Experimental de Bomba de BCS Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido**. 2011. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

NASCIMENTO, João Maria Araújo do. **Simulação Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico**. 2005. Dissertação de Mestrado do Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2005.

NEDDEN, Ana Gabriela Pillazur. **Análise do processo de quebra de gotas de uma emulsão óleo-água no escoamento entre discos paralelos**. 2010. P.80. Programa de Pós Graduação, Universidade Pontifca do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

PHYWE series of publications. **Density of Liquids**. Laboratory Experiments. PHYWE SYSTEME GMBH. Gottingen, Germany.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

APÊNDICE A

Cálculo de Correção das curvas de desempenho pelo *Hydraulic*

Institute - USA

O escoamento de fluidos viscosos causa alterações na curva de desempenho da BCS GN 7000. Com isso, introduz-se cálculo de correções, com fatores que tem por finalidade corrigir estas curvas. Neste trabalho foi utilizado o método da *Hydraulic Institute – USA* e foram feitos estudos a 3500, 3000, 2400 e 1800 rpm.

1 – Cálculo de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm

Os cálculos do método HI – USA são baseados no *Best Efficiency Point (BEP)* da bomba operando com água. Com o objetivo de alcançar estes pontos, criou-se o gráfico da figura A-1, baseado nos resultados experimentais de Amaral (2007) encontrados na tabela I-1 do Anexo I. Neste obteve-se o polinômio da curva de eficiência (A-1), que igualando a sua derivada a zero, tem-se a vazão no melhor ponto de eficiência (Q_{BEP}). Utilizando o polinômio da curva de *Head* (A-2) e substituindo a Q_{BEP} , calcula-se o *head* no melhor ponto de eficiência (H_{BEP}). A tabela 1 resume o BEP da BCS GN 7000 a 3500 rpm.

$$\eta = -2,542 \cdot 10^{-14} \cdot Q^4 + 5,556 \cdot 10^{-10} \cdot Q^3 - 5,371 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2 + 2,973 \cdot 10^{-2} \cdot Q - 6,271 \quad (A-1)$$

$$H = -9,721 \cdot 10^{-11} \cdot Q^3 + 9,386 \cdot 10^{-7} \cdot Q^2 - 8,479 \cdot 10^{-3} \cdot Q + 1,469 \cdot 10^2 \quad (A-2)$$

Quadro A-1 - Best Efficiency Point da BCS GN 7000 a 3500 rpm

Q_{BEP} (bpd)	7722,93
$Q_{BEP} \times 100$ gpm	2,25
H_{BEP} (ft)	92,66

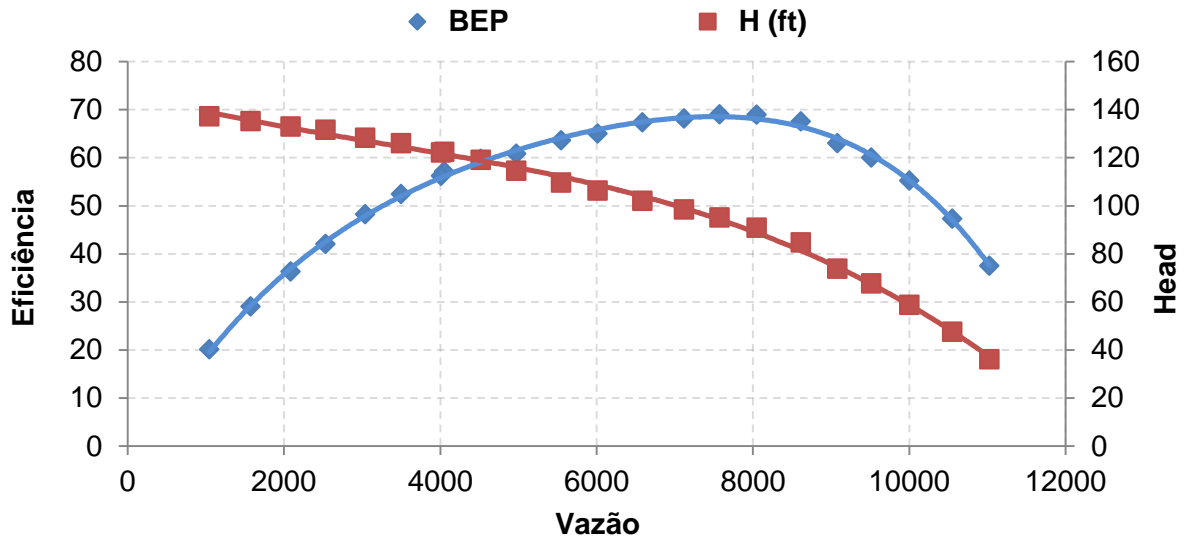


Figura A-1 - Gráfico de Desempenho da BCS GN 7000, operando com água a 3500 rpm. Fonte: Adaptado de Amaral (2007)

