



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CONTROLE DE VAZÃO DE BCS.

MERCIA OLIVEIRA DE SOUZA

Orientador: Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa

**NATAL/RN
2015**

MERCIA OLIVEIRA DE SOUZA

Estudo da Eficiência Energética do Controle de Vazão de BCS

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Orientador: Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa

**NATAL/RN
2015**

MERCIA OLIVEIRA DE SOUZA

Estudo da Eficiência Energética do Controle de Vazão de BCS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
Orientador – UFRN

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Membro Examinador – UFRN

Prof. Msc. Sergio Jose Gonçalves e Silva
Membro Examinador – UFRN

Dedico este trabalho aos meus pais, Celia e Ancelmo, e em especial a minha mãe por seu cuidado, dedicação, incentivo e ensinamentos.

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada, pois o que seria de mim sem a fé que eu tenho nele.

Aos meus pais, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida

As minhas adoráveis irmãs: Kivia, Marcia e Marciele que sempre me ajudaram e me apoiaram, cada uma do seu jeito, mas sempre estavam lá, não só na minha vida acadêmica como em todos os momentos da minha vida. Obrigada sisters, pela paciência, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo carinho.

Aos meus cunhados: Leandro, por ser meu motorista particular durante a minha vida acadêmica. E Ilton, por sempre me incentivar nessa jornada.

Aos meus colegas de curso, que me ajudaram direta e indiretamente.

A meu orientador, Prof Dr. Rutácio que teve paciência e que me ajudou bastante a concluir este trabalho.

Aos demais professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A bomba centrífuga é um equipamento muito importante no método de elevação artificial por BCS, pois ela tem a função de elevar o fluido de produção do reservatório para a superfície, e o responsável pelo seu acionamento é o motor que normalmente opera com rotação constante, fornecendo energia de acordo com a vazão da bomba. Devido a bomba operar sem variação de velocidade em seu acionamento, ela é incapaz de controlar a vazão do sistema. Quando é necessário fazer o controle de fluxo em um sistema BCS é utilizado um variador de velocidade ou uma válvula de controle de fluxo. Neste trabalho serão estimados os ganhos ou perdas decorrentes da utilização de uma válvula de controle de fluxo e de um variador de velocidade em um sistema BCS. Os ganhos ou perdas serão calculados com base na diferença de consumo de energia elétrica pelo conjunto motor-bomba com a válvula de controle e com o variador de velocidade.

Palavras-chave: Bombas Centrífugas. Controle de vazão. Eficiência Energética.

ABSTRACT

The centrifugal pump is a very important equipment in the artificial lift methods BCS, because it has the function to lift the reservoir production fluid to the surface, and the responsible of your driven is motor that normally operates at a constant rotation and supply power according to pump flow. Because pump operate without speed variation on your drive, it is unable to control the system flow. When is need to control flow in BCS system is used a variable speed drive or a flow control valve. This work will be estimated gains or losses over use of a flow control valve and a variable speed drive in BCS system. Gains or losses are calculated based on the difference in power electric consumption by the motor-pump set with the control valve and the variable speed drive.

KEYWORDS: centrifugal pump. control flow. Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva de IPR – Modelo Linear.....	14
Figura 2.2 - vazão por surgência.....	15
Figura 2.3 - Poço equipado por BCS.....	17
Figura 2.4 - Bomba Centrífuga de Múltiplos estágios.....	18
Figura 2.5 - Impelidor e Difusor de um estágio.....	19
Figura 2.6 - funcionamento de um estágio de bomba.....	19
Figura 2.7 - Curva Característica de uma bomba.....	20
Figura 2.8 - Variação do <i>head</i> e da vazão com a rotação.....	22
Figura 2.9 - Determinação do Ponto de trabalho.....	23
Figura 2.10 - Perdas por fricção a cada 1000ft (<i>Hazen-Williams</i>)	25
Figura 2.11 - Sistema BCS.....	26
Figura 2.12 - Motor Elétrico usado em BCS.....	27
Figura 2.13 - Gráfico de Tensão x frequência no VSD.....	29
Figura 2.14 - VSD instalado em Painel.....	30
Figura 3.1 - controle da vazão com a válvula.....	32
Figura 3.2 - Esquema do choke.....	33
Figura 3.3 - Choke.....	33
Figura 3.4 - Controle de vazão com VSD.....	34
Figura 3.5 - Ponto de operação do projeto.....	36
Figura 3.6 - Curva do sistema mudando em função do estrangulamento do choke.....	37
Figura 3.7 - Curva da potência do sistema mudando em função do estrangulamento do choke.	38
Figura 3.8 - Curva da mudando em função da rotação de velocidade da bomba.....	
Figura 3.9 - Curva da potência da bomba mudando com o uso do VSD.....	39
Figura 4.1 - Comparação do controle de vazão utilizando o choke e o VSD.....	40
Figura 4.2 - Comparação da potência consumida pela bomba, utilizando o choke e o VSD.....	41
Figura 4.3 - fluxo de caixa para o investimento proposto.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Dados de entrada utilizados no projeto.....	35
Tabela 3.2 Dados de saída utilizados no projeto.....	36
Tabela 4.1 Potência consumida no controle da vazão.....	41
Tabela 4.2 Consumo e custo mensal de energia elétrica utilizada pela bomba.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

API	Grau API (adimensional)
BHP	Potência absorvida pela bomba, w (hp).
BSW	Percentual de água e sedimentos do fluido produzido, adimensional.
$E_{consumida}$	Energia elétrica consumida, KWh
f	Frequência, Hz
H	Altura manométrica total ou <i>head</i> , m (ft).
H_{req}	Altura manométrica total ou <i>head</i> requerido para o escoamento, m (ft).
I_2	Corrente rotórica, (A)
ID_{col}	Diâmetro interno da coluna de produção, (in).
IP	Índice de produtividade, m ³ /s/Pa (bpd/psi)
K	Constante (adimensional)
L_{bomba}	Profundidade vertical de assentamento da bomba centrífuga, m (ft).
L_{canh}	Profundidade vertical dos canhoneados, m (ft).
N	Rotação da bomba, s ⁻¹ (rpm).
ND	Nível dinâmico, ft.
$N_{síncrona}$	Velocidade Síncrona do motor, RPM.
q	Vazão volumétrica, bpd.
q_d	Vazão desejada de operação, bpd.
q_{max}	Vazão máxima do reservatório, bpd.
p	Número de polos no estator.
Pot_{Total}	Potência total consumida pela bomba, Watts (HP)
P_c	Potência cedida ao fluido, w (hp).
P_{cab}	Pressão na cabeça do poço, psi
P_d	Pressão na descarga da bomba, Pa (psi).
P_e	Pressão no limite externo de um meio poroso, psi
P_{rev}	Pressão no revestimento de produção, psi.
P_s	Pressão na sucção da bomba, psi.
P_{wf}	Pressão de fluxo no fundo do poço, Pa (psi).
ΔP_{fric}	Perdas por fricção ao longo da coluna de produção, ft.
T	Torque, N.m
TDH	Altura total de elevação, ft.
V_1	Tensão estatorica, V

Letras Gregas

Γ	Peso específico do fluido, N/m ³ (lbf/ft ³).
$\gamma_{\text{água}}^{grad}$	Gradiente de pressão da água, (kgf/cm ² -m).
γ_{liq}	Densidade relativa do líquido (adimensional)
H	Eficiência ou rendimento, adimensional
\emptyset_m	Fluxo de magnetização, (Wb).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2 ASPECTOS TEÓRICOS	13
2.1 DESEMPENHO E PRODUTIVIDADE DO POÇO.	13
2.2 BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO.....	15
2.3 BOMBAS CENTRÍFUGAS	17
2.3.1 curva características das Bombas	19
2.4 DETERMINAÇÃO DA ALTURA TOTAL DE ELEVAÇÃO (TDH)	24
2.4.1 TDH para escoamento monofásico	24
2.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ESTÁGIOS DA BOMBA	27
2.6 MOTOR ELÉTRICO	27
2.7 VARIADOR DE VELOCIDADE.....	28
3 METODOLOGIA	30
3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO SISTEMA ESTUDADO	31
3.1.1 Controle da vazão usando válvula de controle	31
3.1.2 Controle de vazão por variação da velocidade na bomba	33
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.....	34
3.2.1 Estudo de caso 1: Controle de vazão utilizando o choke	37
3.2.2 Estudo de caso 2: Controle de vazão utilizando o VSD	38
4 RESULTADOS E DISCURSSÕES	40
4.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	42
4.1.1 Custo do consumo de energia elétrica utilizada no controle de vazão	42
4.1.2 Análise do Retorno do Investimento	43
5 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A elevação artificial é um método utilizado na indústria de petróleo quando a pressão do reservatório não é suficientemente alta para fazer com que os fluidos contidos no reservatório alcance livremente a superfície. Esse método eleva os fluidos para a superfície por meios artificiais e é aplicado em: reservatórios de baixa pressão, no final da vida produtiva por surgência e quando a vazão de produção do poço está abaixo do esperado.

O Bombeio Centrifugo Submerso (BCS) é um dos métodos de elevação mais utilizados na indústria do petróleo devido ser um meio eficaz e econômico de elevar grandes volumes de fluido a grandes profundidades sob uma grande variedade de condições de poço. Um equipamento de fundamental importância no BCS é a bomba centrífuga de múltiplos estágios, pois é através dela que o fluido é elevado do poço para a superfície.

O motor é o responsável pelo acionamento da bomba que normalmente opera em rotação constante, fornecendo energia de acordo com a vazão da bomba. Devido à bomba operar sem variação de velocidade em seu acionamento, ela é impossibilitada de controlar a vazão do sistema.

Para resolver o problema do controle de vazão quando se deseja melhorar o desempenho do sistema BCS, são utilizadas as seguintes técnicas:

- O uso de uma válvula de controle de vazão, o *choke*, que restringe o fluxo na superfície (modifica as condições do sistema);
- O uso de um variador de velocidade (VSD- *Variable Speed Drive*) que controla a velocidade de rotação da bomba que conseqüentemente muda o seu ponto de operação no sistema, fazendo o controle da vazão (modifica as características da bomba);
- E a recirculação do fluido produzido.

Nesse trabalho foi feito uma análise comparativa de estudo de caso do controle de vazão de fluido no sistema de elevação BCS utilizando o variador de velocidade (VSD) e a válvula de controle de vazão (*choke*).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é fazer a comparação da eficiência energética do controle de vazão do método de elevação artificial de Bombeio Centrifugo Submerso (BCS) utilizando o variador de velocidade (VSD) e a válvula de controle de fluxo (choke)

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar os ganhos ou perdas energéticas, decorrentes da utilização do choke e VSD;
- Analisar os custos mensais das utilizações do uso do choke e do VSD;
- Analisar a viabilidade econômica de um projeto que propõe a implantação de um variador de velocidade em uma bomba centrífuga.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão abordados os principais tópicos que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho onde os aspectos teóricos são referentes ao escoamento monofásico, ao método de elevação BCS e ao comportamento da bomba centrífuga.

2.1 DESEMPENHO E PRODUTIVIDADE DO POÇO.

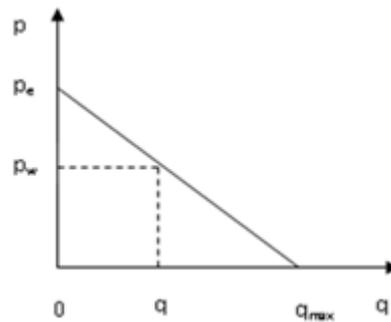
Para que um sistema de elevação artificial seja projetado adequadamente é necessário que se tenha um preciso conhecimento com relação às características dos fluidos produzidos, dados do reservatório, dados de teste em poços e condições operacionais, para que seja possível determinar as vazões de produção que o reservatório pode fornecer ao poço assim como vazões máximas que determinado sistema pode prover (OLIVA, 2013).

As curvas de pressão disponível em um reservatório, denominadas curvas de IPR (Inflow Performance Relationships), representam a relação que existe entre a pressão de fluxo no fundo do poço e a vazão através do meio poroso. A capacidade de fluxo do poço é caracterizada pelo índice de produtividade (IP), definido pela equação 2.1.

$$IP = \frac{q}{P_e - P_{wf}} \quad (2.1)$$

O escoamento monofásico ocorre sempre que a pressão de fluxo estiver acima da pressão de bolha, ou pressão de saturação do óleo e quando isso ocorre não há produção de gás no fundo do poço. Para o escoamento monofásico utiliza-se um modelo teórico conhecido como Modelo Linear da curva de IPR ($P_{wf} \times q$), onde considera o índice de produtividade constante, independente da vazão. A curva típica de fluxo monofásico é representada por uma reta, o Modelo Linear da curva de IPR está representado na figura 2.1.

Figura 2.1 – Curva de IPR – Modelo Linear



Fonte: COSTA, 2012

O ponto onde a curva de IPR intercepta o eixo horizontal representa o potencial do poço ou vazão máxima. Entretanto, este valor é apenas teórico, pois na prática não é possível reduzir a pressão de fundo para zero.

