



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DETERMINAÇÃO DA CURVA EQUIVALENTE PARA UMA
ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS BCS EM SÉRIE**

ALANA RANIELE NASCIMENTO ARAÚJO

Orientador: Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa

NATAL/RN, Junho de 2015

**DETERMINAÇÃO DA CURVA EQUIVALENTE PARA UMA
ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS BCS EM SÉRIE**

ALANA RANIELE NASCIMENTO ARAÚJO

NATAL/RN, Junho de 2015

Alana Raniele Nascimento Araújo

**DETERMINAÇÃO DA CURVA EQUIVALENTE PARA UMA
ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS BCS EM SÉRIE**

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. Sérgio José Gonçalves e Silva

Membro Examinador – UFRN

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Auri Rejane e Gaspar,
ao meu irmão, Erenilson, e a minha sobrinha, Emanuelle.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por tudo que proporcionou em minha vida, e por está sempre ao meu lado me dando forças.

A toda minha família, pelo incentivo, apoio e carinho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa, pela confiança depositada em mim, por seus ensinamentos, conselhos e disponibilidade.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Petróleo, por todo conhecimento compartilhado.

Aos meus amigos da graduação que, de forma direta ou indireta, fizeram parte dessa caminhada.

A todos meus amigos, por todo apoio e incentivo.

RESUMO

Os métodos de elevação artificial são utilizados para incrementar ou continuar a produção de reservatórios. Um dos métodos de elevação artificial mais importante, no Brasil e no mundo, é o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), o qual utiliza um motor elétrico para acionar uma bomba centrífuga de múltiplos estágios para elevar os fluidos até a superfície. Por ser um equipamento de grande relevância para o desempenho do sistema BCS, curvas características das bombas são fornecidas pelos fabricantes para auxiliar na escolha certa e caracterizar o desempenho do equipamento. No entanto, por motivos técnicos e/ou econômicos, como indisponibilidade ou alto custo da bomba, a utilização de uma única bomba não é sempre possível. Por isso, a associação de bombas centrífugas em série se torna imprescindível em diversas aplicações. Como para associação de bombas os fabricantes não fornecem as curvas características, neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para obtenção das curvas características para associação de duas bombas BCS em série, através de uma planilha no programa *Microsoft Office Excel*. A planilha desenvolvida fornece as curvas do *head*, potência absorvida e rendimento para cada bomba quando utilizada individualmente, e para associação das mesmas em série. Além disso, são apresentadas no trabalho as vantagens e limitações da associação, e as equações envolvidas para obtenção das curvas.

Palavras-Chave: Bombeio Centrífugo Submerso, Associação de Bombas BCS em Série, Curvas Características.

ABSTRACT

Artificial lifting methods are used for increasing or proceeding the reservoirs production. One of the most important methods of artificial lifting in Brazil and in all the world, it is the Electric Submersible Pumping (ESP) and it uses an electrical engine to set a multistage centrifugal pump to lift fluids to the surface. Because it is a very important equipment to the performance of ESP system, pump performance curves are supplied by manufacturers to assist on right choice, characterizing and featuring the equipment performance. However, for technical and/or for economical reasons, such as high cost or unavailability of it, just using a single pump it is not ever possible. For this reason, the combination of centrifugal pumps in series it becomes essencial in many applications. Considering that the manufacturers do not provide the performance curves to the pumps association, in this work a methodology has been developed to obtain performance curves to associate two ESP pumps in series, by a spreadsheet in *Microsoft Office Excel*. This spreadsheet developed, it provides curves to the *head*, brake horsepower and efficiency for each pump when it is used individually, and for associating them in serie. Besides, in this work the association advantages and limitations are presented and also equations involved to obtain curves.

Keywords: Electric Submersible Pumping, ESP Pumps Association in Series, Performance Curves.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Estrutura do Trabalho.....	17
CAPÍTULO 2- ASPECTOS TEÓRICOS.....	18
2.1 Bombeio Centrífugo Submerso (BCS).....	18
2.1.1 Equipamentos de Superfície.....	19
2.1.1.1 Quadro de Comando ou Painel de Controle.....	20
2.1.1.2 Transformador.....	21
2.1.1.3 Caixa de Junção ou de Ventilação.....	21
2.1.1.4 Cabo Elétrico.....	22
2.1.1.5 Variador de Velocidade ou de Frequência.....	22
2.1.2 Equipamentos de Subsuperfície.....	23
2.1.2.1 Motor Elétrico.....	24
2.1.2.2 Protetor ou Selo.....	25
2.1.2.3 Separador de Gás.....	26
2.2 Bombas.....	27
2.2.1 Princípio de Funcionamento de Bombas Centrífugas.....	28
2.2.2 Bombas Centrífugas Utilizadas no Sistema BCS.....	29
2.2.3 Curvas Características de Bombas Centrífugas.....	30
2.2.4 Leis da Afinidade.....	32
2.2.5 Presença de Gás Livre.....	32
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	35
3.1 Associações em Paralelo.....	35
3.1.1 Curvas Características para Associações em Paralelo.....	36
3.2 Associações em Série.....	37
3.2.1 Curvas Características para Associações em Série.....	39
3.3 Procedimeto para Obter a Curva Característica da Associação em Série Através do Programa <i>Microsoft Office Excel</i>	40

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	49
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXO I- Tabela Parâmetros Calculados Bomba 1.....	51
ANEXO II- Tabela Parâmetros Calculados Bomba 2.....	55
ANEXO III- Tabela Parâmetros Calculados Associação de Bombas.....	59

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1:** Poço completado e amortecido. Fonte: Costa (2012).
- Figura 1.2:** Distribuição da utilização de elevação artificial no mundo. Fonte: Adaptado Prado (2007).
- Figura 2.1:** Sistema BCS. Fonte: Maitelli (2010).
- Figura 2.2:** Quadro de comando ou painel de controle. Fonte: Prado (2007)
- Figura 2.3:** Transformador. Fonte: Prado (2007)
- Figura 2.4:** Modelo de uma instalação de caixa de junção ou de ventilação. Fonte: Adaptado Takacs (2009)
- Figura 2.5:** Composição do Cabo Elétrico Redondo e Cabo Elétrico Chato. Fonte: Adaptado Takacs (2009)
- Figura 2.6:** Variador de Velocidade ou de Frequência. Fonte: Baker Hughes (2014)
- Figura 2.7:** Composição de um motor elétrico. Fonte: Adaptado Takacs (2009)
- Figura 2.8:** Curvas de desempenho de um motor. Fonte: Takacs (2009)
- Figura 2.9:** Selo Mecânico. Fonte: Takacs (2009)
- Figura 2.10:** Separador de Gás de Fluxo Inverso. Fonte: Adaptado Takacs (2009)
- Figura 2.11:** Tipos de Separador de Gás Rotativo. Fonte: Takacs (2009)
- Figura 2.12:** Classificação das Bombas. Fonte: Adaptado Mattos & Falco (1998)
- Figura 2.13:** Partes de uma Bomba Centrífuga. Fonte: Mattos & Falco (1998)
- Figura 2.14:** Impelidor Fechado e Impelidor Aberto. Fonte: Adaptado Macintyre (1997)
- Figura 2.15:** Bomba Centrífuga de múltiplos estágios. Fonte: Prado (2007)
- Figura 2.16:** Curvas Características. Fonte: Mattos & Falco (1998)
- Figura 2.17:** Ponto de Trabalho (Q_T , H_T , P_T , Π_T). Fonte: Mattos & Falco (1998)
- Figura 2.18:** Tendência de Degradação do *head*. Fonte: Takacs (2009)
- Figura 2.19:** Manuseador de Gás *Poseidon*. Fonte: Schlumberger (2012)
- Figura 3.1:** Associação em Paralelo de Duas Bombas BCS. Fonte: Adaptado Takacs (2009).
- Figura 3.2:** Curva Característica Associação em Paralelo. Fonte: Mattos & Falco (1998)