1.1 Cálculo de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 60 cP

Desta etapa em diante, é necessário ter a viscosidade cinemática do fluido (ν). O fluido viscoso utilizado nos experimentos de Amaral (2007) é a glicerina, tendo a variação de temperatura da mesma para definir a sua viscosidade. A partir da figura A-2, criou-se uma equação (A-3) da densidade (d) em função da temperatura (T) e, a partir da densidade, encontrar a viscosidade cinemática (A-4):

$$d = -\frac{0,6 * T - 1238}{1000} \quad (\text{A-3})$$

$$\nu = \frac{\mu}{d * 1000} \quad (\text{A-4})$$

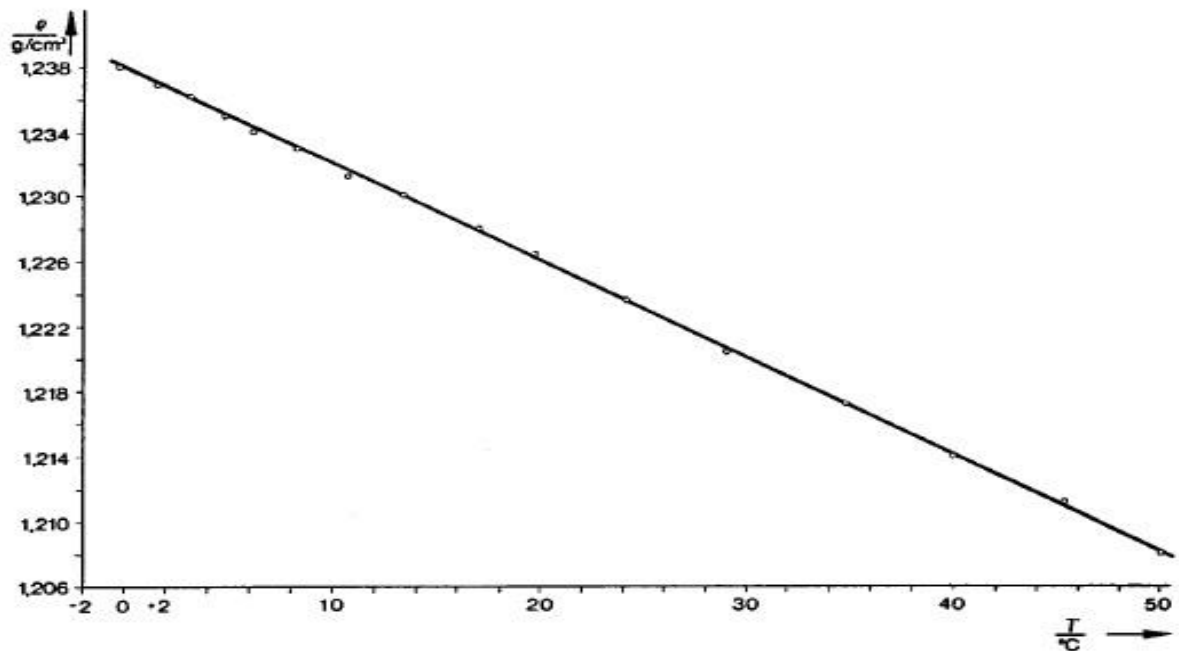


Figura A-2 - Gráfico da densidade da Glicerina em função da temperatura (Fonte: Phywe)

Na tabela seguinte (tabela A-2) pode-se verificar a Viscosidade Cinemática da Glicerina a 60 cP, encontrada a partir da temperatura do fluido.

Quadro A-2- Resultados da Viscosidade da Glicerina a 60 cP

Temperatura (°C)	60,4
Densidade (kg/m³)	1,202
Viscosidade Cinemática (cstk)	49,927
Viscosidade Dinâmica (cP)	60

Com o melhor ponto de eficiência da curva de desempenho da bomba encontrado e a viscosidade cinemática da glicerina a 60 cP, podem-se utilizar as equações das variáveis y e Z , que apresenta seus resultados na tabela A-3.

Quadro A-3 - Resultado das variáveis dos Fatores de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm

Y	32,953
Z	8,482

Utilizando-se das variáveis calculadas, é possível encontrar os Fatores de Correção, que têm o objetivo de corrigir as curvas de desempenho da bomba, quando a mesma opera com fluidos de viscosidade maior que a água, neste caso a Glicerina a 60 cP, conforme tabela A-4.

Quadro A-4 - Resultado dos Fatores de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 60 cP.

FATORES DE CORREÇÃO	
C_Q	0,953
C_η	0,740
C_{H1}	0,966
C_{H2}	0,959
C_{H3}	0,942
C_{H4}	0,925

Finalmente, a partir dos fatores de correção, encontram-se os pontos de vazão, *head* e eficiência obtidos com o método da *Hydraulic Institute – USA*, para criar a curva de desempenho da BCS GN 7000, corrigida para glicerina a 60 cP, demonstrados na tabela A-5.

Vale ressaltar que o método do *Hydraulic Institute-USA* foi desenvolvido para quatro pontos de vazão e *head*. Contudo, para obter uma melhor visualização nas curvas de estudo, pesquisadores utilizam mais dois pontos, são eles:

- O ponto de vazão máxima (Q_{VISC6} , H_{VISC6}); que foi encontrado igualando a equação desenvolvida a partir dos pontos obtidos com o método, a zero (considerando que não há *head*);
- O ponto de *head* máximo (Q_{VISC1} , H_{VISC1}); considerou-se que a altura de elevação quando a vazão é zero, se equivale à altura de elevação máxima quando a bomba opera com água.