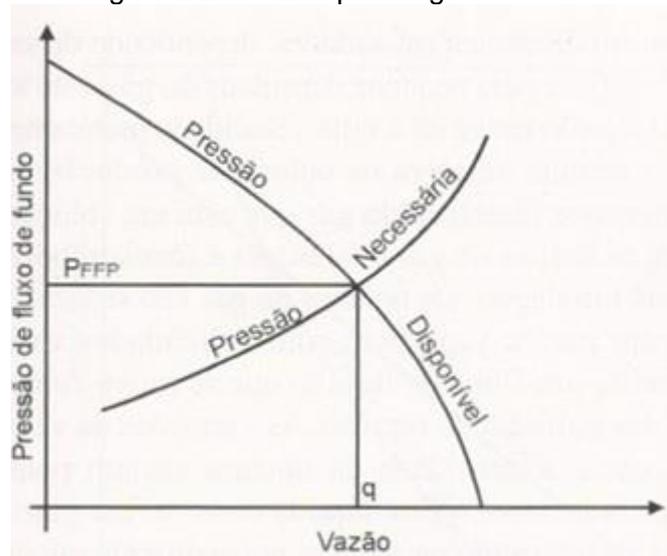
O modelo linear para IPR não se aplica quando as pressões no interior do reservatório caem abaixo da pressão de saturação do óleo, pois nesse caso há escoamento de gás livre. Vogel (1968) criou um modelo para reservatórios com gás em solução com pressão igual ou abaixo da pressão de saturação, tendo como consideração o fluxo bifásico de óleo e gás. A IPR de Vogel pode ser representada pela Equação 2.2.

$$\frac{q}{q_{max}} = 1 - 0,2 \left(\frac{P_{wf}}{P_e} \right) - 0,8 \left(\frac{P_{wf}}{P_e} \right)^2 \quad (2.2)$$

Onde q_{max} é a vazão máxima do reservatório, correspondente à pressão de fluxo de fundo de poço igual à pressão atmosférica.

Ao traçar as curvas de pressão disponível e pressão necessária no fundo do poço é possível determinar a vazão do poço surgente, ou ainda definir a necessidade de instalação de elevação artificial.

Figura 2.2 – vazão por surgência



Fonte: Thomas, 2001

Desprezando-se a perda de carga no *choke*, o ponto de intersecção entre as curvas de pressão disponível e pressão necessária determina a vazão possível por surgência com o *choke* totalmente aberto, como ilustrado na Figura 2.2. Vazões menores podem ser obtidas restringindo-se o escoamento através do *choke* na superfície. Porém, pode ocorrer que as curvas não se interceptem ou o façam em vazões muito baixas, não sendo possível a produção comercial do poço. Nesses casos, é necessária a instalação de equipamentos específicos que irão ajudar a pressão do reservatório a superar as perdas de carga do sistema a jusante dos canhoneados (PRADO, 2007).

2.2 BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO

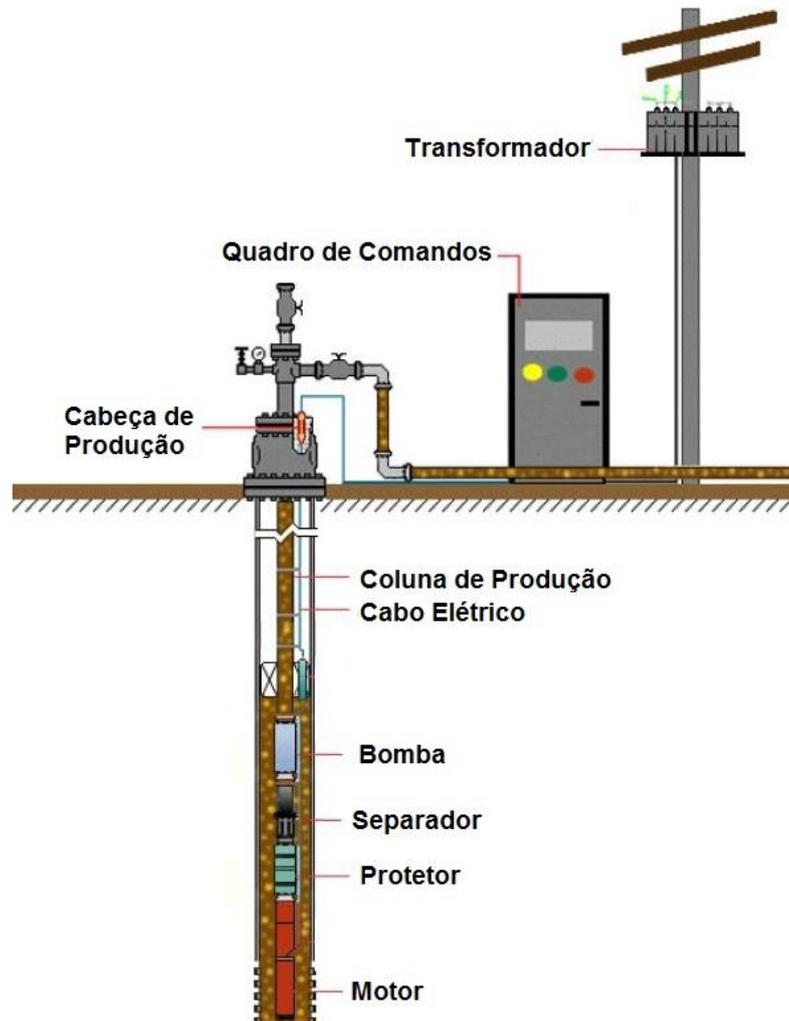
O bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um método de elevação artificial de petróleo que foi inventado em 1910 e pode ser aplicado tanto em ambientes terrestres (*onshore*) como marítimos (*offshore*). O BCS se destaca por elevar grandes volumes de fluido de grandes profundidades e sob uma grande variedade de condições de poço. E suas principais vantagens são: produz altos volumes de líquido a temperaturas relativamente altas de profundidades médias e requer pouca manutenção desde que a instalação seja corretamente projetada e operada. E suas principais desvantagens são: necessita de uma fonte de energia elétrica de alta tensão, o sistema opera em uma frequência constante de eletricidade.

Uma instalação convencional de BCS consiste de equipamentos de superfície e de equipamentos de subsuperfície onde estes são instalados na extremidade da coluna de produção e operam submerso no fluido do poço, com exceção ao cabo elétrico que é instalado na superfície e direcionado ao fundo do poço. A instalação convencional de BCS pode ser visualizada na Figura 2.3.

De uma forma simplificada, os principais componentes de subsuperfície são o motor elétrico, o protetor, a bomba e o cabo que estão no interior do poço, protegidos pelo revestimento. Na superfície, os principais componentes são o quadro de comando, os transformadores, cabeça de produção e uma fonte de energia elétrica (MAITELLI, 2010).

No BCS a energia requerida para elevação é transmitida da superfície, através de um transformador de potência, por meio de um cabo elétrico até o fundo do poço, onde é transformada em energia mecânica, através de um motor de subsuperfície, o qual está conectado a uma bomba centrífuga de múltiplos estágios que transmite energia para o fluido sob a forma de pressão, elevando-o para a superfície. O sistema BCS deve ser dimensionado de acordo com a produtividade do poço e instalado a uma profundidade em que a sucção da bomba fique sempre submersa.

Figura 2.3 Poço equipado por BCS



Fonte: Adaptada de MAITELLI, 2010

2.3 BOMBAS CENTRÍFUGAS

A bomba centrífuga é o equipamento mais utilizado para bombear líquidos na indústria, pois ela tem a função de elevar, pressurizar e transferir líquidos de um local para outro. A bomba recebe energia de um motor e transfere parte dessa energia (uma parcela é perdida em atritos internos) ao fluido sob a forma de energia cinética, onde aumenta a velocidade do fluido, e posteriormente essa energia é convertida em energia de pressão onde aumenta a pressão do fluido.

Para elevar o fluido do poço para a superfície é necessário que a bomba centrífuga forneça ao fluido uma grande quantidade de energia e para isso é preciso um número maior de impelidores rotativos. Na indústria petrolífera são utilizadas as

bombas centrífugas de múltiplos estágios que são bombas centrífugas que apresentam mais de um impelidor rotativo (rotor) onde os impelidores são dispostos em série, o que facilita um maior aproveitamento de energia e um maior desempenho, devido o *head* requerido pela aplicação. A figura 2.4 apresenta uma bomba centrífuga de múltiplos estágios utilizada no sistema BCS.

Figura 2.4 – Bomba centrífuga de múltiplos estágios



Fonte: MAITELLI, Notas de Aula

Essas bombas são compostas de vários estágios e cada estágio consiste de um impelidor rotativo (rotor) que é preso a um eixo e que gira a uma velocidade de 3.500 rotações por minuto onde o impelidor fornece energia ao fluido sob a forma de energia cinética, aumentando assim a velocidade do fluido e de um difusor estacionário (estator) que converte a energia cinética do líquido coletado do impelidor em pressão e encaminha o fluido bombeado para o próximo impelidor posicionando o fluido imediatamente acima. A quantidade de estágios determina a capacidade de elevação do fluido para superfície e a forma e o tamanho do impulsor e do difusor determina a vazão a ser bombeada. A figura 2.5 apresenta o impelidor e o difusor de um estágio.

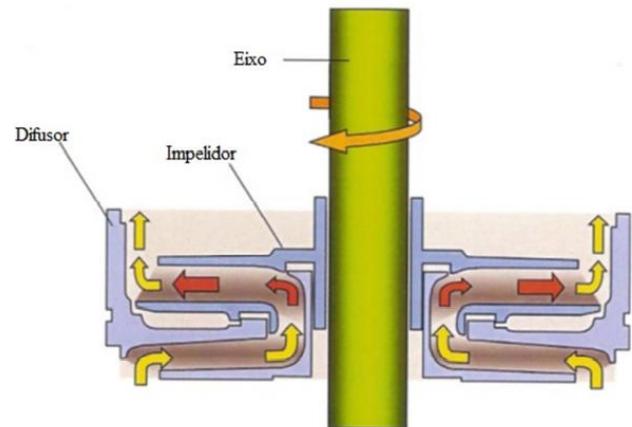
Para o fluido ser bombeado, ele entra na bomba através do impelidor, que gira em alta velocidade acelerando o fluido que escoar entre as pás através dos canais e penetra no difusor onde é direcionado para a descarga do estágio (Figura 2.6). Na saída do estágio ou na descarga, a pressão do fluido bombeado deverá ser maior que a da entrada no impelidor. A operação em cada estágio incrementa a

pressão do escoamento e sendo a descarga de um estágio a entrada do próximo acima, o processo se repete sucessivamente com o fluido bombeado.

Figura 2.5 – Impelidor e Difusor de um estágio. Figura 2.6 – funcionamento de um estágio de bomba.



Fonte: (MAITELLI, Notas de Aula)



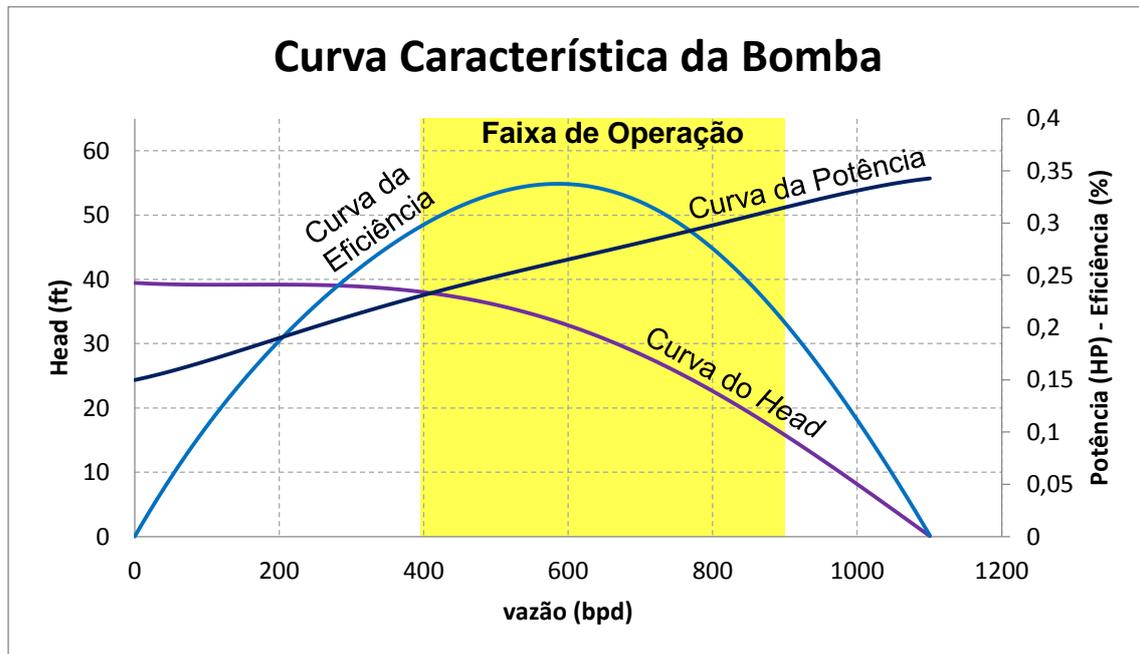
Fonte: Centrilift

2.3.1 Curvas Características das Bombas

As curvas características são gráficos cedidos pelos fabricantes baseados em experimentos realizados em laboratório e são uma forma de representar o comportamento e o desempenho da bomba quando é operada com água numa rotação fixa de 3500 rpm. As curvas são em termos de capacidade de elevação (*Head*), eficiência e potência onde todos esses termos estão relacionados à vazão.