Figura 3.3: Associação em Série de Bombas BCS. Fonte: Adaptado Takacs (2009)

Figura 3.4: Curva Característica Associação em Série. Fonte: Mattos & Falco (1998)

Figura 3.5: Interface Planilha Parâmetros de Entrada

Figura 3.6: Interface Planilha Parâmetros Calculados

Figura 3.7: Interface Planilha dos Gráficos Obtidos

Figura 4.1: Curvas Características Bomba 1

Figura 4.2: Curvas Características Bomba 2

Figura 4.3: Curvas Características Associação de Bombas em Série

Figura 4.4: Comparação do *Head* das Bombas Individualmente e das Bombas Associadas

Figura 4.5: Comparação do BHP das Bombas Individualmente e das Bombas Associadas

Figura 4.6: Comparação da Eficiência das Bombas Individualmente e das Bombas Associadas

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros das Bombas Utilizadas

Tabela 2: Fatores dos Polinômios das Bombas Utilizadas

Tabela A-I: Parâmetros Bomba 1

Tabela A-II: Parâmetros Bomba 2

Tabela A-III: Parâmetros Associação das Bombas em Série

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos e Abreviaturas	Descrição
A, B, C, D, E, F	Fatores dos polinômios da bomba
BEP	Ponto de melhor eficiência da bomba (Best Efficiency Point)
BHP	Potência absorvida pela bomba (HP)
f	Frequência (rpm)
H	<i>Head</i> (ft)
N ^o _{est}	Quantidade de estágios da bomba
N ^o _{pontos}	Quantidade de pontos para gerar os gráficos
PIP	Pressão de sucção da bomba (psia)
P _{útil}	Potência útil cedida ao fluido (HP)
q	Vazão volumétrica da bomba (bpd)
q _{ant}	Vazão do ponto anterior (bpd)
q' _g	Vazão volumétrica de gás na sucção da bomba (bpd)
q' _l	Vazão volumétrica de líquido na sucção da bomba (bpd)
q _{máx}	Vazão máxima da bomba (bpd)
Letras gregas	Descrição
γ	Peso específico do fluido (lb/ft ³)
γ_w	Peso específico da água (lb/ft ³)
η	Eficiência da bomba (%)
ϕ	Índice de Turpin (psia ⁻¹)

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O petróleo, do Latim *Petra* (Pedra) e *Oleum* (óleo), é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos, podendo ser líquido (óleo) ou gasoso (gás), nas condições normais de temperatura e pressão. Contudo, ao ser extraído o petróleo vem misturado com a água. Ele é formado a partir de matéria orgânica depositada com sedimentos em condições não oxidantes, sendo submetidas a elevadas temperaturas.

A descoberta de uma jazida de petróleo envolve o estudo e a análise de dados geológicos e geofísicos. Após esses estudos, é então proposta a perfuração de um poço e verificada a existência do petróleo na área investigada. A perfuração do poço é realizada através de uma sonda, sendo feita em etapas por medidas de segurança. Após um intervalo ser perfurado a coluna de perfuração é retirada e um revestimento de aço é descido, o anular entre o revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as formações atravessadas. Em seguida, é descido novamente à coluna de perfuração e os procedimentos são repetidos até ser alcançada a profundidade desejada.

Com o término da perfuração e confirmação da existência do petróleo, é necessário a completação do poço. A completação consiste em um conjunto de operações com o objetivo de fornecer ao poço as condições necessárias para produzir o petróleo de forma segura e econômica. O poço é então preenchido com fluido de completação, e canhoneado, e assim o reservatório pode comunicar-se com o poço.

Com o poço completado e amortecido (Figura 1.1) inicia-se o processo de elevação do petróleo. Para que o poço produza por elevação natural, a pressão do reservatório deve ser suficiente para elevar os fluidos até a superfície vencendo as perdas de cargas. É vantajosa a retirada da maior quantidade de óleo possível por elevação natural, pois o custo operacional é menor, além de necessitar de equipamentos mais simples, e conseqüentemente, ter menos problemas operacionais.

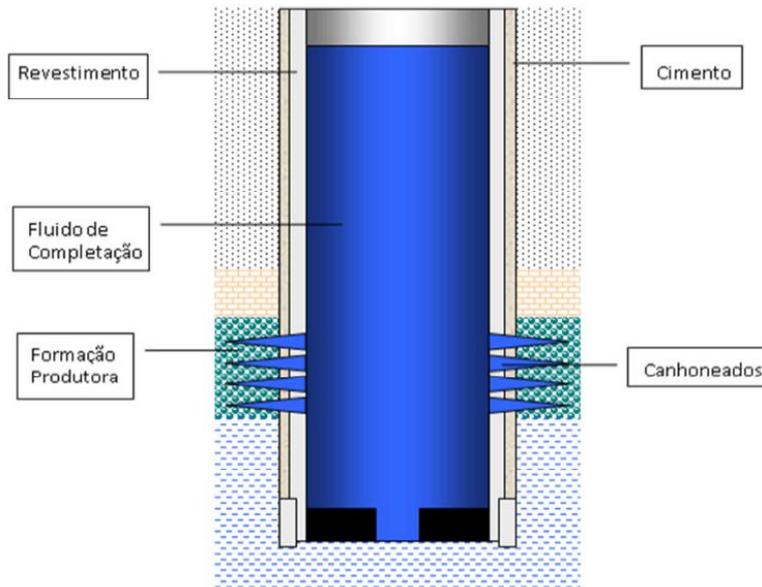


Figura 1.1: Poço completado e amortecido. Fonte: Costa (2012).

No entanto, não são todos os reservatórios que possuem energia suficiente para iniciar ou continuar a sua produção por elevação natural. Por isso, a utilização de métodos de elevação artificial se torna necessária para fornecer a energia que o fluido necessita para ser produzido. Também são utilizados métodos de elevação artificial quando a vazão do poço é inferior a sua capacidade de produção ou no final da vida produtiva do poço por surgência. O princípio dos métodos de elevação artificial é a suplementação da energia do poço, a qual segundo Takacs (2009) pode ser feita através da utilização de uma bomba instalada abaixo do nível de fluido do poço para superar as perdas de cargas necessárias para elevação do fluido, ou através da injeção de gás comprimido a partir da superfície para diminuir a densidade dos fluidos, e consequentemente, as perdas de carga do fluido até a superfície.

No mundo, aproximadamente 90% dos poços de petróleo utilizam algum tipo de método de elevação artificial, a maioria destes poços estão localizados na América do Norte e Rússia como mostra a Figura 1.2, entre os vários métodos existentes o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) se destaca sendo amplamente utilizado em aplicações *onshore* e *offshore*. No BCS, a energia é transmitida ao fluido através de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios. Além da bomba centrífuga de múltiplos estágios, o sistema BCS é composto por outros equipamentos, os quais são divididos em equipamentos de superfície e de subsuperfície, sendo os equipamentos de superfície o

quadro de comando, transformador, caixa de ventilação e variador de velocidade (VSD- *Variable Speed Drive*), e os de subsuperfície o motor elétrico, selo, separador de gás, cabo elétrico e bomba centrífuga.