Quadro A-5 - Dados resultantes do método da *Hydraulic Institute* - USA da BCS GN 7000 a 3500 rpm, com glicerina a 60 cP

VAZÃO (bpd)		HEAD (ft)		EFICIÊNCIA (%)	
Q_{VISC1}	0,0	H_{VISC1}	130,8	η_1	48,1
Q_{VISC2}	4417,8	H_{VISC2}	114,1	η_2	53,0
Q_{VISC3}	5890,4	H_{VISC3}	103,0	η_3	54,6
Q_{VISC4}	7363,0	H_{VISC4}	87,2	η_4	50,3
Q_{VISC5}	8835,5	H_{VISC5}	66,2		
Q_{VISC6}	11846,0	H_{VISC6}	0,0		

São feitos os mesmos procedimentos, utilizados anteriormente, operando com glicerina a 60 cP para cálculo de correção da BCS GN 7000, e agora com a mesma substância a 270 cP, 720 cP e 1020 cP, objetivando a correção da curva de desempenho de acordo com a viscosidade do fluido de operação. A seguir demonstram-se os resultados do método utilizado para as tais viscosidades, sequencialmente em forma de tabelas.

1.2 Cálculo de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 270 cP

Quadro A-6 - Resultado da viscosidade da glicerina a 270 cP e da variável z.

Temp. Média (°C)	39,5
Densidade (kg/m ³)	1,214
Viscosidade Cinemática (cstk)	222,350
Viscosidade Dinâmica (cP)	270
Z	18,284

Quadro A-7 - Resultado dos Fatores de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 270 cP.

FATORES DE CORREÇÃO	
C_Q	0,869
C_η	0,492
C_{H1}	0,918
C_{H2}	0,904
C_{H3}	0,877
C_{H4}	0,840

Quadro A-8 - Dados resultantes do método da *Hydraulic Institute - USA* da BCS GN 7000 a 3500 rpm, com glicerina a 270 cP

VAZÃO (bpd)		HEAD (ft)		EFICIÊNCIA (%)	
Q_{VISC1}	0,0	H_{VISC1}	130,8	η_1	32,0
Q_{VISC2}	4025,1	H_{VISC2}	108,5	η_2	35,2
Q_{VISC3}	5366,7	H_{VISC3}	97,2	η_3	36,3
Q_{VISC4}	6708,4	H_{VISC4}	81,2	η_4	33,4
Q_{VISC5}	8050,1	H_{VISC5}	60,1		
Q_{VISC6}	10792,9	H_{VISC6}	0,0		

1.3 Cálculo de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 720 cP

Quadro A-9 - Resultado da viscosidade da BCS GN 7000 trabalhando com a glicerina a 720 cP e da variável z.

Temp. Média (°C)	25,2
Densidade (kg/m³)	1,223
Viscosidade Cinemática (cstk)	588,774
Viscosidade Dinâmica (cP)	720
z	30,166

Quadro A-10 - Resultado dos Fatores de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 720 cP.

FATORES DE CORREÇÃO	
C_Q	0,721
C_η	0,265
C_{H1}	0,849
C_{H2}	0,827
C_{H3}	0,801
C_{H4}	0,740

Quadro A-11 - Dados resultantes do método da *Hydraulic Institute - USA* da BCS GN 7000 a 3500 rpm, com glicerina a 720 cP

VAZÃO (bpd)		HEAD (ft)		EFICIÊNCIA (%)	
Q_{VISC1}	0,0	H_{VISC1}	130,8	η_1	17,2
Q_{VISC2}	3343,1	H_{VISC2}	100,3	η_2	19,0
Q_{VISC3}	4457,5	H_{VISC3}	88,9	η_3	19,5
Q_{VISC4}	5571,9	H_{VISC4}	74,3	η_4	18,0
Q_{VISC5}	6686,3	H_{VISC5}	53,0		
Q_{VISC6}	8964,4	H_{VISC6}	0,0		

1.3 Cálculo de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 1020 cP

Quadro A-12 - Resultado da viscosidade da BCS GN 7000 trabalhando com a glicerina a 1020 cP e da variável z.

Temp. Média (°C)	20,4
Densidade (kg/m ³)	1,226
Viscosidade Cinemática (cstk)	832,137
Viscosidade Dinâmica (cP)	1020
Z	36,038

Quadro A-13 - Resultado dos Fatores de Correção da BCS GN 7000 a 3500 rpm operando com glicerina a 1020 cP.

FATORES DE CORREÇÃO	
C_Q	0,631
C_η	0,183
C_{H1}	0,811
C_{H2}	0,785
C_{H3}	0,766
C_{H4}	0,692

Quadro A-14 - Dados resultantes do método da Hydraulic Institute - USA da BCS GN 7000 a 3500 rpm, com glicerina a 1020 cP

VAZÃO (bpd)		HEAD (ft)		EFICIÊNCIA (%)	
Q_{VISC1}	0,0	H_{VISC1}	130,8	η_1	11,9
Q_{VISC2}	2922,8	H_{VISC2}	95,8	η_2	13,1
Q_{VISC3}	3897,1	H_{VISC3}	84,3	η_3	13,5
Q_{VISC4}	4871,3	H_{VISC4}	71,0	η_4	12,4
Q_{VISC5}	5845,6	H_{VISC5}	49,6		
Q_{VISC6}	7837,3	H_{VISC6}	0,0		

APÊNDICE B

Cálculo de Erro Relativo dos resultados do método da Hydraulic

Institute – USA com os experimentais

O uso do método da HI – USA para corrigir as curvas da BCS GN 7000 operando com glicerina a 60 cP, 270 cP, 720 cP e 1020 cP foi possível com os resultados experimentais da tabelas do Anexo I. Posteriormente ao uso, foi feito um estudo comparativo gerando erros relativos absolutos bastante significativos quanto à altura de elevação.