As curvas características consideram apenas um estágio da bomba. A bomba deve operar somente no intervalo de vazão recomendado pelo fabricante, para manter um equilíbrio de forças nos impelidores e evitar desgaste prematuro da bomba. A Figura 2.7 representa uma curva característica de uma bomba onde a faixa amarela corresponde ao intervalo recomendado pelo fabricante.

Figura 2.7 – Curva Característica de uma Bomba



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Mattos (2008), o *head* é a energia por unidade massa que a bomba tem condições de fornecer ao fluido para uma determinada vazão. A esta característica dá-se o nome de altura manométrica do sistema e seu comportamento é uma função da altura estática de elevação do fluido, da diferença de pressões entre a sucção e a descarga da bomba e de possíveis perdas do sistema.

A curva de potência fornecida pelo fabricante se refere à potência absorvida pela bomba – BHP (*brake horse-power*) que é a potência requerida pelo acionador. No entanto, apenas parte desta potência é cedida ao fluido. A potência cedida ao fluido (P_c) pode ser calculada de forma genérica pela equação 2.3.

$$P_c = \gamma qH \quad (2.3)$$

Em que γ é o peso específico do fluido, q é a vazão volumétrica através da bomba e H é o *head*.

A eficiência da bomba (η) é a relação entre a energia cedida ao fluido e a energia absorvida pela bomba. Assim, podemos escrever:

$$\eta = \frac{\gamma qH}{BHP} \quad (2.4)$$

2.3.1.1 Leis de Afinidade

As bombas centrífugas normalmente operam com velocidade constante de 3500 rpm (60Hz), realizando-se correções quando se opera com diferentes frequências pois quando a velocidade é modificada, as curvas características também são modificadas. Essas correções são feitas pelas Leis de afinidade que são expressões matemáticas que definem mudanças na vazão, na capacidade de elevação e na potência quando ocorre mudança na velocidade da bomba.

De acordo com leis de Afinidade (STEPANOFF, 1957), a vazão(q) varia na proporção direta à variação da velocidade, o *head* (H) é proporcional ao quadrado da variação da velocidade e a potência (BHP) é proporcional ao cubo da variação da velocidade, conforme as equações 2.5, 2.6 e 2.7. Como se varia somente a velocidade a eficiência é mantida constante.

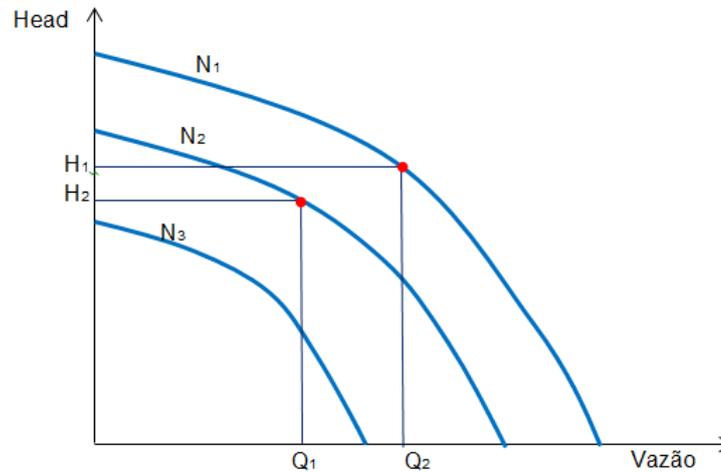
$$q_2 = q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2.5)$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \quad (2.7)$$

Onde o índice 1 dos termos representa o termo atual, o índice 2 representa o novo termo e N é a velocidade de rotação da bomba. A figura 2.8 apresenta a curva da bomba corrigida, após a mudança da velocidade de rotação da bomba.

Figura 2.8 – Variação do *head* e da vazão com a rotação



Fonte: Elaborado pelo autor

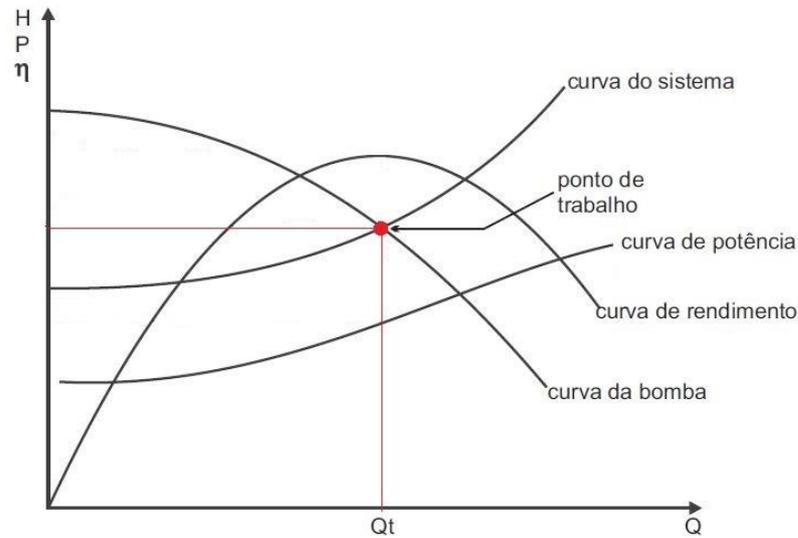
2.3.1.2 Desempenho da Bomba no Sistema

De acordo com Matos et al. (1998) a curva *head* x vazão nos diz claramente a energia por unidade de peso que a bomba é capaz de fornecer ao fluido em função da vazão. Para se determinar o ponto de trabalho é necessário determinar qual a energia por unidade de peso que o sistema solicitará da bomba em função da vazão bombeada onde a esta característica dá-se o nome de altura manométrica do sistema. Sendo assim, para uma dada vazão a bomba deve fornecer um *head* suficiente para compensar a altura manométrica. A equação 2.8 define a altura manométrica do sistema, onde se despreza a distância entre a sucção e a descarga em relação à profundidade do poço, onde P_d é a pressão na descarga e P_s é a pressão na sucção da bomba.

$$H_{req} = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (2.8)$$

O ponto de trabalho é o ponto de intersecção das curvas de *head* x vazão fornecida pelo fabricante da bomba para água e em condições da API RP 11S2 com a curva *head* x vazão requerida pelo sistema (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Determinação do Ponto de trabalho



Fonte: Adaptado de SILVA, 2003

O ponto de operação pode variar em função de fatores que afetem a curva do sistema ou a curva da bomba. Então de acordo com a equação 2.8 da altura manométrica qualquer fator que afete a pressão de descarga, a pressão de sucção ou o peso específico do fluido bombeado afetará a curva do sistema, alterando assim o ponto de operação.

Um fator que afeta o desempenho das bombas centrífugas usadas no BCS é o efeito da viscosidade, onde esse efeito causa:

- Aumento da potência absorvida pela bomba
- Redução no *Head*
- Redução na capacidade de bombeamento.

2.4 DETERMINAÇÃO DA ALTURA TOTAL DE ELEVAÇÃO (TDH)

Nos projetos de dimensionamento do sistema BCS é essencial que seja determinado a altura total de elevação do fluido (*Total Dynamic Head* – TDH), a fim de determinar o número necessário de estágios da bomba.

A altura total de elevação (TDH) é a soma dos seguintes componentes, todos expressos em unidade de comprimento:

- Distância vertical da cabeça do poço até o nível de fluido elevado pela bomba;
- *Head* necessário para superar o atrito na tubulação de superfície, válvulas e acessórios;
- *Head* necessário para superar as perdas na tubulação.

2.4.1 TDH para escoamento monofásico

No escoamento monofásico a determinação da altura total de elevação está representada na equação 2.9.

$$TDH = ND + \Delta P_{fric} + \frac{(P_{cab} - P_{rev})}{\gamma_{\text{agua}}^{Grad} \cdot \gamma_{liq}} \quad (2.9)$$

Onde:

ND é o nível dinâmico, ft;

ΔP_{fric} é a perda por fricção ao longo da coluna de produção, ft;

P_{cab} é a pressão na cabeça do poço, psi;

P_{rev} é a pressão no revestimento de produção, psi;

$\gamma_{\text{agua}}^{Grad}$ é o gradiente de pressão da água, psi/ft

γ_{liq} é a densidade relativa do líquido (adimensional).

A perda de carga devido à fricção (ΔP_{fric}) ao longo da coluna de produção é determinada a partir da correlação de *Hazen-Williams*, que considera apenas a vazão de produção, o diâmetro interno da coluna de produção e o coeficiente C que

determina o tipo de tubulação. Esse coeficiente C é tabelado onde é igual a 120 se a tubulação for nova e 94 se a tubulação for usada (TAKACS, 2010)

$$\Delta P_{fric} = \left[\frac{\left(\frac{0,000189 \cdot q_d}{ID_{col}^2} \right)}{1,32 \cdot C \cdot \left(\frac{ID_{col}}{48} \right)^{0,63}} \right]^{\frac{1}{0,54}} \cdot \left(\frac{L_{bomba}}{0,3048} \right) \quad (2.10)$$

Onde:

ΔP_{fric} é a perda por fricção ao longo da coluna de produção, ft;

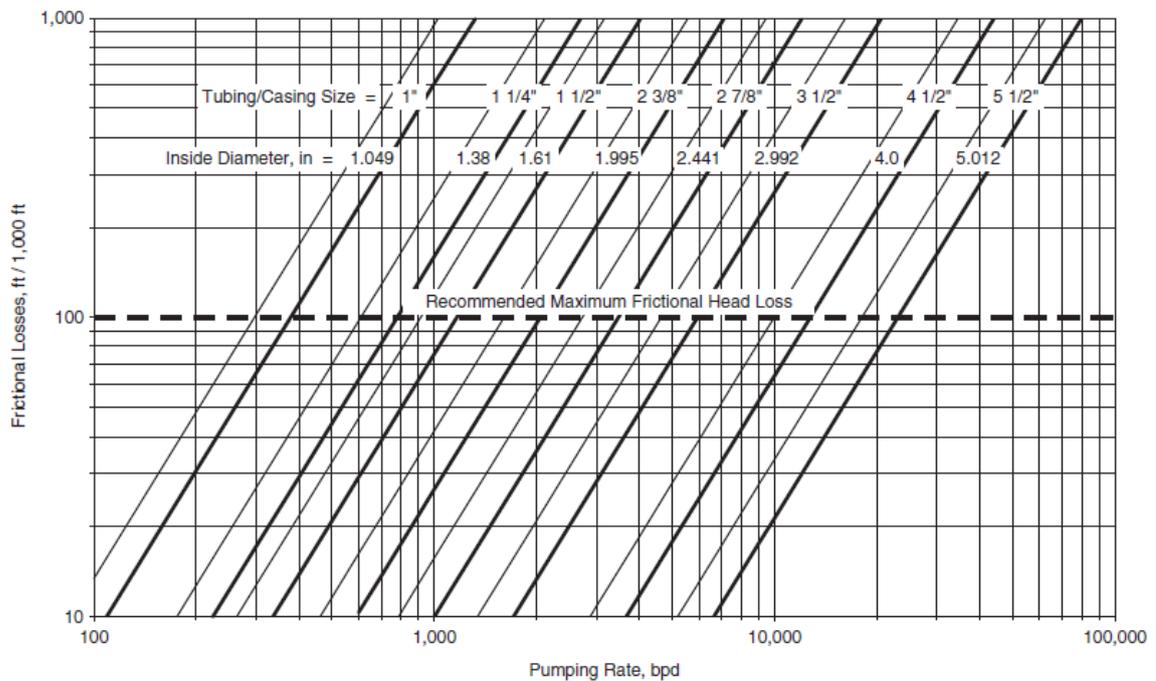
ID_{col} é o diâmetro interno da coluna de produção, in;

q_d é a vazão desejada de operação, bpd;

L_{bomba} é a profundidade vertical de assentamento da bomba centrífuga, ft.

A figura 2.10 mostra um gráfico que descreve a fórmula de Hazen – Williams, onde pode ser utilizado para estimar as perdas de carga de atrito a partir do diâmetro de revestimento e de tubulação. As linhas em negrito referem-se a tubulação nova, e as linhas normais para tubulações usadas.