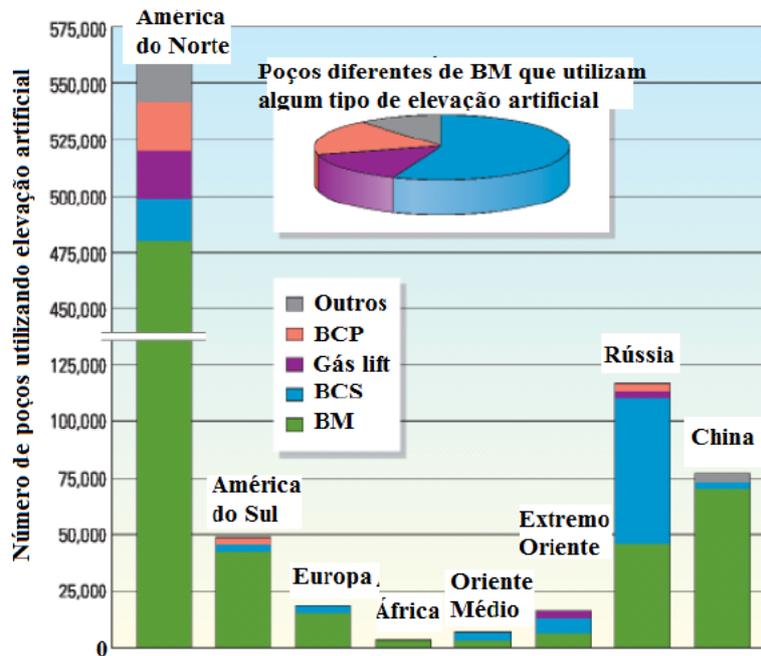


Figura 1.2: Distribuição da utilização de elevação artificial no mundo. Fonte: Adaptado Prado (2007).

A bomba centrífuga é considerada o coração do sistema BCS, por isso a escolha correta da bomba deve ser realizada para que o sistema apresente o melhor desempenho. Para isso, os fabricantes fornecem as curvas características das bombas, de onde se pode analisar, para determinadas vazões, parâmetros como o *head*, potência absorvida e o rendimento da bomba. Mesmo com a existência de uma grande variedade de bombas centrífugas no mercado, não é sempre possível encontrar a bomba que seja adequada para determinada aplicação, ou às vezes a bomba ideal possui um custo muito elevado fazendo a sua utilização inviável. Por motivos técnicos e/ou econômicos, muitas vezes é necessário recorrer à associação de bombas em série ou paralelo para satisfazer determinado projeto. A associação de bombas é prática comum na indústria, contudo, as curvas características da associação das bombas não são fornecidas. É necessário desenvolver um procedimento para associação de bombas.

1.1 Objetivo Geral

De acordo com o que foi apresentado, esse trabalho possui como objetivo geral o desenvolvimento de uma metodologia para obter curvas características para associação de bombas centrífugas em série, através de uma planilha elaborada no programa *Microsoft Office Excel*.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar o procedimento de cálculo para obtenção da curva equivalente para associação de bombas BCS em série.
- b) Fazer uma planilha para determinação da curva equivalente no programa *Microsoft Office Excel*.
- c) Gerar através da planilha as curvas do *head*, potência absorvida pela bomba e eficiência para associação de bombas BCS em série.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em seis capítulos. O capítulo 1 aborda a introdução ao tema e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 apresenta os aspectos teóricos relevantes para desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada, sendo seguido pelos resultados e discussões, capítulo 4, e por fim conclusão e referências bibliográficas, nos capítulos 5 e 6, respectivamente.

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão abordados os aspectos teóricos relevantes para compreensão do trabalho, será apresentado o bombeio centrífugo submerso (BCS) e os principais equipamentos utilizados, sendo dada ênfase ao comportamento da bomba centrífuga.

2.1 Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)

O método de elevação artificial utilizado neste trabalho é o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), o qual consiste na utilização de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios para complementar a energia do reservatório, ajudando os fluidos a vencer as perdas de carga e chegar até a superfície. Para ocorrer a produção do fluido, energia é transmitida ao fundo do poço através de um cabo elétrico, um motor de subsuperfície transforma a energia elétrica em energia mecânica, para então uma bomba centrífuga, conectada ao motor, transmitir a energia na forma de pressão ao fluido elevando-o até a superfície.

Ele foi desenvolvido no final da década de 1910 por um russo chamado Armais Arutunoff, o qual fundou a empresa *Russian Electrical Dynamo of Arutunoff* (REDA). Ele desenvolveu o primeiro motor elétrico que poderia ser operado submerso em um poço de petróleo, sendo a primeira instalação de BCS operada com sucesso no campo de El Dorado no Kansas em 1926. Durante a sua história, os equipamentos do BCS foram submetidos a contínuas melhorias como a primeira utilização de separadores de gás rotativos em 1970, e a utilização do variador de velocidade (*Variable Speed Drive - VSD*) em 1977 (Takacs, 2009).

Acredita-se que cerca de 10% do petróleo produzido no mundo é através da utilização do BCS. Ele pode ser aplicado em campos *onshore* e *offshore*, em casos em que há disponibilidade de energia elétrica, e em que grandes volumes precisam ser elevados. Segundo Takacs (2009), a vazão de líquido produzido decresce com o aumento da profundidade do poço, e o método apresenta, aproximadamente, como limite extremo a profundidade de 15000 ft e vazão de produção de líquido de 30000 bpd.

Algumas das vantagens em se utilizar o BCS está na eficiência em se elevar grandes vazões em médias profundidades, possuir eficiência relativamente alta (aproximadamente 50 %) para sistemas de produções de mais de 1000 bpd, poder ser utilizado em poços desviados, além de ser utilizado em ambientes urbanos e *offshore* por necessitar de pouco espaço. No entanto, como todos os métodos, ele possui algumas limitações como a necessidade de uma fonte de energia elétrica com alta tensão, problemas relacionados à presença de gás, areia, altas temperaturas e viscosidade do óleo, além do alto custo.

Para compreender o BCS é necessário que se conheça os equipamentos (Figura 2.1) que compõe o sistema e a função de cada um deles. Eles podem ser divididos em equipamentos de superfície e de subsuperfície.

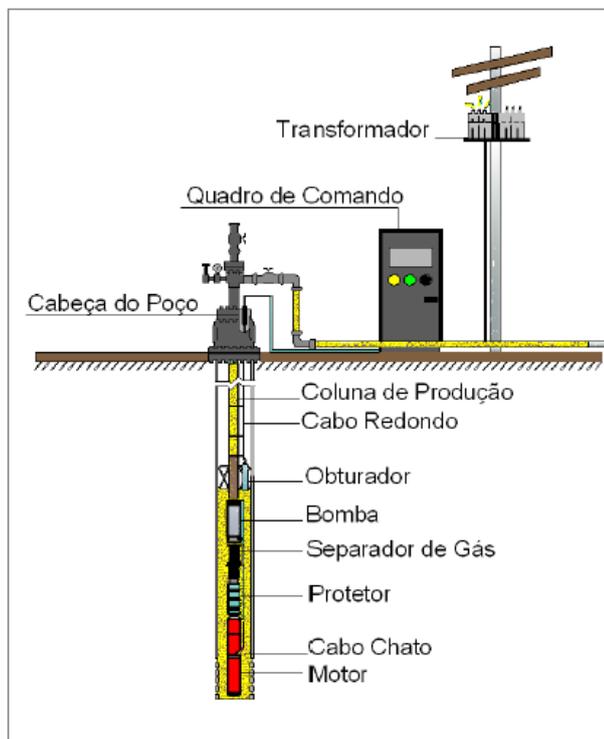


Figura 2.1: Sistema BCS. Fonte: Maitelli (2010).