Para obter estes erros, foi necessário *a priori* gerar um polinômio para a curva de desempenho obtida pelo método de correção do *Hydraulic Institute – USA*. Os polinômios a seguir referem-se à BCS GN 7000 operando com glicerina a 60 cP (B-1), 270 cP (B-2), 720 cP (B-3) e 1020 cP (B-4), encontrados a partir do método. O resultado da aplicação, pode ser constatado nas tabelas B-1, B-2, B-3 e B-4, respectivamente.

$$H_{met} = -1 * 10^{-10} * (Q_{exp}^3) + 1 * 10^{-6} * (Q_{exp}^2) - 0,0109 * Q_{exp} + 150,86 \quad (B-1)$$

$$H_{met} = -1 * 10^{-10} * (Q_{exp}^3) + 1 * 10^{-6} * (Q_{exp}^2) - 0,0134 * Q_{exp} + 150,83 \quad (B-2)$$

$$H_{met} = -2 * 10^{-10} * (Q_{exp}^3) + 2 * 10^{-6} * (Q_{exp}^2) - 0,0198 * Q_{exp} + 150,79 \quad (B-3)$$

$$H_{met} = -3 * 10^{-10} * (Q_{exp}^3) + 3 * 10^{-6} * (Q_{exp}^2) - 0,0255 * Q_{exp} + 150,77 \quad (B-4)$$

Posteriormente calculou-se o erro relativo absoluto através da fórmula B-5 e o erro relativo médio pela fórmula B-6, demonstrando os resultados da bomba operando com glicerina a 60 cP, 270 cP, 720 cP e 1020 cP respectivamente nas tabelas conforme a tabela B-1, B-2, B-3 e B-4.

$$ERRO \ RELATIVO \ ABSOLUTO = ABS \left(\frac{H_{exp} - H_{met}}{H_{exp}} \right) * 100 \quad (B-5)$$

$$ERRO \ RELATIVO \ MÉDIO = \frac{\sum ERRO \ RELATIVO}{n^{\circ} \text{ de Relações}} \quad (B-6)$$

Quadro B-1 - Cálculo do Erro Relativo do método da *Hydraulic Institute* – USA com os resultados experimentais, operando com glicerina a 60 cP.

Glicerina 60 cP			
Qexp	Hexp	Hmet	ERRO RELATIVO ABSOLUTO
9678,8	27,9	48,4	73,4
8809,3	45,3	64,1	41,5
7994,1	58,4	76,5	31,1
7162,7	67,9	87,3	28,6
6347,5	82,3	96,4	17,0
5575,8	88,6	103,8	17,2
4798,7	95,1	110,5	16,2
3999,8	103,0	116,9	13,4
3211,8	111,5	122,9	10,1
2445,5	118,1	128,7	9,0
1603,2	124,3	135,5	9,0
864,1	128,0	142,1	11,1
440,2	129,6	146,2	12,9
ERRO RELATIVO MÉDIO			22,4

Quadro B-2 - Cálculo do Erro Relativo do método da *Hydraulic Institute* – USA com os resultados experimentais, operando com glicerina a 270 cP.

Glicerina 270 cP			
Qexp	Hexp	Hmet	ERRO RELATIVO ABSOLUTO
8423,5	27,2	49,1	80,5
7553,9	45,6	63,6	39,4
6102,9	65,9	83,6	26,7
5814,9	72,5	87,1	20,1
5016,0	79,4	96,2	21,1
4179,1	87,6	105,0	19,9
3309,6	102,7	113,8	10,8
2451,0	110,6	122,5	10,8
1570,6	120,1	131,9	9,8
668,4	125,3	142,3	13,5
0,0	129,3	150,8	16,7
ERRO RELATIVO MÉDIO			24,5

Quadro B-3 - Cálculo do Erro Relativo do método da *Hydraulic Institute* – USA com os resultados experimentais, operando com glicerina a 720 cP.

Glicerina 720 cP			
Qexp	Hexp	Hmet	ERRO RELATIVO ABSOLUTO
5809,5	51,5	64,0	24,3
5304,1	61,7	72,2	17,0
4624,7	70,9	82,2	16,0
4086,7	76,4	89,6	17,2
3597,6	86,9	96,1	10,6
3005,3	96,5	103,9	7,7
2521,6	102,4	110,4	7,8
1885,8	107,0	119,2	11,5
1304,3	112,5	127,9	13,7
625,0	117,8	139,1	18,1
ERRO RELATIVO MÉDIO			14,4

Quadro B-4 - Cálculo do Erro Relativo do método da *Hydraulic Institute* – USA com os resultados experimentais, operando com glicerina a 1020 cP.