Figura 2.10 - Perdas por fricção a cada 1000ft (Hazen-Williams)



Fonte: TAKÁCS, 2009

O nível dinâmico (ND) é definido como sendo a distância entre a superfície e o nível de líquido no espaço anular com a bomba em operação (Figura 2.11) e é representado pela equação 2.11.

$$ND = L_{canh} - \frac{P_{wfb}}{\gamma_{Grad} \cdot \gamma_{liq}} \quad (2.11)$$

Onde:

ND é o nível dinâmico, ft;

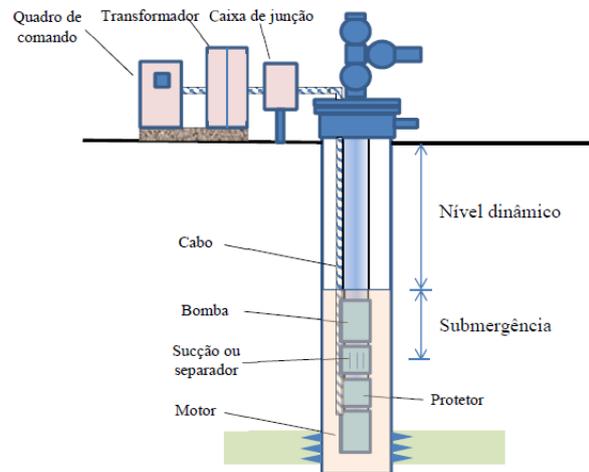
L_{canh} é a profundidade vertical dos canhoneados, ft;

P_{wfb} é a pressão de fluxo no fundo do poço, psi;

γ_{Grad} é o gradiente de pressão da água, psi/ft;

γ_{liq} é a densidade relativa do líquido (adimensional).

Figura 2.11 – Sistema BCS



Fonte: COSTA, 2012

De acordo com as equações 2.9, 2.10 e 2.11 a altura total de elevação pode ser obtida a partir da Equação 2.12 (TAKACS, 2008).

$$TDH = L_{canh} - \frac{P_{wfb}}{\gamma_{Grad} \cdot \gamma_{liq}} + \left[\frac{\left(\frac{0,000189 \cdot q_d}{ID_{col}^2} \right)^{\frac{1}{0,54}}}{1,32 \cdot C \cdot \left(\frac{ID_{col}}{48} \right)^{0,63}} \right] \cdot \frac{L_{bomba}}{0,3048} + \left(\frac{P_{cab} - P_{rev}}{\gamma_{Grad} \cdot \gamma_{liq}} \right) \quad (2.12)$$

2.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ESTÁGIOS DA BOMBA

O número de estágios da bomba está diretamente relacionado com a capacidade de elevação da bomba, então se deve calcular o número de estágios ideal para fornecer ao fluido o *head* necessário para elevá-los até a superfície. A quantidade de estágios é determinada através da equação 2.13, onde considera que o *head* desenvolvido pelos diferentes estágios é o mesmo.

$$n^{\circ}_{estágios} = \frac{TDH}{Head/Estágio} \quad (2.13)$$

2.6 MOTOR ELÉTRICO

Em BCS os motores elétricos são projetados para trabalhar em condições severas de pressão e temperatura, isto porque são imersos nos fluidos produzidos. Devido a isso, possuem um óleo especial de origem mineral para garantir o isolamento elétrico, resfriamento do motor e lubrificação dos mancais. A Figura 2.12 apresenta um motor elétrico utilizado no sistema BCS.

Figura 2.12 – Motor Elétrico usado em BCS



Fonte: MAITELLI, Notas de Aula

Os motores elétricos utilizados no BCS são de indução trifásicos, normalmente de dois polos, que funcionam com velocidade constante de aproximadamente 3500 rpm para frequência de 60 Hz. Os motores BCS podem operar com tensões entre 230 e 5000 Volts e correntes entre 12 e 200 Ampères.

De acordo com TAKACS (2008) o princípio de funcionamento do motor elétrico é a indução eletromagnética onde um campo magnético girante provoca a

rotação do rotor do motor. O campo magnético é gerado no estator por corrente alternada (CA) e a velocidade de rotação desse campo magnético é chamada de velocidade síncrona do motor, que depende da frequência da corrente alternada e do número de polos do estator, como mostra a equação 2.14:

$$N_{Síncrona} = \frac{120f}{p} \quad (2.14)$$

Onde: $N_{Síncrona}$ = Velocidade Síncrona do motor em rpm.

f = frequência (Hz) da rede de alimentação onde o motor está ligado.

p = Número de polos no estator

Alguns fatores como a carga aplicada no eixo do motor fazem com que a velocidade real no eixo do motor deixe de ser exatamente a velocidade do campo magnético girante. Isto é, a velocidade real no rotor do motor é sempre menor que a velocidade síncrona do motor. A diferença entre essas velocidades é chamada de velocidade de escorregamento do motor que em geral é expresso como um percentual da velocidade síncrona, conforme a equação 2.15:

$$Escorregamento = \frac{N_{Síncrona} - N}{N_{Síncrona}} \cdot 100 \quad (2.15)$$

Onde: $N_{Síncrona}$ = Velocidade Síncrona do motor em rpm.

N = Velocidade real do rotor no eixo em rpm.

Os motores elétricos funcionam com velocidade constante e quando se deseja variar suas velocidades, visando aumentar a flexibilidade do conjunto BCS ajustando o sistema às condições variáveis do poço, é recomendado a utilização de um variador de velocidade.

2.7 VARIADOR DE VELOCIDADE

A velocidade do motor é controlada pela alteração da frequência da alimentação elétrica. O variador de velocidade – VSD (*variable speed drives*) converte a frequência da rede elétrica para uma frequência desejada e dessa forma controla a velocidade do motor, proporcionalmente à frequência. A estratégia do

funcionamento do VSD é manter o torque constante até a frequência nominal, onde é atingida a tensão nominal do motor (Figura 2.13). A partir daí a tensão é mantida constante, variando-se apenas a frequência.

O torque desenvolvido pelo motor de indução segue a equação:

$$T = K_1 \cdot \Phi_m \cdot I_2 \quad (2.16)$$

Onde:

T é o torque, N.m;

K_1 é uma constante (adimensional) que depende do material usado;

Φ_m é o fluxo de magnetização, (Wb);

I_2 é a corrente rotórica, (A).

O fluxo magnetizante Φ_m é definido como:

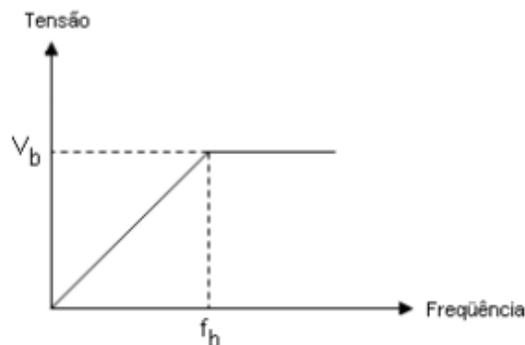
$$\Phi_m = K_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (2.17)$$

Onde: K_2 é uma constante que dependem do material e do projeto da maquina;

V_1 é a tensão V,

f_1 é a frequência, Hz

Figura 2.13 – Gráfico de Tensão x frequência no VSD



Fonte: Guia Técnico da WEG

O VSD trabalha convertendo a corrente de entrada alternada trifásica, cedida a 480 volts, em corrente contínua na fonte de alimentação após o VSD é instalado um painel (Figura 2.14) responsável pela adequada alimentação do motor elétrico do sistema BCS.

O VSD permite o ajuste do desempenho da bomba via controle da velocidade do motor, o que pode contribuir para a redução da temperatura do motor, melhorar a capacidade do manuseio de gás, além de ajustar a vazão da bomba à vazão do reservatório (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2008).

A aplicação das Leis de Afinidade vista na sessão 2.3 está relacionada ao VSD devido à necessidade de variação da frequência de operação do motor.

Figura 2.14 – VSD instalado em Painel



Fonte: CENTRILIFT

3 METODOLOGIA

Este capítulo se inicia com a fundamentação teórica para controlar a vazão de uma bomba e em seguida é descrito o estudo de caso do controle de vazão utilizando o choke e o VSD.

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO SISTEMA ESTUDADO

Para controlar o escoamento através de uma bomba centrífuga em aplicações industriais usa-se um controlador de vazão nesse sistema, de modo a ser possível variar o ponto de operação da bomba, o que pode ser feito de três maneiras principais:

- (a) Atuando na curva do sistema, através de uma válvula.
- (b) Atuando na curva da bomba, através de um variador de velocidade.
- (c) Recirculando parte da vazão de volta para a sucção

De acordo com CAMPOS (2012), o controle da vazão por meio da recirculação de fluido é pouco usado devido não ser eficiente, esse método de controle de vazão desperdiça muita energia porque gasta energia para elevar a pressão do líquido, para depois desperdiçá-la recirculando o líquido para a sucção.

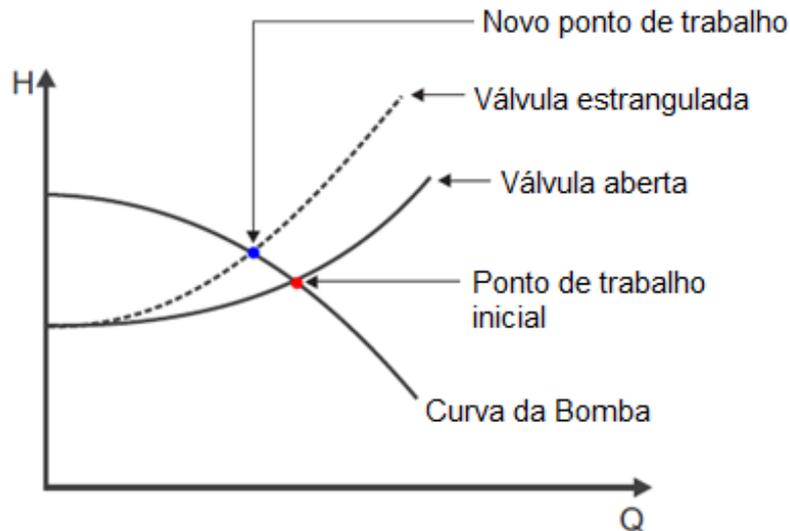
O método de recirculação de fluido é uma alternativa utilizada quando o motor é refrigerado devido a baixas vazões, ficando impossibilitado o uso do variador de velocidade e da válvula de controle.

3.1.1 Controle da vazão usando válvula de controle

O controle de vazão através do uso de válvulas de controle é uma prática comum em sistemas de bombeamento na maioria das indústrias. Esta aplicação possui fácil operacionalidade e possibilita um ajuste fino no controle da vazão. Entretanto, tem a desvantagem de gastar mais energia, pois o líquido é bombeado para uma pressão maior do que a necessária e em seguida ocorre uma queda de pressão e de perda de energia da válvula (CAMPOS, 2012).

A curva do sistema é modificada quando a válvula é estrangulada, isto é, quando ocorre o fechamento parcial da válvula onde aumenta-se a perda de carga, fazendo com que a curva do sistema seja deslocada para a esquerda. Desta forma, se atinge uma vazão menor e, por conseguinte, um novo ponto de operação da bomba. A Figura 3.1 ilustra o comportamento da curva diante de variações na abertura de válvulas de controle.

Figura 3.1 – controle da vazão com a válvula



Fonte: Adaptado de SILVA, 2003

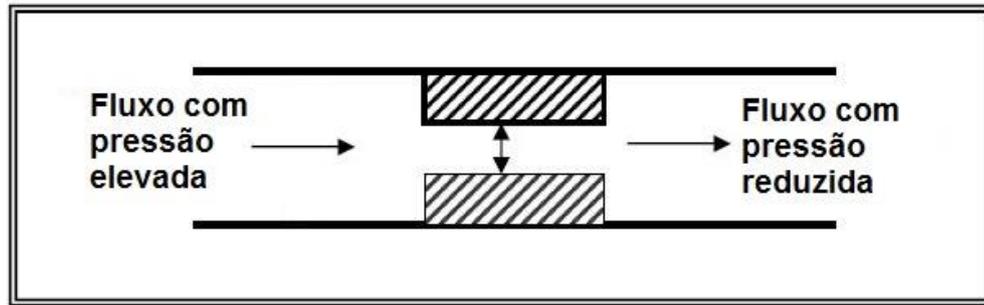
A válvula de controle tem uma baixa eficiência energética do sistema, uma vez que a bomba opera durante todo o tempo na rotação nominal. Na indústria petrolífera a válvula de controle de vazão utilizada é o choke.

3.1.1.1 Choke

O choke é uma válvula de controle de fluxo que fica localizada na cabeça do poço. Quando o fluido produzido alcança a cabeça do poço com um elevado valor de pressão em função das características do reservatório ou do método de elevação artificial utiliza-se o choke para quebrar a pressão do escoamento e permitir o controle da vazão do poço.

O princípio de funcionamento das válvulas choke consiste em estrangular o escoamento, provocando uma forte turbulência onde essa turbulência é gerada por um orifício regulador variável, de tal modo que haja uma perda de carga do escoamento do fluido produzido durante a passagem pelo seu interior (Figura 3.2). A turbulência gerada com o estrangulamento do escoamento resulta em uma redução na pressão e conseqüentemente no controle da vazão do fluido (MORAES et al.).

Figura 3.2 – Esquema do choke



Fonte: Adaptado de GUITERAS, 2003.

Os *chokes* (figura 3.3) normalmente fazem parte do conjunto da árvore de surgência, ou seja, fica localizado entre a coluna de produção e a linha de descarga. A principal aplicação do choke é na restrição de fluxo em aplicações de alta pressão.