2.1.1 Equipamentos de Superfície

Os equipamentos de superfície são quadro de comando ou painel de controle, transformador, caixa de junção ou de ventilação, cabo elétrico, e alguns sistemas utilizam o variador de velocidade ou de frequência. Para melhor compreensão será explicitado à função de cada equipamento.

2.1.1.1 Quadro de Comando ou Painel de Controle

O quadro de comando ou painel de controle, como mostra a Figura 2.2, é o centro de controle e segurança do sistema BCS. Atua controlando o motor, e conseqüentemente, toda a instalação. Os quadros de comando tipo padrão trabalham com frequência elétrica constante e variam em tamanhos, modelos e potências. Ele é constituído, principalmente, por disjuntor magnético, contator, transformador de corrente e fusíveis.



Figura 2.2: Quadro de comando ou painel de controle. Fonte: Prado (2007)

As funções do quadro de comando são o controle liga/desliga dos equipamentos BCS, proteger os equipamentos de superfície e de subsuperfície de vários problemas, monitorar e registrar os parâmetros operacionais mais importantes. Ele monitora importantes parâmetros operacionais e dispara diferentes alarmes para cada parâmetro como fator de potência, correntes de linha e voltagens. Alguns quadros possuem amperímetros de registro contínuo que facilita a análise de diagnóstico do sistema operacional. Os mais modernos, segundo Takacs (2009), podem armazenar parâmetros operacionais na memória para posterior recuperação, e comunicar-se com a central por rádio ou telefonia fixa, ou sistema do campo.

Os principais problemas de fundo de poço que o quadro de comando pode evitar são sobrecarga do motor, carga insuficiente do motor, desequilíbrio de correntes e número excessivo de arranques. Na superfície o quadro de comando protege o sistema de falhas como entrada de tensões muito altas ou muito baixas, desequilíbrio de tensões, tensões transitórias e rotações de fases erradas (Takacs, 2009).

2.1.1.2 Transformador

Quando a voltagem disponível não é compatível com a voltagem do motor é necessário utilizar transformadores (Figura 2.3). Os transformadores operam por meio da indução magnética, transferindo a energia de um circuito para o outro. Eles são selecionados de acordo com os níveis de voltagem e potências, e podem ser trifásicos ou um conjunto de três transformadores monofásicos.

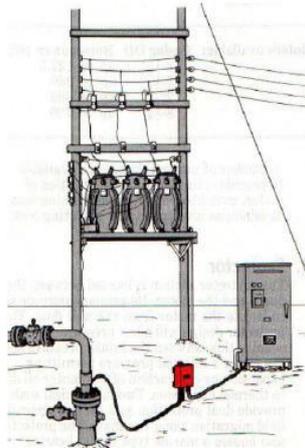


Figura 2.3: Transformador. Fonte: Prado (2007)

2.1.1.3 Caixa de Junção ou de Ventilação

A caixa de junção ou de ventilação tem como principal função ventilar o gás que possa migrar do poço através dos cabos, evitando o perigo de incêndio ou explosão devido à presença de gás não ser desejada no quadro de comando. Além disso, possui outras funções como conectar eletricamente o fundo do poço com o cabo elétrico da superfície e atuar como ponto de teste para verificar eletricamente os equipamentos no fundo do poço. Ele deve ser instalado a uma distância mínima de 15 pés da cabeça do poço e suspenso da superfície de 2 a 3 pés, como mostra a Figura 2.4 (Takacs, 2009).

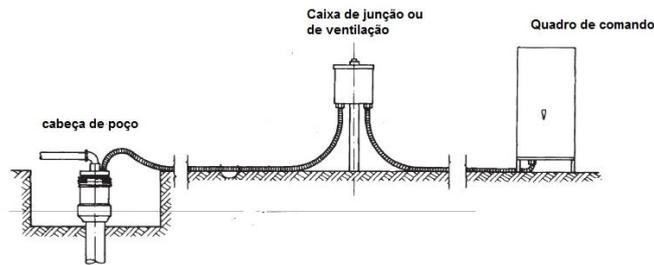


Figura 2.4: Modelo de uma instalação de caixa de junção ou de ventilação. Fonte: Adaptado Takacs (2009)

2.1.1.4 Cabo Elétrico

O cabo elétrico trifásico tem a função de transmitir a energia elétrica da superfície para o motor. Para não comprometer a vida útil e eficiência do sistema BCS ele deve ser protegido contra danos mecânicos, e ser capaz de resistir condições adversas como altas temperaturas, fluidos agressivos, presença de gás e hidrocarbonetos.

Os cabos podem ser chatos ou redondos, e são formados por três condutores de metais (cobre ou alumínio) que transportam a corrente, isolamento individual para cada condutor prevenindo curtos-circuitos e fuga de corrente, e a jaqueta que protege os três condutores fornecendo força estrutural, proteção mecânica e isolamento. Coberturas complementares como a armadura metálica podem ser utilizadas para fornecer maior proteção mecânica. A composição e os tipos de cabos elétricos podem ser observados na Figura 2.5.

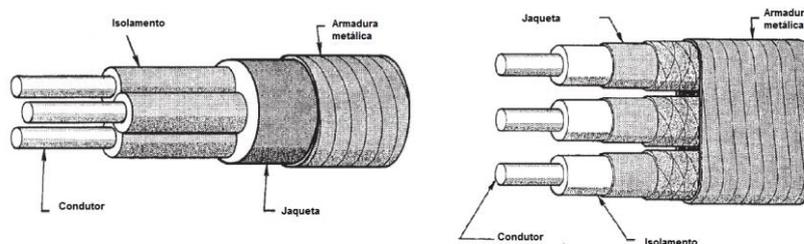


Figura 2.5: Composição do Cabo Elétrico Redondo e Cabo Elétrico Chato. Fonte: Adaptado Takacs (2009)

2.1.1.5 Variador de Velocidade ou de Frequência

O variador de velocidade ou de frequência (VSD) é amplamente utilizado para controlar a velocidade de motores elétricos. A função do VSD, mostrado na Figura 2.6,

é converter a frequência de entrada, geralmente de 60 HZ, em qualquer outra frequência da sua faixa de operação.

Quando comparado com sistemas BCS convencionais, a utilização de VSD possui grandes vantagens. A principal vantagem é a flexibilidade em se poder variar as frequências permitindo adequação entre a capacidade de elevação do sistema BCS e a produtividade do poço. Outros benefícios podem ser destacados como aumento da vida útil dos equipamentos BCS devido a menor aquecimento e cargas axiais menores, permitir arranques suaves fazendo com que ocorra a redução da necessidade de energia e o aumento da vida útil do motor, e eliminação de falhas prematuras devido a distúrbios do sistema de potência. Contudo, a utilização do VSD não é sempre viável devido o seu alto custo (Takacs, 2009).