Glicerina 1020 cP			
Qexp	Hexp	Hmet	ERRO RELATIVO ABSOLUTO
3891,1	75,1	79,3	5,5
3472,6	80,7	85,8	6,3
3086,8	85,0	91,8	8,1
2798,8	87,9	96,3	9,6
2396,6	91,9	102,8	11,9
2076,0	95,5	108,1	13,2
1787,9	98,4	113,1	14,9
1440,1	100,4	119,4	18,9
1032,6	103,3	127,3	23,2
543,4	111,9	137,7	23,1
ERRO RELATIVO MÉDIO			10,4

APÊNDICE C

Alternância da rotação utilizando as Leis de Afinidade

A variação de rotação tem influência direta nas condições de funcionamento da BCS GN 7000. As Leis de Afinidade tem como função definir as condições de vazão, *head* e potência, quando a bomba opera com diferentes rotações. A princípio, tais leis são válidas apenas para fluidos de baixa viscosidade; no caso deste trabalho, a água. As equações a seguir foram determinantes para o desenvolvimento da tabela C-1.

$$Q_N = Q_{3500} * \left(\frac{N}{3500} \right) \quad (C-1)$$

$$H_N = H_{3500} * \left(\frac{N}{3500} \right) \quad (C-2)$$

$$BHP_N = BHP_{3500} * \left(\frac{N}{3500} \right) \quad (C-3)$$

Para obter os resultados através das equações anteriores das Leis de Afinidade, considera-se “N”, a velocidade rotacional (que varia no trabalho entre 3000 rpm, 2400 rpm e 1800 rpm) em que se deseja encontrar as alturas de elevação (H), as vazões (Q) e as potências no eixo (BHP). Os resultados obtidos estão presentes nas Tabelas C-1 e C-2.

Quadro C-1– Variação da rotação de 3500 rpm para 2400 rpm e 1800 rpm, pelas Leis de Afinidade

3500 RPM			3000 RPM			2400 RPM		
Vazão (bpd)	Head (ft)	Potência (hp)	Vazão (bpd)	Head (ft)	Potência (hp)	Vazão (bpd)	Head (ft)	Potência (hp)
11027	36,1	0,1	9451,3	26,5	0,1	7561	17,0	0,03
10554	47,6	0,1	9046,1	35,0	0,1	7237	22,4	0,03
10005	58,7	0,1	8575,6	43,1	0,1	6860	27,6	0,03
9516	67,6	0,1	8156,4	49,7	0,1	6525	31,8	0,03
9081	73,8	0,1	7783,7	54,2	0,1	6227	34,7	0,03
8614	84,6	0,1	7383,1	62,2	0,1	5907	39,8	0,03
8048	90,9	0,1	6898,7	66,8	0,1	5519	42,7	0,03
7576	95,1	0,1	6493,4	69,9	0,1	5195	44,7	0,03
7119	98,4	0,1	6102,2	72,3	0,1	4882	46,3	0,03
6587	102,0	0,1	5645,7	75,0	0,1	4517	48,0	0,03
6016	106,3	0,1	5156,6	78,1	0,1	4125	50,0	0,03
5549	109,6	0,1	4756,0	80,5	0,1	3805	51,5	0,03
4973	114,5	0,1	4262,2	84,1	0,1	3410	53,8	0,03
4521	119,1	0,1	3875,6	87,5	0,1	3100	56,0	0,03
4054	122,4	0,1	3475,0	89,9	0,1	2780	57,5	0,03
4011	122,0	0,1	3437,7	89,7	0,1	2750	57,4	0,03
3500	126,0	0,1	2999,8	92,6	0,0	2400	59,2	0,03
3043	128,3	0,1	2608,6	94,2	0,0	2087	60,3	0,02
2532	131,6	0,1	2170,7	96,7	0,0	1737	61,9	0,02
2087	132,9	0,1	1788,7	97,6	0,0	1431	62,5	0,02
1576	135,2	0,1	1350,9	99,3	0,0	1081	63,6	0,02
1049	137,1	0,1	899,0	100,8	0,0	719	64,5	0,02

Quadro C-2 - Variação da rotação de 3500 rpm para 1800 rpm, pelas Leis de Afinidade

3500 RPM			1800 RPM		
Vazão (bpd)	Head (ft)	Potência (hp)	Vazão (bpd)	Head (ft)	Potência (hp)
11026,6	36,1	0,099	5670,8	9,5	0,013
10553,8	47,6	0,099	5427,7	12,6	0,013
10004,9	58,7	0,099	5145,4	15,5	0,013
9515,8	67,6	0,100	4893,8	17,9	0,014
9081,0	73,8	0,099	4670,2	19,5	0,013
8613,7	84,6	0,100	4429,9	22,4	0,014
8048,5	90,9	0,099	4139,2	24,0	0,013
7575,7	95,1	0,097	3896,1	25,2	0,013
7119,2	98,4	0,096	3661,3	26,0	0,013
6586,6	102,0	0,093	3387,4	27,0	0,013
6016,0	106,3	0,091	3093,9	28,1	0,012
5548,6	109,6	0,089	2853,6	29,0	0,012
4972,6	114,5	0,087	2557,3	30,3	0,012
4521,5	119,1	0,084	2325,3	31,5	0,011
4054,1	122,4	0,081	2085,0	32,4	0,011
4010,7	122,0	0,081	2062,6	32,3	0,011
3499,8	126,0	0,078	1799,9	33,3	0,011
3043,3	128,3	0,075	1565,1	33,9	0,010
2532,5	131,6	0,074	1302,4	34,8	0,010
2086,8	132,9	0,071	1073,2	35,1	0,010
1576,0	135,2	0,068	810,5	35,8	0,009
1048,9	137,1	0,066	539,4	36,3	0,009

ANEXO I

TABELAS

Quadro I-1 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com água a 3500 rpm.