Figura 3.3 – Choke

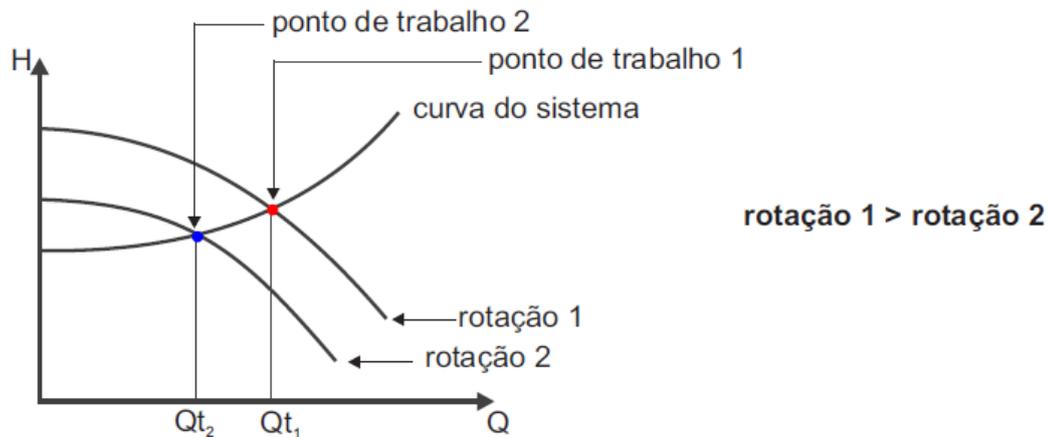


Fonte: Web Nordeste LTDA

3.1.2 Controle de vazão por variação da velocidade na bomba

A velocidade da bomba centrífuga é controlada pela variação da velocidade de rotação do motor através do uso do VSD. Sendo que quando a rotação do motor varia muda também o *head*, a vazão e a potência da bomba como foi visto nas leis de afinidade e conseqüentemente muda a curva da bomba, e dessa maneira consegue controlar a vazão para uma determinada curva do sistema.

Figura 3.4 – Controle de vazão com VSD



Fonte: Adaptado de Silva, 2003.

Na figura 3.4, onde Qt_1 e Qt_2 representam respectivamente a vazão inicial de operação e a nova vazão de operação, mostra que quando varia a rotação da bomba a curva da bomba é corrigida pelas leis de afinidade formando uma nova curva e conseqüentemente um novo ponto de trabalho da bomba e quanto menor a rotação da bomba menor será a nova vazão.

As principais vantagens do uso do VSD no controle da vazão são: não desperdiça a energia, se comparada com as outras maneiras de controlar o escoamento em bombas centrífugas; de ter a partida suave do motor elétrico, evitando danos aos mancais, e, portanto minimizando os problemas de manutenção nas bombas e nos motores aumentando assim sua vida útil; de ter um controle automático; e de reduzir a temperatura do motor e ser menos susceptível às instabilidades na geração de energia. E a principal desvantagem do uso do VSD para controle de vazão é o custo do equipamento. No entanto é um equipamento que economiza energia elétrica.

Na literatura, existem exemplos de redução entre 10% e 50% no consumo de energia elétrica através do uso de variadores de velocidade (CAMPOS, 2012).

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

A análise proposta neste trabalho de conclusão é fazer a comparação do estudo de caso da eficiência energética do controle de vazão no sistema BCS

utilizando um variador de velocidade (VSD) e fazendo a restrição de escoamento na superfície usando o choke.

As análises foram baseadas a partir de gráficos *head* x vazão e gráficos BHP x vazão, onde foram comparados os pontos de trabalho dos casos estudados. Os gráficos foram feitos em uma planilha eletrônica do programa *Microsoft Office*.

Para análise foram utilizados dados reais de poços típicos, cujo escoamento é monofásico. Nos dados da tabela 3.1, estão representados os dados de entrada, que foram utilizados para determinar a altura total de elevação (TDH) no sistema BCS, e a partir dele determinar o número de estágios necessários para a bomba conseguir elevar o fluido até a superfície.

Tabela 3.1 – Dados de entrada utilizado no projeto

DADOS DE ENTRADA	
Vazão	600 Bpd
BSW	95 %
Razão Gás-Óleo (RGO)	1 m ³ /m ³
Grau API	34
Densidade Relativa do Gás	0,65
Densidade Relativa da Água	1,035
Diâmetro da Tubulação	2,441 In
Frequência da Bomba	60 Hz
Profundidade dos canhoneados	7877,681 Ft
Profundidade da Bomba	7359,283 Ft
Pressão Estática	2730,874 Psi
Pressão de Teste	142,233 Psi
Vazão de Teste	628,981 Bpd
Pressão na Cabeça (WHP)	711,165 Psi
Pressão no Revestimento (CHP)	85,3398 Psi

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir dos dados da tabela 3.1 foram encontrados os dados de saída (tabela 3.2), utilizados para determinar o TDH.

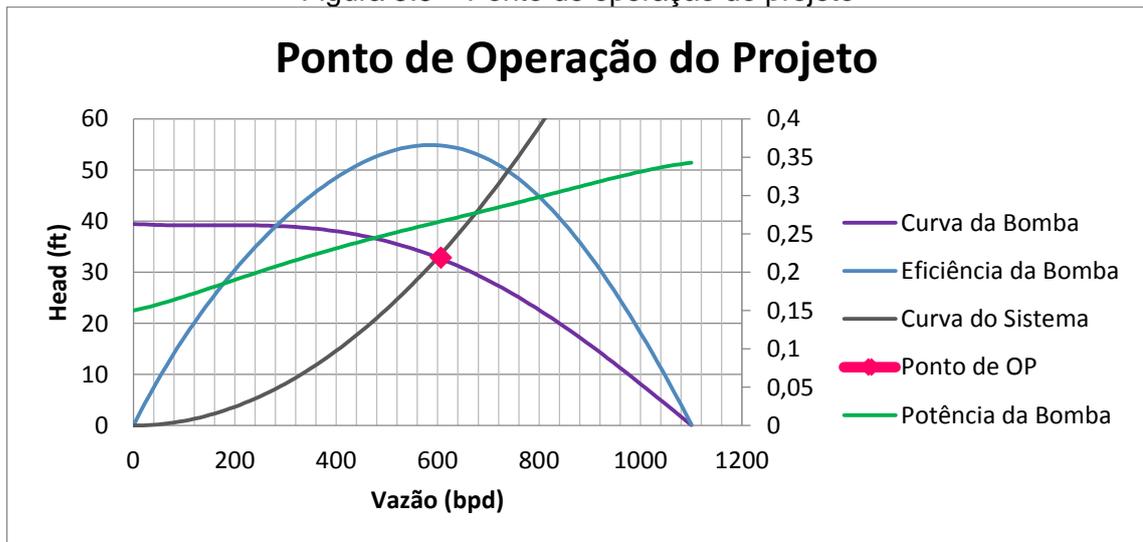
Tabela 3.2 – Dados de saída utilizado no projeto

DADOS DE SAÍDA		
ND	7353,461	Ft
Friccao - Hazen-Williams	32,59868	Ft
TDH	8791,614	Ft

Fonte: Elaborado pelo Autor

O ponto de operação do projeto foi definido de acordo com a interseção das curvas de *head* x vazão fornecida pelo fabricante da bomba escolhida com a curva *head* x vazão requerida pelo sistema (figura 3.5), onde a vazão de operação do projeto é de 600 bpd. Os dados utilizados para fazer a construção das curvas encontram-se em anexo.

Figura 3.5 – Ponto de operação do projeto



Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com o fabricante da bomba o *head* para a vazão desejada é de 32,0523 ft/estágio, então o *Head/Estágio* é 32,0523 ft/estágio.

Para determinar o número de estágios necessário para a bomba, utiliza-se a equação 2.13, onde é obtida a quantidade de 270 estágios para esse projeto.

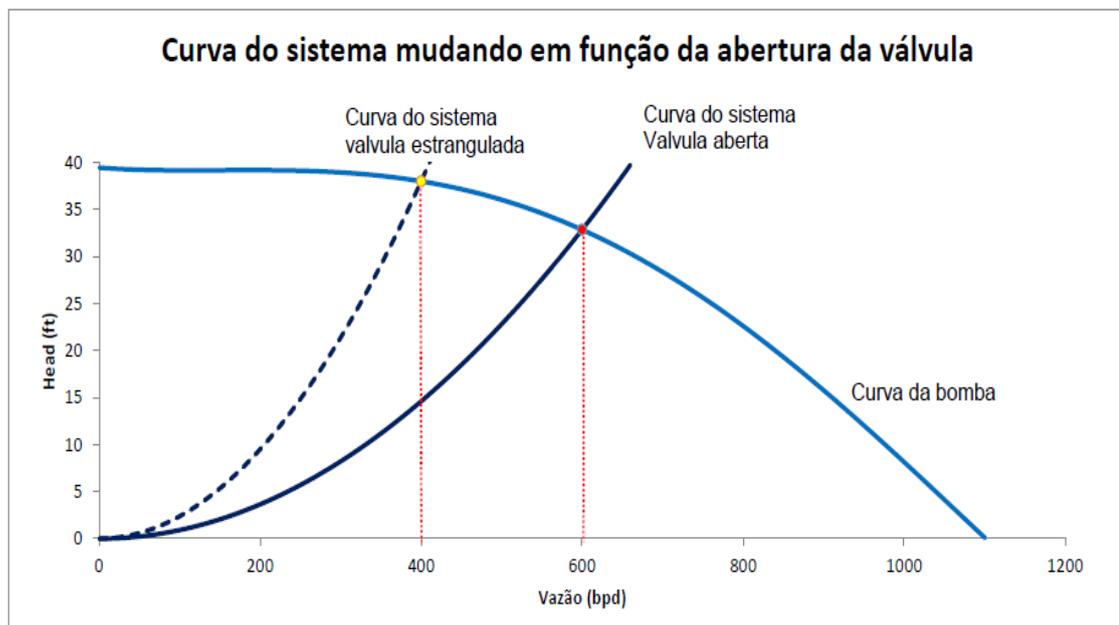
No projeto foi requerido um controle de vazão, onde a vazão precisou ser reduzida para uma vazão de 400 bpd, e conseqüentemente mudando o ponto de operação do projeto.

3.2.1 Estudo de caso 1: Controle de vazão utilizando o choke

A restrição imposta ao fluido foi de uma vazão de 400 bpd, onde foi utilizada a válvula choke para reduzir a vazão de fluxo. A figura 3.6 apresenta um gráfico para um estágio da bomba que exibe a curva da bomba utilizada com rotação de 60 Hz, a curva do sistema com a válvula totalmente aberta no ponto de operação inicial do projeto e a curva do sistema com a válvula estrangulada (choke estrangulado). Observa-se no gráfico que quando o escoamento é estrangulado pelo choke a curva do sistema é ajustada para um novo ponto de operação para a vazão é desejada.

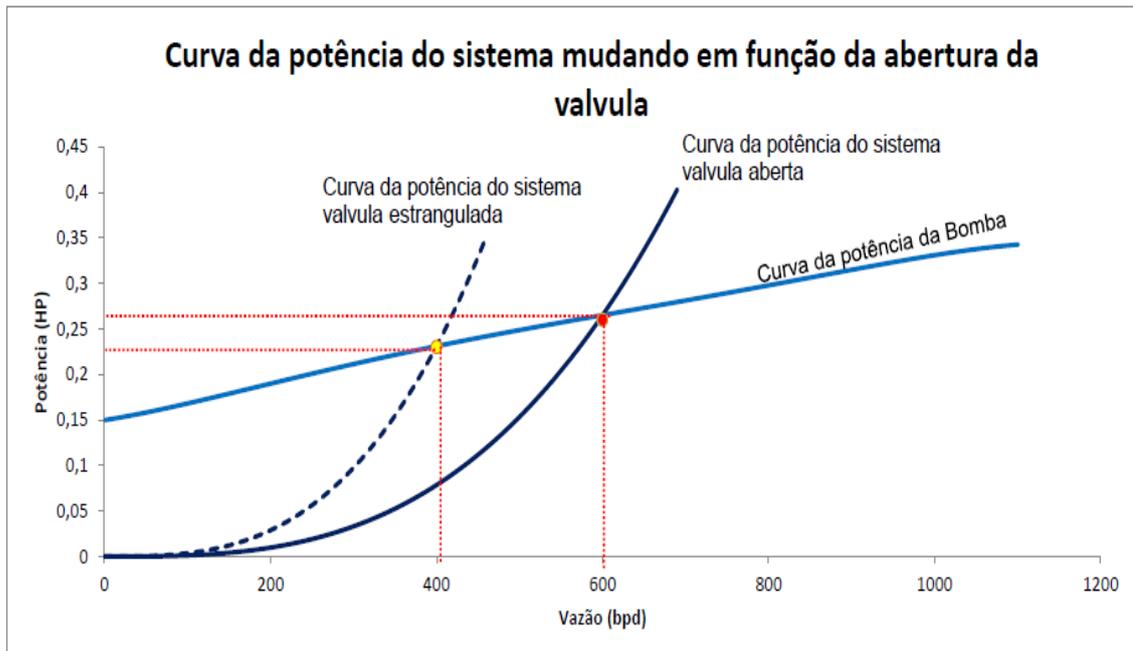
Quando a válvula é estrangulada a curva da potência do sistema também é modificada (Figura 3.7). Observa-se que quanto menor a vazão desejada, menor será a potência consumida no sistema.