Figura 2.6: Variador de Velocidade ou de Frequência. Fonte: Baker Hughes (2014)

2.1.2 Equipamentos de Subsuperfície

Os equipamentos de subsuperfície são motor elétrico, protetor ou selo, separador de gás, e bomba. Além desses equipamentos existem outros como abraçadeiras para cabo ou cintas, acoplamentos, check-valve ou standing-valve, sensor de pressão e temperatura, cabeça de descarga, e calha para cabo chato e bloco “y”, os quais são utilizados apenas quando as condições de produção demandam. Os principais equipamentos de subsuperfície serão detalhados a seguir, no entanto, a bomba será descrita no próximo tópico de maneira mais detalhada que os outros equipamentos por ser de grande relevância para o trabalho.

2.1.2.1 Motor Elétrico

O motor elétrico utilizado no sistema BCS é trifásico, bipolar, de indução e do tipo gaiola. Sendo a sua velocidade nominal de rotação 3500 rpm a uma frequência de 60 Hz. Ele é projetado para trabalhar a altas temperaturas e pressões, sendo responsável por fornecer energia para a rotação e aceleração dos fluidos no interior da bomba para poderem ser elevados (Takacs, 2009).

É constituído por uma carcaça, estator, rotor, cabos magnéticos isolados e eixo, como ilustrado na Figura 2.7. Ligado ao interior da carcaça está o estator, no interior do estator separado apenas por um espaço anular se encontra o rotor. O eixo do motor é oco para permitir a circulação de um óleo lubrificante com alta resistência dielétrica e boa condutividade térmica para lubrificar os mancais (Takacs, 2009).

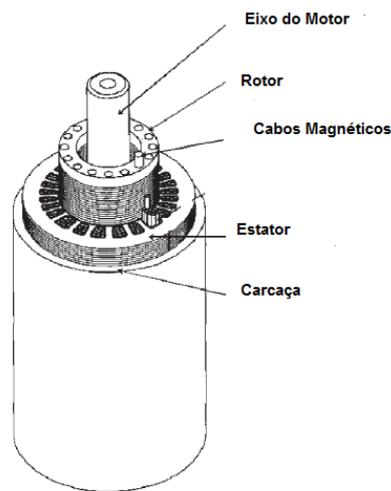


Figura 2.7: Composição de um motor elétrico. Fonte: Adaptado Takacs (2009)

Os fabricantes dos motores, através de uma série de testes, fornecem curvas de desempenho do motor para representar parâmetros como eficiência, rotação, fator de potência e corrente. Um exemplo de curvas de desempenho do motor pode ser observada na Figura 2.8.

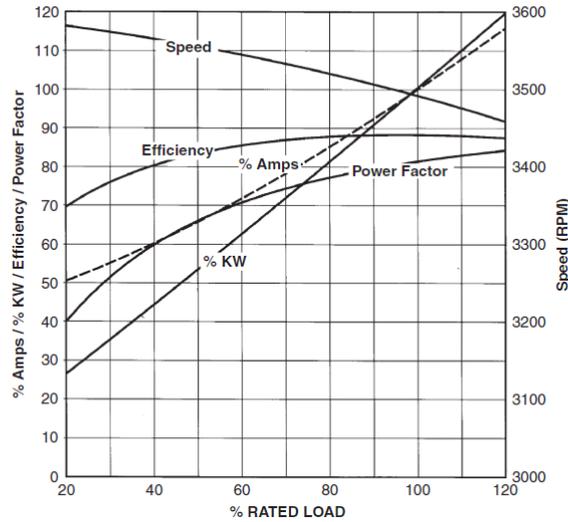


Figura 2.8: Curvas de desempenho de um motor. Fonte: Takacs (2009)

2.1.2.2 Protetor ou Selo

O selo ou protetor é instalado entre o motor e a bomba centrífuga. Possui cinco funções principais: garantir que nenhuma carga axial desenvolvida na bomba seja transmitida para o eixo do motor; isolar o fluido dielétrico do motor para que não seja contaminado com fluidos do poço carregados com sujeira; permitir a expansão e contração do óleo do motor; equalizar as pressões internas com a pressão do anular; e proporcionar ligação mecânica entre o motor e a bomba (Takacs, 2009).

O selo é ligado, na parte inferior, no motor e, na parte superior, na bomba, o seu interior é preenchido com o mesmo óleo do motor. Podem ser ligados em série quando forem necessárias potências elevadas. A composição do selo mecânico é mostrada na Figura 2.9.

O selo é fabricado em diferentes tamanhos para atender as mais diversas aplicações. Para escolha correta três aspectos devem ser levados em consideração: capacidade da carga de rolamento, capacidade de torque do eixo e capacidade de expansão do óleo.

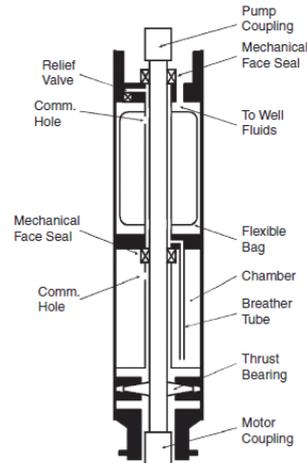


Figura 2.9: Selo. Fonte: Takacs (2009)

2.1.2.3 Separador de Gás

Para evitar problemas decorrentes da presença de gás livre na sucção da bomba, a utilização de um separador de gás é necessária. Ele é instalado entre o selo e a bomba, e podem ser rotatórios ou estacionários.

A solução mais simples para a presença de gás na sucção da bomba é a utilização do separador de gás de fluxo inverso, Figura 2.10, sendo essencial a sua utilização em instalação BCS convencional. Ele funciona através da separação gravitacional, permitindo que o gás livre escape pelo anular do poço, e é utilizado em poços com quantidades de gás livre variando de baixa a moderada (Takacs, 2009).

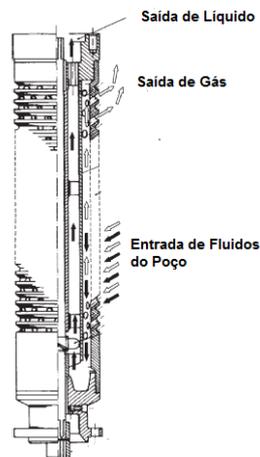


Figura 2.10: Separador de Gás de Fluxo Inverso. Fonte: Adaptado Takacs (2009)

Outro tipo é o separador de gás rotativo, nesse tipo de separador os fluidos são separados quando submetidos a velocidades elevadas. Segundo Takacs (2009), devido à

rotação, o líquido se concentra no interior da parede do separador e o gás próximo ao eixo. O divisor de escoamento garante a movimentação das fases em caminhos diferentes, e um dispositivo de passagem dirige o gás para o anular do revestimento para ser ventilado na superfície, e o líquido para a bomba. Eles podem atingir eficiência de 80 %, e ser de vários tipos, como mostrado na Figura 2.11.