Água - 1 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	Ef (%)
0,02029	11026,57	11	36,1	37,5
0,01942	10553,77	14,5	47,6	47,3
0,01841	10004,89	17,9	58,7	55,2
0,01751	9515,79	20,6	67,6	60,0
0,01671	9081,03	22,5	73,8	63,0
0,01585	8613,66	25,8	84,6	67,5
0,01481	8048,48	27,7	90,9	68,9
0,01394	7575,67	29	95,1	69,0
0,0131	7119,18	30	98,4	68,1
0,01212	6586,60	31,1	102,0	67,3
0,01107	6015,98	32,4	106,3	65,0
0,01021	5548,61	33,4	109,6	63,6
0,00915	4972,56	34,9	114,5	60,8
0,00832	4521,49	36,3	119,1	59,7
0,00746	4054,13	37,3	122,4	57,1
0,00738	4010,65	37,2	122,0	56,2
0,00644	3499,81	38,4	126,0	52,4
0,0056	3043,31	39,1	128,3	48,2
0,00466	2532,47	40,1	131,6	42,0
0,00384	2086,84	40,5	132,9	36,3
0,0029	1576,00	41,2	135,2	29,0
0,00193	1048,86	41,8	137,1	20,1

Quadro I-2 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 60 cP, a 3500 rpm

Fluido - 60 cP					
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)	Ef (%)
0,0178	9678,82	8,5	27,9	60,4	21,8
0,0162	8809,30	13,8	45,3	60,6	32,1
0,0147	7994,13	17,8	58,4	60,7	37,3
0,0132	7162,65	20,7	67,9	61,0	39,6
0,0117	6347,48	25,1	82,3	60,6	44,2
0,0103	5575,78	27	88,6	60,3	43,2
0,0088	4798,65	29	95,1	60,2	41,4
0,0074	3999,78	31,4	103,0	60,2	38,9
0,0059	3211,78	34	111,5	60,1	34,9
0,0045	2445,52	36	118,1	60,1	28,9
0,0030	1603,17	37,9	124,3	60,1	20,8
0,0016	864,08	39	128,0	60,2	12,0
0,0008	440,19	39,5	129,6	60,7	6,4
				TMED (°C)	60,4

Quadro I-3 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 270 cP, a 3500 rpm

Fluido - 270 cP					
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)	Ef (%)
0,0155	8423,45	8,3	27,2	39,2	16,3
0,0139	7553,94	13,9	45,6	39,2	24,5
0,01123	6102,93	20,1	65,9	39,6	29,4
0,0107	5814,90	22,1	72,5	39,4	31,3
0,00923	5016,03	24,2	79,4	39,3	30,8
0,00769	4179,12	26,7	87,6	39,2	29,7
0,00609	3309,60	31,3	102,7	39,2	28,1
0,00451	2450,95	33,7	110,6	39,3	23
0,00289	1570,57	36,6	120,1	39,3	17
0,00123	668,44	38,2	125,3	39,9	7,9
0	0,00	39,4	129,3	40,4	0
				TMED (°C)	39,5

Quadro I-4 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 720 cP, a 3500 rpm

Fluido - 720 cP					
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)	Ef (%)
0,01069	5809,47	15,7	51,5	24,9	18,7
0,00976	5304,06	18,8	61,7	25,2	20,8
0,00851	4624,75	21,6	70,9	25,2	21,4
0,00752	4086,73	23,3	76,4	25	20,8
0,00662	3597,63	26,5	86,9	24,7	21,3
0,00553	3005,27	29,4	96,5	25,1	20,4
0,00464	2521,60	31,2	102,4	25,5	18,5
0,00347	1885,77	32,6	107,0	25,2	14,7
0,0024	1304,28	34,3	112,5	25,4	10,7
0,00115	624,97	35,9	117,8	25,5	5,4
				TMED (°C)	25,2

Quadro I-5 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 1020 cP, a 3500 rpm

Fluido - 1020 cP					
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)	Ef (%)
0,00716	3891,09	22,9	75,1	20,5	18,6
0,00639	3472,64	24,6	80,7	20,3	18,2
0,00568	3086,79	25,9	85,0	20,2	17,1
0,00515	2798,76	26,8	87,9	20	16,3
0,00441	2396,61	28	91,9	20,1	14,8
0,00382	2075,97	29,1	95,5	20,4	13,4
0,00329	1787,95	30	98,4	20,4	12
0,00265	1440,14	30,6	100,4	20,2	10
0,0019	1032,55	31,5	103,3	20,5	7,4
0,001	543,45	34,1	111,9	21,3	4,3
				TMED (°C)	20,4

Quadro I-6 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com água, a 3000 rpm