Figura 3.6 – Curva do sistema mudando em função do estrangulamento do choke.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 3.7 – Curva da potência do sistema mudando em função do estrangulamento do choke.



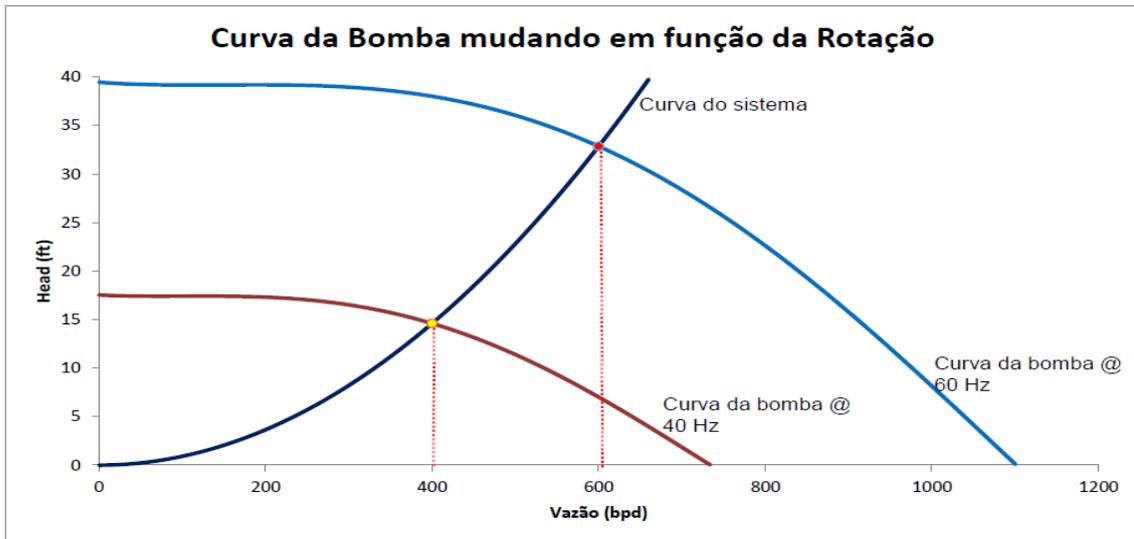
Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.2 Estudo de caso 2: Controle de vazão utilizando o VSD

Para controlar a vazão desejada de 400 bpd, é preciso alterar o ponto de operação do sistema, onde foi utilizado um variador de velocidade (VSD) que varia a curva da bomba de acordo com a rotação da bomba. Para a vazão desejada de operação foi necessário operar a bomba com uma nova velocidade de rotação na qual foi obtida através das leis de afinidades (Equação 2.5, 2.6 e 2.7), onde a bomba opera com uma nova de velocidade de rotação de 40 Hz.

A figura 3.8 apresenta a comparação das curvas da bomba quando se usa o variador de velocidade, as curvas apresentadas são: a da bomba operando com velocidade de rotação de 60 Hz onde o ponto de trabalho atual é para uma vazão de 600 bpd e a curva da bomba operando com velocidade de rotação de 40 Hz onde o novo ponto de trabalho é para uma vazão de 400 bpd.

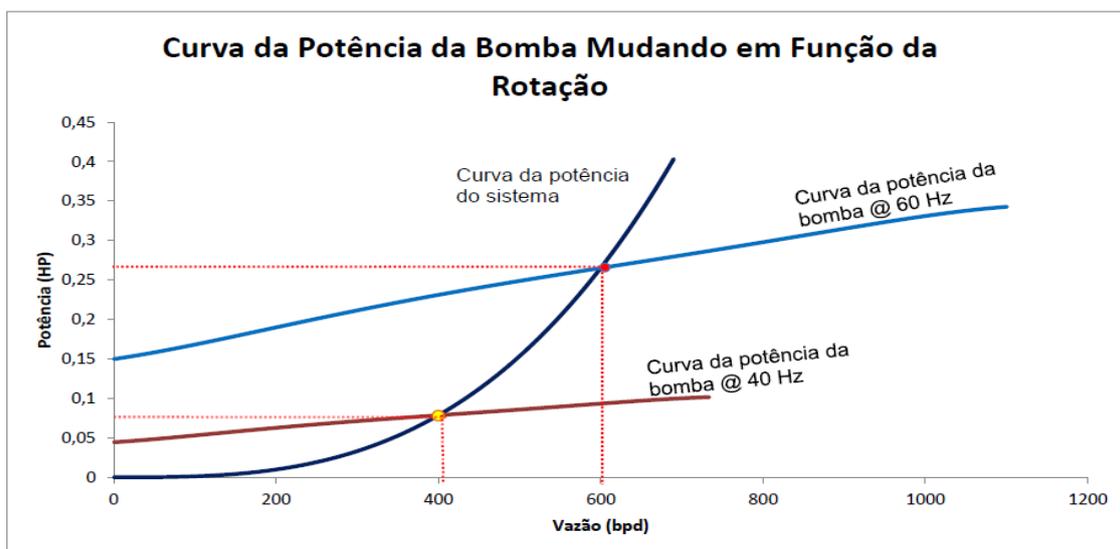
Figura 3.8 – Curva da mudando em função da rotação de velocidade da bomba



Fonte: Elaborado pelo Autor

A figura 3.9 apresenta um gráfico comparativo das curvas das potências consumidas quando a bomba opera com velocidade de rotação de 60 Hz onde o ponto de trabalho atual é para a vazão de 600 bpd e quando a bomba opera com velocidade de rotação de 40 Hz onde o novo ponto de trabalho é para a vazão de 400 bpd.

Figura 3.9 – Curva da potência da bomba mudando com o uso do VSD



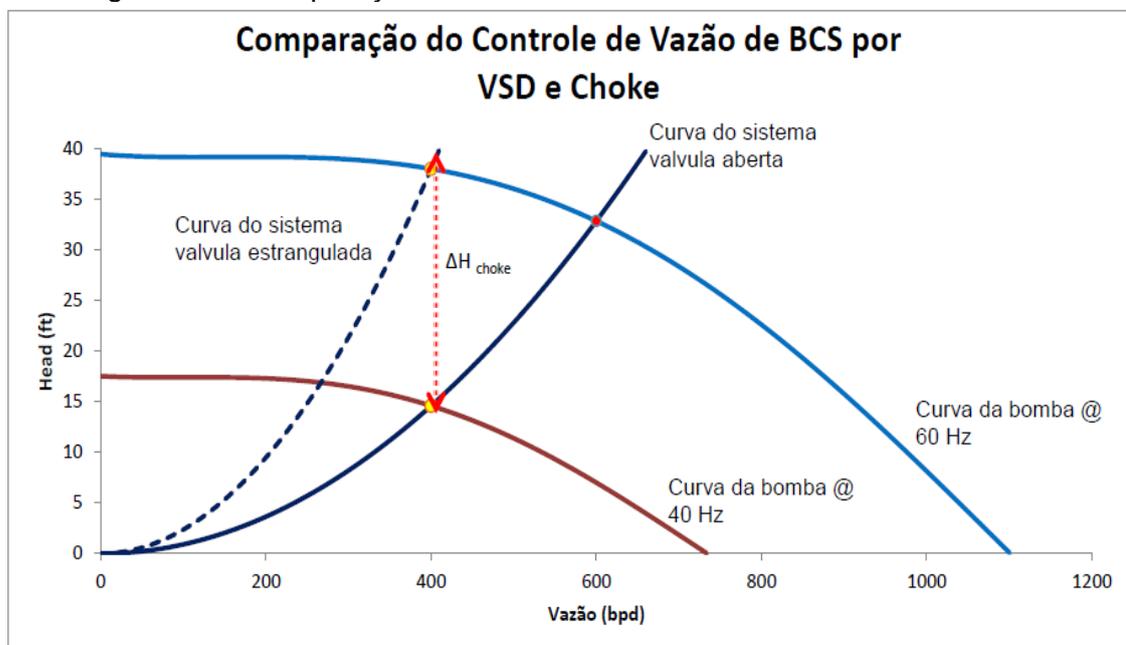
Fonte: Elaborado pelo Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a análise feita nos estudos de caso na sessão 3.2.1 e 3.2.2 foi feita uma comparação do controle de vazão utilizando o VSD e o uso do choke.

A Figura 4.1 apresenta a comparação do controle de vazão utilizando o choke e o VSD, nota-se que a partir da mudança da curva do sistema e da curva da bomba foram definidos novos pontos de operação para a vazão desejada. A perda do *head*/estágio através do choke é observada no gráfico, onde essa perda é indicada pelo ΔH_{choke} .

Figura 4.1 – Comparação do controle de vazão utilizando o choke e o VSD



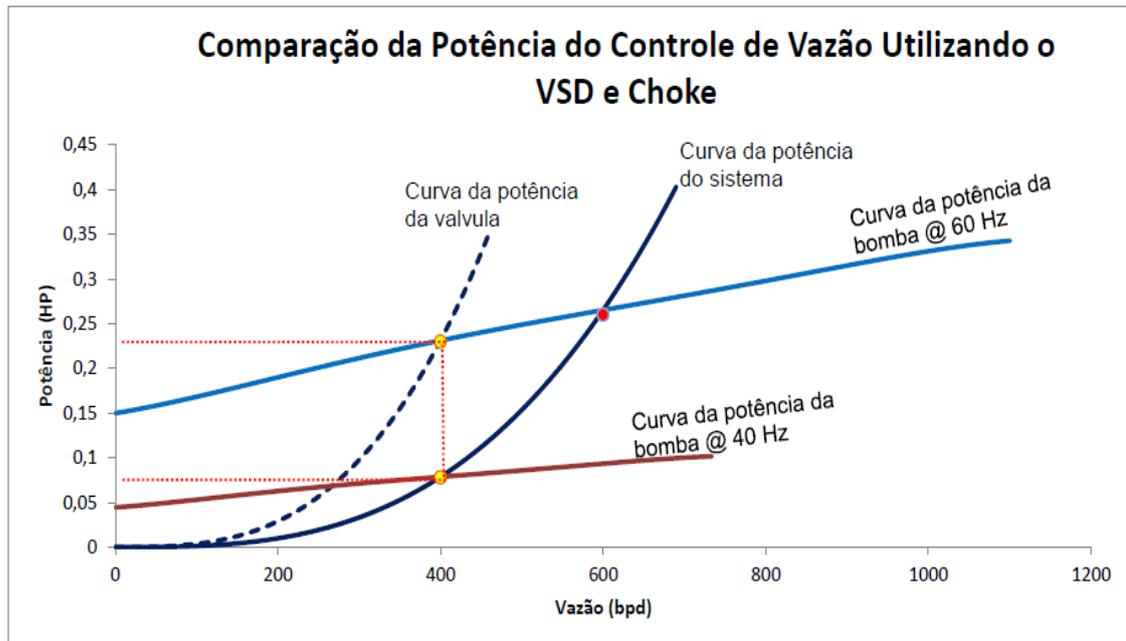
Fonte: Elaborado pelo Autor

Foi analisada no projeto a eficiência energética do controle de vazão utilizando o choke e o VSD, onde foi comprovada através de modelagem que no controle de vazão utilizando o VSD a potência consumida pela bomba é menor do que quando se utiliza o choke (Figura 4.2).

O gráfico da Figura 4.2 apresenta a potência consumida pela bomba para um único estágio tanto com uso do VSD como com choke. Como no projeto foi utilizado 270 estágios na bomba, então a potência total consumida pela bomba é:

$$Pot_{Total} = BHP/estágio \cdot n^{\circ} \text{estágios} \quad (4.1)$$

Figura 4.2 – Comparação da potência consumida pela bomba, utilizando o choke e o VSD



Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com os dados obtidos na figura 4.2, foi elaborada uma tabela da potência para a vazão de 400 bpd, onde é fornecida a potência consumida pela bomba para a vazão desejada utilizando o controle de vazão por *choke* e por VSD.

Tabela 4.1 – Potência consumida no controle da vazão

Potência do controle de Vazão para Q= 400 bpd				
Potência	BHP/ estágio	Nº de Estágios	Potência Total (HP)	Potência Total (Watts)
Choke	0,23 HP	270	62,1	46.307,97
VSD	0,078 HP	270	21,06	15.704,442
Potência Economizada			41,04	30.603,528

Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com a Tabela 4.1, no controle de vazão com o uso do *choke* a potência consumida pela bomba é maior do que quando utiliza o VSD. Quando se utiliza o VSD em vez do *choke* a potência economizada no sistema é de 41,04 HP, ou seja, de 30.603,528 Watts. Isto quer dizer que se for utilizado o VSD em vez do *choke* a economia do consumo da bomba é de aproximadamente 66%.

O resultado da análise é satisfatório, pois é perceptível a grande vantagem de fazer o controle de vazão com o uso do VSD em vez do uso do choke, pois além do VSD permitir ao operador melhorar o desempenho do sistema através da variação da velocidade, este equipamento também consome pouca energia e também reduz o desgaste na partida do motor.