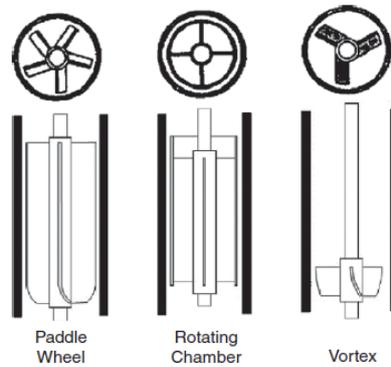


Figura 2.11: Tipos de Separador de Gás Rotativo. Fonte: Takacs (2009)

2.2 Bombas

As bombas podem ser definidas como máquinas operatrizes hidráulicas que fornecem energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto para outro obedecendo às condições do processo (Mattos & Falco, 1998).

Elas funcionam cedendo uma parte da energia recebida de uma fonte motora para o fluido, podendo ser na forma de energia cinética, de pressão, ou até mesmos as duas formas (Mattos & Falco, 1998). Podem ser classificadas de acordo com a forma que fornecem energia ao fluido em bombas de deslocamento positivo (volumétricas), e turbobombas (dinâmicas), como mostra a Figura 2.12.

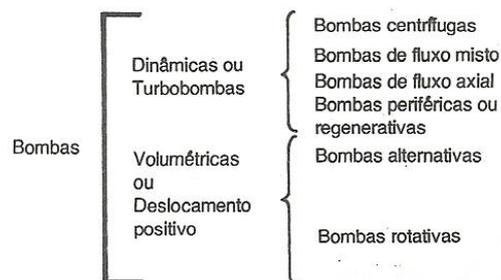


Figura 2.12: Classificação das Bombas. Fonte: Adaptado Mattos & Falco (1998)

As bombas de deslocamento positivo (volumétricas) transmitem energia ao líquido na forma de pressão. O líquido executa o mesmo movimento da bomba,

preenchendo um determinado volume no interior da bomba e depois sendo escoado, sendo esse processo repetido sucessivamente.

As bombas dinâmicas (turbobombas) transmitem energia ao líquido na forma de energia cinética e de pressão. O líquido é transportado através da rotação de um impelidor com certa quantidade de pás especiais que fornecem energia a massa líquida. As bombas centrífugas, foco deste trabalho, são classificadas como turbobombas. Nesse tipo de bomba, a energia fornecida ao líquido é primordialmente do tipo cinética, sendo posteriormente transformada a maior parte em energia de pressão (Mattos & Falco, 1998).

2.2.1 Princípio de Funcionamento de Bombas Centrífugas

O princípio de funcionamento das bombas centrífugas é baseado na formação de uma zona de alta pressão e de uma zona de baixa pressão. Para o funcionamento, é necessário que a carcaça esteja preenchida por líquido. Para se formar a região de baixa pressão, as palhetas transmitem ao fluido o movimento rotativo do impelidor, fazendo com que a força centrífuga atue sobre o líquido deslocando-o para periferia, e formando a região de baixa pressão no centro. A zona de alta pressão é formada na periferia devido ao líquido que migra para periferia encontrar um aumento progressivo da região de escoamento, causando queda de velocidade e aumento de pressão.

As bombas centrífugas são compostas, essencialmente, por duas partes principais: o impelidor e o difusor, ilustrado na Figura 2.13. O impelidor ou rotor, Figura 2.14, é uma peça de formato cônico ou disco, composto por palhetas ou pás, podendo ser fechado (possui uma coroa circular presa às palhetas) ou aberto (não possui coroa), e tendo como função fornecer aceleração a massa líquida para poder adquirir energia cinética a partir da transformação da energia mecânica. O difusor, também chamado de recuperador, é responsável por transformar parte da energia cinética que o líquido possui quando sai do impelidor em energia de pressão. A bomba possui ainda uma carcaça que serve como invólucro.

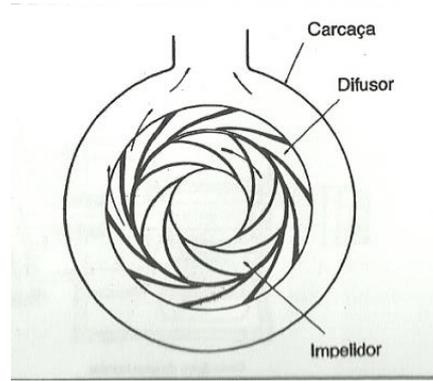


Figura 2.13: Partes de uma Bomba Centrífuga. Fonte: Mattos & Falco (1998)

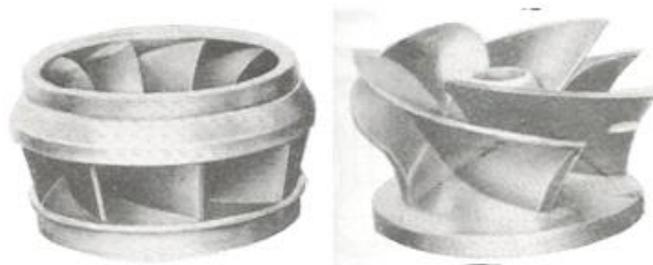


Figura 2.14: Impelidor Fechado e Impelidor Aberto. Fonte: Adaptado Macintyre (1997)

As bombas centrífugas com apenas um estágio, possuem apenas um impelidor, já as bombas centrífugas de múltiplos estágios, possuem vários impelidores ligados em série. De acordo com o fluxo são divididas da seguinte maneira: bombas de fluxo radial, a direção de saída do líquido é normal ao eixo; bombas de fluxo axial, a direção de saída do líquido é paralela ao eixo; ou bombas de fluxo misto, possui um ângulo de saída, entre 90° e 180°.

2.2.2 Bombas Centrífugas Utilizadas no Sistema BCS

As bombas centrífugas utilizadas no sistema BCS são bombas de múltiplos estágios, de fluxo radial ou misto, com impelidor do tipo fechado, e com um único lado de sucção. Ela é ilustrada na Figura 2.15.

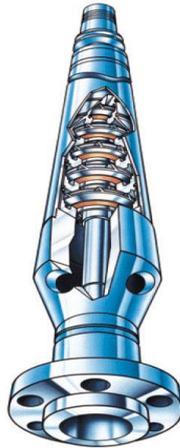


Figura 2.15: Bomba Centrífuga de múltiplos estágios. Fonte: Prado (2007)

As bombas de fluxo misto utilizadas no BCS possuem maior capacidade de bombeamento quando comparadas com as de fluxo radial, além de ter como vantagem o melhor manuseio do gás livre. Em alguns projetos, impelidores flutuantes são utilizados ao invés de impelidores fixos. Eles apresentam algumas vantagens como não haver necessidade de fixar os impelidores, poder construir bombas com várias centenas de estágios, e custo mais baixo. No entanto, existem algumas desvantagens relacionadas à capacidade de carga de empuxo como a faixa de operação recomendada ser mais estreita e serem fabricados em diâmetros menores.

2.2.3 Curvas Características de Bombas Centrífugas

O desempenho de bombas centrífugas é representado a partir de curvas características fornecidas pelo fabricante. As curvas são obtidas através de ensaios em laboratório, de acordo com a norma API RP 11S2. As bombas são testadas com água doce a uma velocidade de rotação constante de 3500 rpm a 60 Hz, e temperatura de 60° F, considerando um estágio.

As curvas características da bomba são basicamente três: *Head* x *Vazão*, *Potência Absorvida* x *Vazão*, e *Eficiência* x *Vazão*. Elas são disponibilizadas, na maioria das vezes, de forma conjunta como mostra a Figura 2.16.