Água - 1 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	Ef (%)
0,01879	10211,40	2,3	7,5	12,2
0,0175	9510,35	7,3	24,0	35,7
0,01674	9097,33	10,1	33,1	46,2
0,01561	8483,23	13,4	44,0	56,8
0,01476	8021,30	16,4	53,8	63,3
0,01387	7537,63	18,1	59,4	63,2
0,01289	7005,05	19,4	63,6	63,7
0,01197	6505,08	20,6	67,6	64,6
0,01113	6048,58	21,2	69,6	62,9
0,01009	5483,40	22,2	72,8	61,9
0,00932	5064,94	22,9	75,1	60,3
0,00829	4505,19	24	78,7	57,6
0,00743	4037,82	25,1	82,3	55,2
0,00642	3488,94	26,5	86,9	56,7
0,00556	3021,57	27,4	89,9	49,8
0,0046	2499,86	28,1	92,2	43,3
0,0037	2010,76	28,6	93,8	36,4
0,0029	1576,00	28,9	94,8	29,6
0,00163	885,82	29,9	98,1	18,1

Quadro I-7 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 60 cP, a 3000 rpm

Fluido - 60 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,0178	9678,82	7,3	24,0	60,9
0,0162	8809,30	11,6	38,1	60,8
0,0147	7994,13	14,6	47,9	60,7
0,0132	7162,65	17	55,8	60,6
0,0117	6347,48	18,6	61,0	60,7
0,0103	5575,78	20,5	67,3	60,7
0,0088	4798,65	24,1	79,1	60,6
0,0074	3999,78	26,5	86,9	60,6
0,0059	3211,78	28,1	92,2	60,5
0,0045	2445,52	29	95,1	60,5
0,0030	1603,17	29,5	96,8	60,7
TMED (°C)				60,7

Quadro I-8 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 270 cP, a 3000 rpm

Fluido - 270 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,01419	7711,54	1,5	4,9	39,4
0,01279	6950,71	6,1	20,0	39,2
0,01154	6271,40	9,4	30,8	39,1
0,01036	5630,13	13,3	43,6	39,1
0,00879	4776,91	16,4	53,8	39,5
0,00735	3994,35	18,5	60,7	39,2
0,00583	3168,31	20,6	67,6	39,1
0,0044	2391,17	24,6	80,7	39,4
0,00297	1614,04	25,7	84,3	39,5
0,00144	782,57	27,2	89,2	39,7
0	0,00	28,3	92,8	39,9
TMED (°C)				39,4

Quadro I-9 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 720 cP, a 3000 rpm

Fluido - 720 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00929	5048,64	10,3	33,8	25,4
0,00826	4488,89	12,9	42,3	25,4
0,00752	4086,73	14,5	47,6	25,1
0,00664	3608,50	16,2	53,1	25,3
0,00579	3146,57	17,7	58,1	25,1
0,00476	2586,82	19,5	64,0	24,8
0,00392	2130,32	22,7	74,5	25,3
0,00312	1695,56	23,8	78,1	25,7
0,0023	1249,93	24,9	81,7	25,1
0,00109	592,36	26,1	85,6	25
TMED (°C)				25,2

Quadro I-10 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 1020 cP, a 3000 rpm

Fluido - 1020 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,0072	3912,83	13	42,7	20,6
0,00667	3624,80	14,3	46,9	20,4
0,00595	3233,52	15,7	51,5	20,2
0,00518	2815,06	17,2	56,4	20,4
0,0043	2336,83	18,6	61,0	20,3
0,00368	1999,89	19,3	63,3	20,2
0,0029	1576,00	22,2	72,8	20,1
0,00228	1239,06	23,3	76,4	20,3
0,00167	907,56	24,3	79,7	20,6
0,00084	456,50	25,1	82,3	20,4
TMED (°C)				20,4

Quadro I-11- Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com água, a 2400 rpm

Água - 1 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	Ef (%)
0,01434	7793,1	3,8	12,5	29,6
0,013	7064,8	7,7	25,3	53,5
0,01205	6548,6	10,2	33,5	62,8
0,01104	5999,7	12,1	39,7	67,6
0,01017	5526,9	13,1	43,0	69,4
0,00916	4978,0	13,8	45,3	68,1
0,00828	4499,8	14,5	47,6	66,7
0,00657	3570,5	15,9	52,2	62,0
0,00516	2804,2	17,4	57,1	55,4
0,00455	2472,7	17,8	58,4	51,5
0,00371	2016,2	18,4	60,4	45,1
0,00284	1543,4	18,7	61,4	36,4
0,00192	1043,4	19,1	62,7	26,3
0,00111	603,2	19,6	64,3	16,4

Quadro I-12- Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 60 cP, a 2400 rpm

Fluido - 60 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,01142	6206,18	4,7	15,4	60,8
0,01029	5592,09	7,4	24,3	60,7
0,00908	4934,51	9,5	31,2	60,5
0,00788	4282,38	11,2	36,7	60,4
0,00665	3613,93	12,4	40,7	60,4
0,00559	3037,88	13,5	44,3	60,3
0,00442	2402,04	15,1	49,5	60,2
0,00327	1777,08	16,5	54,1	60,1
0,00214	1162,98	17,5	57,4	60,0
0,00102	554,32	17,8	58,4	60,0
TMED (°C)				60,3

Quadro I-13 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 270 cP, a 2400 rpm