4.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Como foi visto é mais vantajoso utilizar o VSD em vez do *choke*, devido a isso será feita uma análise econômica do equipamento para verificar se ele é viável economicamente. Para essa análise foram considerados os seguintes fatores:

- a) O investimento da compra do VSD montado no painel é de R\$ 75.000,00 (valor informado pelo representante da WEG);
- b) Foi considerada a moeda Real;
- c) A taxa mínima de atratividade (TMA) considerada neste estudo é de 5% a.m;
- d) Foi considerada a seguinte tarifa de energia elétrica: 1 kWh = R\$ 0,4983;
- e) Tempo de funcionamento do VSD para a análise: 12 meses;
- f) Não foi considerada a manutenção dos equipamentos;
- f) Os dados apresentados nesse documento devem ser tratados apenas como estimativas para fins orçamentários.

4.1.1 Custo do consumo de energia elétrica utilizada no controle de vazão

A tabela 4.2 está apresentando o consumo de energia e o custo mensal para o controle de vazão utilizando o choke e o VSD, onde apenas está sendo medida a potência da bomba no sistema BCS.

O consumo de energia elétrica ($E_{consumida}$) é expresso pela equação 4.2, onde a potência é em Kilowatt (KW) e o tempo em hora (h).

$$E_{consumida} = Pot_{Total} \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

O custo de energia elétrica é definido pela equação 4.3:

$$Custo = Tarifa \cdot E_{consumida} \quad (4.3)$$

Tabela 4.2 – Consumo e custo mensal de energia elétrica utilizada pela bomba

Tipo de Controle	Consumo de Energia Elétrica Mensal	Custo da Energia Elétrica Mensal
Choke	33.341,74 KWh	R\$ 16.614,19
VSD	11.307,2 KWh	R\$ 5.634,377
Economia do sistema BCS	22.034,54 KWh	R\$ 10.979,81

Fonte: Elaborado pelo Autor

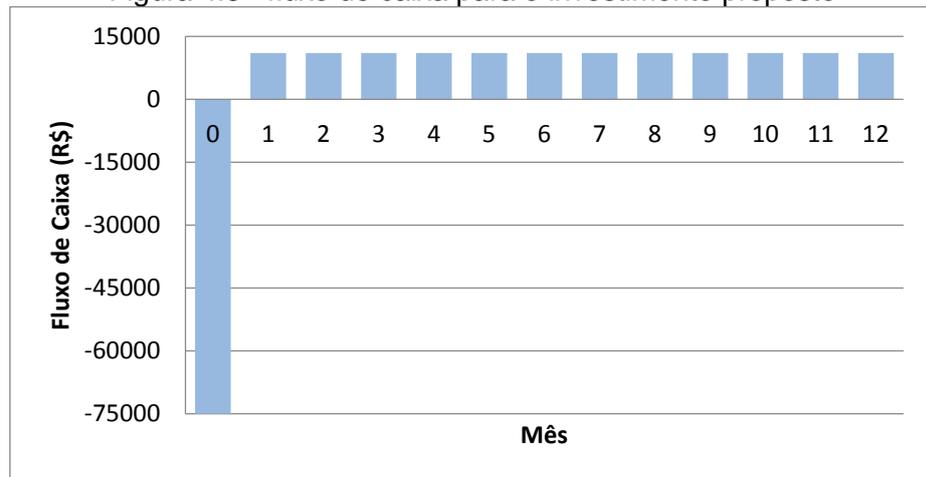
De acordo com a tabela 4.2 é mais vantajoso fazer o controle de vazão utilizando o VSD, pois devido economizar mais energia ele se torna mais econômico financeiramente. Se em vez de utilizar o choke utilizar o VSD a economia mensal será de 10.979,81 R\$.

4.1.2 Análise do Retorno do Investimento

De acordo com a tabela 4.2 a economia mensal do sistema BCS utilizando VSD é de R\$ 10.979,81, mas para a sua aquisição é preciso investir R\$ 75.000,00 para a compra do instrumento.

A Figura 4.3 representa o fluxo de caixa para o investimento de R\$ 75.000,00 da compra do equipamento VSD, onde o retorno gerado mensalmente é de R\$ 10.979,81.

Figura 4.3 - fluxo de caixa para o investimento proposto



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.2.1 Prazo de Recuperação do Investimento

A partir do custo de investimento na compra do equipamento VSD e dos retornos gerados mensalmente pela economia de energia, foi realizado um estudo de viabilidade econômica do projeto onde foi calculado o prazo de recuperação do investimento, esse prazo de recuperação foi calculado utilizando o método do *Payback*.

Utilizando os dados do fluxo de caixa da figura 4.3, onde o investimento inicial é 75.000,00 R\$ e o valor economizado mensalmente de 10.979,81 R\$ durante 1 ano e considerando a taxa de atratividade igual a 5%, encontra-se que o prazo de recuperação do investimento do VSD é de 8,38 meses conforme a solução abaixo:

$$- 75.000 + 10.979,81 (P/U, 5\%, n') = 0 = \text{VPL}$$

$$(P/U, 5\%, n') = 75.000 / 10.979,81 = 6,830718$$

Pela tabela de fator de correção 5%, na coluna P/U, encontramos:

$$\text{Para } n' = 8 \Rightarrow P/U = 6,463213$$

$$\text{Para } n' = 9 \Rightarrow P/U = 7,107822$$

Logo, utilizando interpolação linear, temos:

$$8 \text{ ----- } 6,463213$$

$$x \text{ ----- } 6,830718$$

$$9 \text{ ----- } 7,107822$$

$$x = 8,57 \text{ meses}$$

Então, o prazo de recuperação da compra do VSD é de 9 meses a parti da economia de energia utilizando o equipamento de VSD.

5 CONCLUSÕES

Este estudo propôs analisar a eficiência energética do controle de vazão utilizando o variador de velocidade (VSD) e restringindo o fluxo à superfície com a válvula de controle choke. Para tal análise foi comparada a potência consumida pela bomba no controle da vazão por meio do estrangulamento do choke e por VSD, onde foi observado que com o uso do VSD o sistema BCS apresentou um significativo aumento de eficiência energética, ao reduzir as perdas decorrentes do estrangulamento pelo choke, isto é, o sistema economiza 66% de energia. Além da economia de energia, o uso do VSD proporciona outros ganhos tangíveis ao sistema como: o aumento na confiabilidade do sistema, de reduzir a temperatura do motor e de ter a partida suave do motor elétrico, evitando danos aos mancais, e, portanto minimizando os problemas de manutenção nas bombas e nos motores aumentando assim sua vida útil.

Foi realizado, ainda, um estudo de viabilidade econômica (EVE) do investimento proposto para saber qual seria o tempo de retorno do investimento, onde foi observado que o tempo de retorno é de 9 meses utilizando o retorno mensal gerado pelo uso do VSD.

Conclui-se então que além do uso do VSD no controle da vazão ter uma alta eficiência energética ele também é viável economicamente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. RP 11S2 - **Recommended Practice for Electric Submersible Pump Testing** . Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 1997.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITCKE, Bruno Hartmut. **Análise de investimentos – Fatores de Conversão**: matemática financeira; engenharia econômica; tomada de decisão; estratégia empresarial. 11.ed. São Paulo: Atlas, 2010. 41 f.

CAMPOS, M.; Teixeira, H. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

COSTA, Rutácio de Oliveira. **Controle Aplicado a Poços com Método de Elevação Bombeio Centrífugo Submerso**. 160f. 2012. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

GUIERAS, Oscar Hernán Jalil. **Metodologia de Análise Global para o Desenvolvimento de um Campo de Gás Natural**. 285f. 2003, Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Técnico Científico da PUC-Rio, 2003.

MADDARENA, Eduardo. **Aplicação de tecnologias de eficiência energética: Aplicação de Inversores de Frequência em sistemas de Bombeamento**. São Paulo, SP: Siemens, 2010.

MAITELLI, Carla Wilza Souza de Paula. **Normas e Práticas para Instalações de Bombeio Centrífugo Submerso**. Natal, RN, 2014. (Notas de Aula do DPET).

MAITELLI, Carla Wilza Souza de Paula. **Simulação do Escoamento Monofásico em um Estágio de uma Bomba Centrífuga Utilizando Técnicas de Fluidodinâmica Computacional**. 182f. 2010. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

MATTOS, Edson Ezequiel. **Bombas Industriais**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

MORAES, Carlos Alberto Capela et al. **Desenvolvimento de válvulas ciclônicas**. Rio de Janeiro. (Boletim técnico da Produção de Petróleo, v.4, n. 1, p. 9-38).

OLIVA, Gabriel Bessa de Freitas Fuezi. **Desenvolvimento de uma Ferramenta computacional para dimensionamento de Sistemas BCS**. 70f. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

SILVA, Marcos Antônio. **Seleção e aplicação de Bombas Centrifugas**. 5. ed. KSB Bombas Hidráulicas S/A, 2003. (Manual De Treinamento).

STEPANOFF, A. J. **Centrifugal and Axial Flow Pumps**: theory, design and application. New York, N.Y.: J. Wiley, 1957.

TAKÁCS, Gábor. **Electrical Submersible Pumps Manual**: design operations and maintenance. Oxford/UK: Elsevier, 2009.

TAKÁCS, Gábor. **Gas Lift Manual**. Tulsa, OK: PennWell Co, 2005.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro, Interciência, Petrobrás, 2001.

WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. São Paulo, SP, 2012. (Guia Técnico).

ANEXO

DADOS DA BOMBA		
	Head	BHP
A	0	-4,8E-16
B	5,08248E-11	1,32E-12
C	-1,24735E-07	-1,3E-09
D	4,91991E-05	4,69E-07
E	-0,00660032	0,000148
F	39,4583	0,149813
Q _{max}	1100,5742	

Vazão desejada	600bpd
----------------	--------

	Bomba operando com 60 Hz			Bomba operando com 40 Hz		
	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)
0	0	39,4583	0,149813	0	17,53702	0,044389037
1	11,005742	39,39145	0,1515	7,337161333	17,50731	0,044888911
2	22,011484	39,33554	0,153291	14,67432267	17,48246	0,045419495
3	33,017226	39,28958	0,155176	22,011484	17,46204	0,045977959
4	44,022968	39,25263	0,157145	29,34864533	17,44561	0,046561606
5	55,02871	39,22376	0,159192	36,68580667	17,43278	0,047167865
6	66,034452	39,20204	0,161306	44,022968	17,42313	0,047794296
7	77,040194	39,18657	0,16348	51,36012933	17,41625	0,04843858
8	88,045936	39,17648	0,165708	58,69729067	17,41177	0,049098522
9	99,051678	39,1709	0,167981	66,034452	17,40929	0,049772043
10	110,05742	39,16899	0,170293	73,37161333	17,40844	0,050457182
11	121,063162	39,16992	0,172638	80,70877467	17,40885	0,05115209
12	132,068904	39,17287	0,175011	88,045936	17,41016	0,051855027
13	143,074646	39,17706	0,177405	95,38309733	17,41203	0,052564365
14	154,080388	39,18171	0,179815	102,7202587	17,41409	0,053278575
15	165,08613	39,18607	0,182237	110,05742	17,41603	0,053996235
16	176,091872	39,1894	0,184667	117,3945813	17,41751	0,054716021
17	187,097614	39,19097	0,187099	124,7317427	17,41821	0,055436705
18	198,103356	39,19009	0,18953	132,068904	17,41782	0,056157154
19	209,109098	39,18607	0,191958	139,4060653	17,41603	0,056876325
20	220,11484	39,17824	0,194377	146,7432267	17,41255	0,057593264
21	231,120582	39,16596	0,196786	154,080388	17,4071	0,058307104
22	242,126324	39,1486	0,199183	161,4175493	17,39938	0,059017059
23	253,132066	39,12554	0,201563	168,7547107	17,38913	0,059722426
24	264,137808	39,09618	0,203926	176,091872	17,37608	0,060422577
25	275,14355	39,05995	0,20627	183,4290333	17,35998	0,06111696
26	286,149292	39,01629	0,208592	190,7661947	17,34057	0,061805095
27	297,155034	38,96467	0,210892	198,103356	17,31763	0,062486572
28	308,160776	38,90454	0,213169	205,4405173	17,29091	0,063161046
29	319,166518	38,83542	0,21542	212,7776787	17,26019	0,063828239