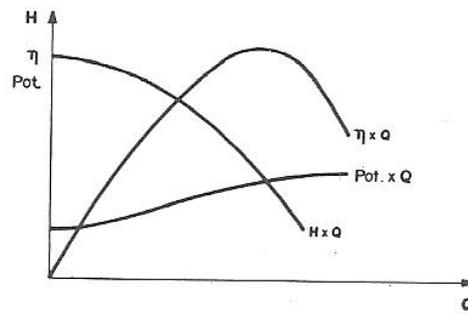


Figura 2.16: Curvas Características. Fonte: Mattos & Falco (1998)

O *Head* de uma bomba é definido segundo Mattos & Falco (1998) como a energia por unidade de peso que a bomba tem condições de fornecer ao fluido para uma determinada vazão. Quando o *head* é expresso em unidade linear, ele fornece a altura manométrica que a bomba é capaz de vencer em determinada vazão. A potência absorvida pela bomba (BHP- *Brake HorsePower*) pode ser definida como a potência que o motor deve fornecer ao eixo da bomba. A eficiência (η) é definida como a razão entre a potência útil cedida ao fluido e a potência absorvida pela bomba, como mostra a Equação (1). Através da curva da eficiência é possível encontrar as vazões onde a bomba terá um melhor rendimento.

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{BHP} = \frac{\gamma q H}{BHP} \quad (1)$$

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

Ao adicionarmos a curva requerida pelo sistema na mesma interface das curvas características da bomba, o ponto de trabalho pode ser obtido da intersecção com a curva de *head* x vazão, como mostra a Figura 2.17.

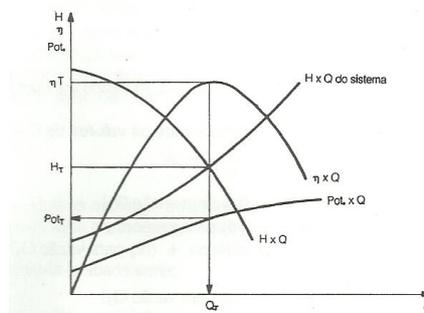


Figura 2.17: Ponto de Trabalho (Q_T , H_T , P_T , η_T). Fonte: Mattos & Falco (1998)

2.2.4 Leis da Afinidade

Por serem acionadas por motores elétricos que utilizam uma rede de fornecimento de energia elétrica com frequência constante, a maioria das bombas centrífugas operam a frequência constante. No entanto, para se conseguir melhores resultados do sistema BCS, em algumas situações é necessário ajustar a frequência de operação através da utilização do VSD. Com a alteração da frequência as curvas características da bomba sofrem alterações, as quais podem ser determinadas através das leis da afinidade.

As leis da afinidade permitem que a curva de desempenho para diferentes frequências possa ser calculada. Para um sistema inicialmente com frequência f_1 , vazão q_1 , *head* H_1 e potência BHP_1 , alterando-se a frequência para f_2 , o sistema terá uma nova vazão q_2 , novo *head* H_2 e nova potência BHP_2 . A nova vazão de bombeio varia diretamente com a variação da frequência, Equação (2). O novo *head* será proporcional ao quadrado da frequência, Equação (3). A nova potência será proporcional ao cubo da frequência, Equação (4). A eficiência da bomba não sofre alteração com a mudança de frequência (Takacs,2009).

$$q_2 = q_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad (2)$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (3)$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^3 \quad (4)$$

2.2.5 Presença de Gás Livre

A presença de gás livre na sucção afeta o desempenho das bombas centrífugas, causando problemas como a diminuição do *head*, *surging* e *gas locking*. No *surging* ocorre à redução da capacidade de bombeamento. E com o aumento da quantidade de gás ocorre o *gas locking*, ou seja, o bloqueio total e conseqüente parada do

bombeamento. De acordo com Takacs (2009), curvas de desempenho de bombas operando com água e fluidos gaseificados podem ser obtidas através de estudos e experimentos (Figura 2.18). Através dela é possível perceber que o *head* da bomba diminui na presença de gás, no entanto, para valores de vazões inferiores ao BEP (ponto de melhor eficiência da bomba), a operação é instável, e com a mudança da massa específica da mistura, ocasionada pelo escoamento irregular no impelidor, pode ocorrer o *surging*.

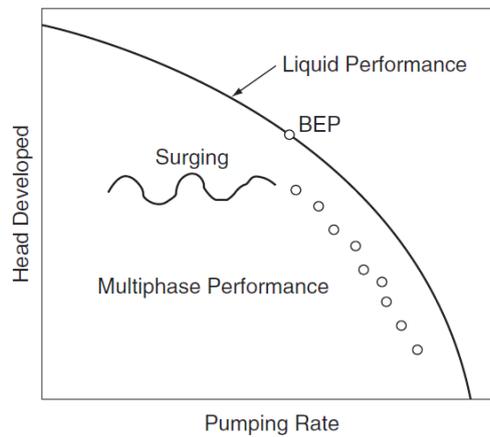


Figura 2.18: Tendência de Degradação do *head*. Fonte: Takacs (2009)

Estudos mostraram que a presença de gás livre afeta o impelidor, e não tem efeitos significativos no difusor. Quando a fase gasosa se encontra dispersa no líquido o efeito negativo é basicamente o aumento do volume de fluido que a bomba deverá manusear, e conseqüentemente a redução do *head*. No entanto, o fluxo no impelidor em situações reais não é homogêneo devido a grande diferença de densidades entre as fases (Takacs, 2009).

Idealmente, a melhor maneira para produzir fluidos multifásicos sem afetar a bomba seria mantendo-se a pressão de sucção da bomba acima da pressão de saturação do óleo, contudo isso não é viável por causa da diminuição da vazão de produção. Para avaliar os limites estáveis de operação da bomba com a presença de gás, Turpin desenvolveu a Equação (5), para $\phi < 1$ a operação da bomba será estável.

$$\phi = \frac{2000 \frac{q_g'}{q_l'}}{3 PIP} \quad (5)$$

Onde q'_g é a vazão volumétrica de gás na sucção da bomba em bpd, q'_l é a vazão volumétrica de líquido na sucção da bomba em bpd, e PIP é a pressão de sucção da bomba em psia.

Alguns equipamentos podem ser utilizados para viabilizar a produção com a presença de gás livre, como separadores de gás estacionários e rotativos, descritos no tópico 2.1.2.3, e manuseadores de gás. Os manuseadores de gás são dispositivos especiais conectados a montante da bomba, que melhoram a tolerância da bomba com o gás livre. O manuseador de gás consiste em uma bomba centrífuga menor com múltiplos estágios que atua como uma bomba de reforço, ele recircula o fluido fazendo com que as bolhas de gás diminuam e o fluido seja homogeneizado. Segundo Takacs (2009), o *Poseidon* (Figura 2.19), um recente manuseador de gás de um fabricante líder, contém impulsores com pás hélico-axiais e difusores, os quais fornecem um fluxo axial suave e asseguram uma quase homogênea distribuição das partículas do gás no líquido. O manuseador de gás pode lidar com até 75 % de gás livre, no entanto apresenta como desvantagem a perda de eficiência devido à dissipação de energia pela recirculação do fluido.