Fluido - 270 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00899	4885,60	6,2	20,3	39,3
0,00811	4407,37	8,4	27,6	39,4
0,00716	3891,09	10,1	33,1	39,1
0,00634	3445,46	11,1	36,4	39
0,00552	2999,84	12	39,4	39
0,00453	2461,82	13,4	44,0	39,1
0,00368	1999,89	15,1	49,5	39,3
0,00279	1516,22	16,3	53,5	39,4
0,00201	1092,33	17,2	56,4	39,1
0,00077	418,46	18,1	59,4	39,3
0	0,00	18,7	61,4	39,6
TMED (°C)				39,2

Quadro I-14 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 720 cP, a 2400 rpm

Fluido - 720 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00654	3554,15	8,1	26,6	25,7
0,00608	3304,17	8,9	29,2	25,4
0,00549	2983,53	10	32,8	25,4
0,00486	2641,16	11	36,1	24,9
0,0042	2282,48	11,8	38,7	25,5
0,00366	1989,02	12,7	41,7	25,6
0,00315	1711,86	13,2	43,3	25,4
0,00257	1396,66	13,9	45,6	25
0,00195	1059,72	15,7	51,5	25,5
0,00122	663,01	16,3	53,5	25,9
TMED (°C)				25,4

Quadro I-15 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 1020 cP, a 2400 rpm

Fluido - 1020 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00532	2891,15	7,7	25,3	19,9
0,00498	2706,37	8,8	28,9	20,3
0,0045	2445,52	9,8	32,2	20,5
0,00398	2162,93	10,7	35,1	20,2
0,00349	1896,64	11,4	37,4	20,2
0,00317	1722,73	12,2	40,0	20,3
0,00272	1478,18	12,8	42,0	20,5
0,00223	1211,89	13,4	44,0	20,1
0,0018	978,21	14,6	47,9	20,3
0,00133	722,79	15,3	50,2	20,2
0	0,00	18,2	59,7	20,3
TMED (°C)				20,3

Quadro I-16 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com água, a 1800 rpm

Água - 1 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	Ef (%)
0,0114	6195,32	0,2	0,7	2,7
0,0111	6032,28	1,3	4,3	16,6
0,0102	5543,18	3,3	10,8	39,4
0,0093	5054,07	5,4	17,7	55,5
0,0083	4510,62	6,7	22,0	62,4
0,0074	4021,52	7,5	24,6	62,2
0,0065	3532,42	8	26,2	61,1
0,0056	3043,31	8,7	28,5	59,8
0,0046	2499,86	9,4	30,8	57,2
0,0032	1739,04	10,4	34,1	48,9
0,0026	1412,97	10,5	34,4	40,8
0,0019	1032,55	10,9	35,8	32,8
0,0009	489,10	11,4	37,4	18,3

Quadro I-17 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 60 cP, a 1800 rpm

Fluido - 60 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00906	4923,65	1,2	3,9	60,7
0,00821	4461,71	2,9	9,5	60,6
0,00730	3967,18	4,4	14,4	60,4
0,00644	3499,81	5,5	18,0	60,2
0,00570	3097,66	6,2	20,3	60,1
0,00474	2575,95	6,9	22,6	60,6
0,00379	2059,67	7,8	25,6	60,5
0,00301	1635,78	8,7	28,5	60,4
0,00210	1141,24	9,6	31,5	60,2
0,00115	624,97	10	32,8	60,1
TMED (°C)				60,4

Quadro I-18 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 270 cP, a 1800 rpm

Fluido - 270 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00648	3521,55	3,4	11,2	39,2
0,00593	3222,65	4,1	13,5	39,2
0,00531	2885,71	5,3	17,4	39,2
0,00475	2581,38	6	19,7	39,2
0,00421	2287,92	6,4	21,0	39,2
0,00419	2277,05	6,3	20,7	39,2
0,00355	1929,24	7	23,0	39,2
0,00299	1624,91	7,9	25,9	39,2
0,00244	1326,01	8,8	28,9	39,2
0,00184	999,95	9,4	30,8	39,3
0,00122	663,01	9,6	31,5	39,3
0	0,00	10,4	34,1	39,4
TMED (°C)				39,2

Tabela I-19 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 720 cP, a 1800 rpm

Fluido - 720 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00498	2706,37	3,1	10,2	25,5
0,00457	2483,56	3,6	11,8	25
0,00409	2222,71	4,6	15,1	25,2
0,00374	2032,50	5	16,4	25,4
0,00322	1749,90	5,8	19,0	25
0,00284	1543,39	6,3	20,7	25,2
0,00239	1298,84	6,8	22,3	25,5
0,00192	1043,42	7,2	23,6	25
0,00152	826,04	7,7	25,3	25,4
0,00102	554,32	8,1	26,6	25
TMED (°C)				25,2

Tabela I-20 - Dados Experimentais da BCS GN 7000 operando com Glicerina a 1020 cP, a 2400 rpm

Fluido - 1020 cP				
Q (m³/s)	Q (bpd)	H (m)	H (ft)	T (°C)
0,00511	2777,02	0,3	1,0	20,2
0,0046	2499,86	1,8	5,9	20,1
0,00421	2287,92	2,6	8,5	20,2
0,00377	2048,80	3,4	11,2	20,5
0,0031	1684,69	4,6	15,1	20,5
0,00271	1472,75	5,1	16,7	20,2
0,00228	1239,06	5,7	18,7	20,3
0,00183	994,51	6,2	20,3	20,5
0,00133	722,79	7,2	23,6	20,8
0	0,00	9,4	30,8	21
TMED (°C)				20,4