30	330,17226	38,75681	0,217647	220,11484	17,22525	0,06448793
31	341,178002	38,66824	0,219847	227,4520013	17,18589	0,065139959
32	352,183744	38,56927	0,222022	234,7891627	17,1419	0,065784223
33	363,189486	38,45945	0,22417	242,126324	17,09309	0,066420669
34	374,195228	38,33837	0,226291	249,4634853	17,03927	0,067049297
35	385,20097	38,20563	0,228387	256,8006467	16,98028	0,067670152
36	396,206712	38,06086	0,230456	264,137808	16,91594	0,068283325
37	407,212454	37,90368	0,2325	271,4749693	16,84608	0,06888895
38	418,218196	37,73376	0,234519	278,8121307	16,77056	0,069487198
39	429,223938	37,55077	0,236514	286,149292	16,68923	0,07007828
40	440,22968	37,3544	0,238486	293,4864533	16,60196	0,070662437
41	451,235422	37,14436	0,240435	300,8236147	16,50861	0,071239945
42	462,241164	36,92038	0,242362	308,160776	16,40906	0,071811105
43	473,246906	36,6822	0,24427	315,4979373	16,3032	0,072376245
44	484,252648	36,42958	0,246158	322,8350987	16,19092	0,072935717
45	495,25839	36,16231	0,248028	330,17226	16,07214	0,073489892
46	506,264132	35,88018	0,249882	337,5094213	15,94675	0,074039158
47	517,269874	35,58301	0,251721	344,8465827	15,81467	0,07458392
48	528,275616	35,27064	0,253545	352,183744	15,67584	0,075124591
49	539,281358	34,94291	0,255358	359,5209053	15,53018	0,075661599
50	550,2871	34,5997	0,257159	366,8580667	15,37765	0,076195372
51	561,292842	34,2409	0,258951	374,195228	15,21818	0,076726348
52	572,298584	33,86641	0,260735	381,5323893	15,05174	0,077254961
53	583,304326	33,47615	0,262513	388,8695507	14,87829	0,077781647
54	594,310068	33,07008	0,264286	396,206712	14,69781	0,078306835
55	605,31581	32,64814	0,266054	403,5438733	14,51028	0,078830949
56	616,321552	32,21031	0,267821	410,8810347	14,31569	0,079354402
57	627,327294	31,7566	0,269587	418,218196	14,11404	0,079877594
58	638,333036	31,28701	0,271353	425,5553573	13,90534	0,08040091
59	649,338778	30,80158	0,273121	432,8925187	13,68959	0,080924719
60	660,34452	30,30035	0,274892	440,22968	13,46682	0,081449365
61	671,350262	29,78339	0,276666	447,5668413	13,23706	0,081975173
62	682,356004	29,25079	0,278446	454,9040027	13,00035	0,082502438
63	693,361746	28,70265	0,280231	462,241164	12,75673	0,083031429
64	704,367488	28,13909	0,282023	469,5783253	12,50626	0,083562381
65	715,37323	27,56024	0,283822	476,9154867	12,249	0,084095496
66	726,378972	26,96628	0,285629	484,252648	11,98501	0,084630938
67	737,384714	26,35737	0,287445	491,5898093	11,71438	0,085168832
68	748,390456	25,73369	0,289269	498,9269707	11,4372	0,085709259
69	759,396198	25,09548	0,291101	506,264132	11,15354	0,086252256
70	770,40194	24,44294	0,292943	513,6012933	10,86353	0,08679781
71	781,407682	23,77633	0,294792	520,9384547	10,56726	0,08734586
72	792,413424	23,09591	0,29665	528,275616	10,26485	0,087896289
73	803,419166	22,40197	0,298515	535,6127773	9,95643	0,088448925
74	814,424908	21,6948	0,300387	542,9499387	9,642131	0,089003536
75	825,43065	20,97472	0,302264	550,2871	9,322096	0,089559828

76	836,436392	20,24206	0,304146	557,6242613	8,996472	0,090117445
77	847,442134	19,49719	0,306031	564,9614227	8,665417	0,09067596
78	858,447876	18,74047	0,307918	572,298584	8,329096	0,09123488
79	869,453618	17,97228	0,309804	579,6357453	7,987681	0,091793635
80	880,45936	17,19305	0,311687	586,9729067	7,641355	0,092351583
81	891,465102	16,40319	0,313565	594,310068	7,290306	0,092908003
82	902,470844	15,60314	0,315435	601,6472293	6,93473	0,093462092
83	913,476586	14,79337	0,317294	608,9843907	6,574832	0,094012965
84	924,482328	13,97436	0,319139	616,321552	6,210826	0,094559648
85	935,48807	13,1466	0,320966	623,6587133	5,842933	0,095101081
86	946,493812	12,3106	0,322772	630,9958747	5,471379	0,095636111
87	957,499554	11,46691	0,324552	638,333036	5,096403	0,096163489
88	968,505296	10,61606	0,326301	645,6701973	4,718249	0,09668187
89	979,511038	9,758632	0,328016	653,0073587	4,33717	0,09718981
90	990,51678	8,895207	0,329689	660,34452	3,953426	0,09768576
91	1001,522522	8,02639	0,331317	667,6816813	3,567285	0,098168067
92	1012,528264	7,152803	0,332893	675,0188427	3,179023	0,098634969
93	1023,534006	6,275085	0,334411	682,356004	2,788927	0,099084594
94	1034,539748	5,393894	0,335863	689,6931653	2,397286	0,099514955
95	1045,54549	4,509906	0,337243	697,0303267	2,004403	0,09992395
96	1056,551232	3,623815	0,338544	704,367488	1,610584	0,100309356
97	1067,556974	2,736331	0,339757	711,7046493	1,216147	0,10066883
98	1078,562716	1,848184	0,340875	719,0418107	0,821415	0,100999903
99	1089,568458	0,960122	0,341887	726,378972	0,426721	0,101299979
100	1100,5742	0,072909	0,342786	733,7161333	0,032404	0,101566333

Curva do Sistema				Curva da válvula		
Frequencia	Vazão	Head	BHP (HP)	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)
0	0	0	0	0	0	0
1	10,116	0,009051	1,23296E-06	6,666666667	0,010558	1,0702E-06
2	20,232	0,036204	9,86365E-06	13,333333333	0,042231	8,56161E-06
3	30,348	0,081459	3,32898E-05	20	0,09502	2,88954E-05
4	40,464	0,144817	7,89092E-05	26,666666667	0,168925	6,84929E-05
5	50,58	0,226276	0,000154119	33,333333333	0,263945	0,000133775
6	60,696	0,325837	0,000266318	40	0,380081	0,000231164
7	70,812	0,443501	0,000422904	46,666666667	0,517333	0,000367079
8	80,928	0,579266	0,000631273	53,333333333	0,6757	0,000547943
9	91,044	0,733134	0,000898825	60	0,855182	0,000780177
10	101,16	0,905104	0,001232956	66,666666667	1,055781	0,001070202
11	111,276	1,095176	0,001641064	73,333333333	1,277495	0,001424438
12	121,392	1,30335	0,002130548	80	1,520324	0,001849308

13	131,508	1,529626	0,002708804	86,66666667	1,784269	0,002351233
14	141,624	1,774004	0,003383231	93,33333333	2,06933	0,002936633
15	151,74	2,036484	0,004161226	100	2,375506	0,003611931
16	161,856	2,317066	0,005050188	106,6666667	2,702798	0,004383546
17	171,972	2,61575	0,006057513	113,3333333	3,051206	0,005257901
18	182,088	2,932536	0,007190599	120	3,420729	0,006241416
19	192,204	3,267425	0,008456845	126,6666667	3,811368	0,007340513
20	202,32	3,620415	0,009863648	133,3333333	4,223123	0,008561613
21	212,436	3,991508	0,011418405	140	4,655993	0,009911138
22	222,552	4,380703	0,013128515	146,6666667	5,109978	0,011395507
23	232,668	4,787999	0,015001375	153,3333333	5,58508	0,013021144
24	242,784	5,213398	0,017044383	160	6,081296	0,014794468
25	252,9	5,656899	0,019264937	166,6666667	6,598629	0,016721901
26	263,016	6,118502	0,021670434	173,3333333	7,137077	0,018809864
27	273,132	6,598207	0,024268272	180	7,696641	0,021064779
28	283,248	7,096014	0,027065849	186,6666667	8,27732	0,023493067
29	293,364	7,611923	0,030070563	193,3333333	8,879115	0,026101148
30	303,48	8,145935	0,033289811	200	9,502026	0,028895445
31	313,596	8,698048	0,036730991	206,6666667	10,14605	0,031882378
32	323,712	9,268263	0,040401501	213,3333333	10,81119	0,035068368
33	333,828	9,856581	0,044308739	220	11,49745	0,038459837
34	343,944	10,463	0,048460101	226,6666667	12,20482	0,042063206
35	354,06	11,08752	0,052862987	233,3333333	12,93331	0,045884896
36	364,176	11,73015	0,057524794	240	13,68292	0,049931329
37	374,292	12,39087	0,062452919	246,6666667	14,45364	0,054208925
38	384,408	13,0697	0,06765476	253,3333333	15,24547	0,058724106
39	394,524	13,76663	0,073137715	260	16,05842	0,063483293
40	404,64	14,48166	0,078909182	266,6666667	16,89249	0,068492907
41	414,756	15,2148	0,084976558	273,3333333	17,74767	0,073759369
42	424,872	15,96603	0,091347242	280	18,62397	0,079289101
43	434,988	16,73537	0,09802863	286,6666667	19,52138	0,085088524
44	445,104	17,52281	0,105028121	293,3333333	20,43991	0,091164059
45	455,22	18,32835	0,112353112	300	21,37956	0,097522127
46	465,336	19,152	0,120011002	306,6666667	22,34032	0,104169149
47	475,452	19,99374	0,128009187	313,3333333	23,32219	0,111111548
48	485,568	20,85359	0,136355066	320	24,32519	0,118355743
49	495,684	21,73154	0,145056036	326,6666667	25,34929	0,125908156
50	505,8	22,6276	0,154119496	333,3333333	26,39452	0,133775208
51	515,916	23,54175	0,163552842	340	27,46085	0,141963321
52	526,032	24,47401	0,173363472	346,6666667	28,54831	0,150478916
53	536,148	25,42437	0,183558785	353,3333333	29,65688	0,159328414
54	546,264	26,39283	0,194146178	360	30,78656	0,168518235
55	556,38	27,37939	0,205133049	366,6666667	31,93736	0,178054802
56	566,496	28,38406	0,216526795	373,3333333	33,10928	0,187944536
57	576,612	29,40682	0,228334814	380	34,30231	0,198193857
58	586,728	30,44769	0,240564504	386,6666667	35,51646	0,208809188

59	596,844	31,50667	0,253223263	393,3333333	36,75172	0,219796948
60	606,96	32,58374	0,266318489	400	38,0081	0,23116356
61	617,076	33,67891	0,279857578	406,6666667	39,2856	0,242915445
62	627,192	34,79219	0,293847929	413,3333333	40,58421	0,255059023
63	637,308	35,92357	0,30829694	420	41,90393	0,267600716
64	647,424	37,07305	0,323212009	426,6666667	43,24477	0,280546946
65	657,54	38,24064	0,338600532	433,3333333	44,60673	0,293904133
66	667,656	39,42632	0,354469908	440	45,9898	0,307678698
67	677,772	40,63011	0,370827535	446,6666667	47,39399	0,321877064
68	687,888	41,852	0,38768081	453,3333333	48,8193	0,33650565
69	698,004	43,09199	0,405037131	460	50,26572	0,351570879
70	708,12	44,35009	0,422903896	466,6666667	51,73325	0,367079172
71	718,236	45,62629	0,441288503	473,3333333	53,2219	0,383036949
72	728,352	46,92058	0,460198348	480	54,73167	0,399450632
73	738,468	48,23298	0,479640831	486,6666667	56,26255	0,416326642
74	748,584	49,56349	0,499623348	493,3333333	57,81455	0,4336714
75	758,7	50,91209	0,520153298	500	59,38766	0,451491328
76	768,816	52,2788	0,541238078	506,6666667	60,98189	0,469792847
77	778,932	53,66361	0,562885086	513,3333333	62,59723	0,488582377
78	789,048	55,06652	0,585101719	520	64,23369	0,507866341
79	799,164	56,48753	0,607895376	526,6666667	65,89127	0,52765116
80	809,28	57,92665	0,631273454	533,3333333	67,56996	0,547943253
81	819,396	59,38386	0,655243351	540	69,26977	0,568749044
82	829,512	60,85918	0,679812465	546,6666667	70,99069	0,590074953
83	839,628	62,3526	0,704988193	553,3333333	72,73273	0,6119274
84	849,744	63,86413	0,730777933	560	74,49588	0,634312809
85	859,86	65,39375	0,757189083	566,6666667	76,28015	0,657237599
86	869,976	66,94148	0,78422904	573,3333333	78,08554	0,680708191
87	880,092	68,50731	0,811905202	580	79,91204	0,704731008
88	890,208	70,09124	0,840224968	586,6666667	81,75965	0,72931247
89	900,324	71,69328	0,869195734	593,3333333	83,62838	0,754458999
90	910,44	73,31341	0,898824899	600	85,51823	0,780177015
91	920,556	74,95165	0,92911986	606,6666667	87,42919	0,80647294
92	930,672	76,60799	0,960088015	613,3333333	89,36127	0,833353195
93	940,788	78,28243	0,991736762	620	91,31447	0,860824202
94	950,904	79,97498	1,024073498	626,6666667	93,28878	0,888892381
95	961,02	81,68562	1,057105621	633,3333333	95,2842	0,917564154
96	971,136	83,41437	1,090840529	640	97,30074	0,946845942
97	981,252	85,16122	1,12528562	646,6666667	99,3384	0,976744166
98	991,368	86,92617	1,160448291	653,3333333	101,3972	1,007265247
99	1001,484	88,70923	1,196335941	660	103,4771	1,038415607
100	1011,6	90,51039	1,232955966	666,6666667	105,5781	1,070201667