Figura 2.19: Manuseador de Gás *Poseidon*. Fonte: Schlumberger (2012)

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Bombas são amplamente utilizadas na indústria em diferentes aplicações. Mesmo com a mudança da velocidade do impelidor, não é sempre que apenas uma bomba consegue atender a necessidade devido a uma grande variação da altura manométrica e/ou vazão, por isso é necessário à associação de bombas em série ou paralelo (Macintyre, 1997).

Inicialmente, esse capítulo abordará a associação de bombas em paralelo e série, e a descrição da maneira de se obter as curvas para cada tipo de associação. Em seguida é descrito o procedimento realizado para obtenção de uma planilha no programa *Microsoft Office Excel*. A planilha desenvolvida fornece as curvas para associação de duas bombas BCS em série.

3.1 Associações em Paralelo

A associação de bombas BCS em paralelo possui várias aplicações e vantagens, principalmente em ambientes *offshore*. Os sistemas em paralelo são ligados à coluna da tubulação por 'Y-tools', os quais tornam possível a utilização do sistema ao mesmo tempo ou utilização alternada das bombas (Takacs, 2009). A Figura 3.1 mostra três formas de utilização da associação de bombas em paralelo, (a) apenas a bomba inferior está operando, (b) apenas a bomba superior está operando, e (c) as duas bombas estão operando.

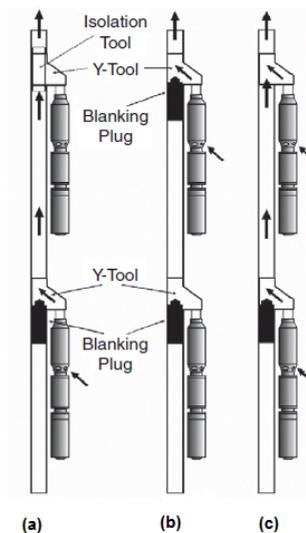


Figura 3.1: Associação em Paralelo de Duas Bombas BCS. Fonte: Adaptado Takacs (2009).

Esse tipo de associação é utilizada quando a vazão exigida é muito elevada, ou quando a vazão exigida é variável. Quando utilizada para vazões elevadas, a associação em paralelo fornece como benefícios a segurança operacional, pois se uma das bombas falhar o sistema não deixará de produzir, apenas terá a vazão reduzida. No caso da vazão exigida ser variável, a associação de bombas fornecerá flexibilidade operacional, com a colocação ou retirada de bombas em funcionamento para conseguir as vazões exigidas com boa eficiência (Mattos & Falco, 1998). Em poços com restrições na superfície ou no fundo do poço, a associação em paralelo também pode ser utilizada.

Para esse tipo de associação as pressões de sucção e descarga são aproximadamente iguais para todas as bombas. A associação em paralelo pode ser realizada com bombas iguais ou diferentes. Devido à perda de carga, a associação de duas bombas iguais não significa que a capacidade de vazão irá ser o dobro.

Ao se utilizar esse tipo de associação é aconselhável optar por bombas iguais, deve-se selecionar as bombas tendo cuidado para que a altura manométrica máxima do sistema nunca ultrapasse a vazão zero de qualquer uma das bombas, e selecionar um motor capaz de atender as variações que possam ocorrer com a retirada ou adição de bombas em funcionamento (Mattos & Falco, 1998).

3.1.1 Curvas Características para Associações em Paralelo

A partir do princípio que as bombas associadas em paralelo estão sujeitas a mesma altura manométrica, a curva característica para a associação pode ser obtida através da soma das vazões de cada bomba correspondentes a um mesmo valor de *head* (H), a Figura 3.2 ilustra a obtenção da curva característica para associação em paralelo.

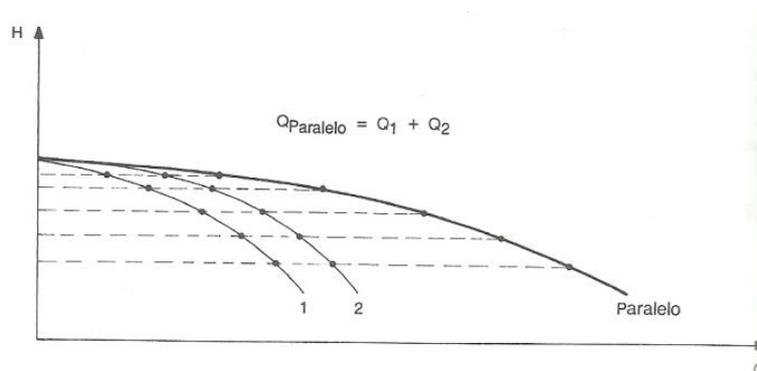


Figura 3.2: Curva Característica Associação em Paralelo. Fonte: Mattos & Falco (1998)

A curva da potência absorvida pela bomba pode ser obtida pela soma das potências de cada bomba individualmente (6).

$$BHP_{ass} = BHP_1 + BHP_2 \quad (6)$$

Através da potência absorvida (6), a eficiência da associação (7) pode ser obtida:

$$\frac{q_{ass} \gamma H_{ass}}{\eta_{ass}} = \frac{q_1 \gamma H_1}{\eta_1} + \frac{q_2 \gamma H_2}{\eta_2}$$

Como o peso específico γ é constante, e $H_{ass} = H_1 = H_2$:

$$\eta_{ass} = \frac{Q_{ass}}{\frac{Q_1}{\eta_1} + \frac{Q_2}{\eta_2}} \quad (7)$$

3.2 Associações em Série

A principal razão para se associar bombas em série é a necessidade em se elevar fluidos de alturas manométricas muito elevadas, aumento do *head*, quando o uso de apenas uma bomba não é viável por motivos técnicos e/ou econômicos. Um dos motivos técnicos é a falta de disponibilidade da bomba necessária no mercado, e um dos econômicos é o alto custo de uma única bomba para atender a necessidade quando comparado com o custo de duas bombas que ao serem associadas satisfaçam as condições exigidas. Além disso, em muitos casos a associação é utilizada devido à economia e flexibilidade, ao possibilitar que um mesmo modelo de bomba que se encontra no estoque possa ser utilizado para poços rasos ou profundos.

Para se associar bombas em série a descarga de uma bomba deve ser conectada à sucção da seguinte, fazendo com que a vazão seja a mesma para todas as bombas, no entanto, a pressão de descarga será a soma de cada uma das unidades (Mattos & Falco, 1998). Da mesma forma como na associação em paralelo, à associação em série pode ser feita com bombas iguais ou diferentes, no entanto, recomenda-se utilizar sempre que possível bombas idênticas por flexibilizar a manutenção e reposição de peças.

É importante destacar que bombas de múltiplos estágios são bombas que funcionam como uma associação de várias bombas em série, pois são vários impelidores conectados em série em uma mesma carcaça.

Em sistemas BCS, as instalações de bombas em série utilizam uma válvula denominada 'Auto Flow Sub' para cada bomba associada, Figura 3.3. Essas válvulas são automáticas e permitem flexibilidade no modo de operação das bombas, podendo ser utilizadas as duas bombas ao mesmo tempo ou o uso alternado de cada bomba de acordo com a necessidade. Ao ser desligada uma das bombas BCS, a válvula permite o fluxo pelo anular ou através da outra bomba BCS. Quando as duas bombas são ligadas ao mesmo tempo permite vantagens como a produção da mesma vazão de líquido de profundidades maiores, ou maior vazão de produção de uma mesma profundidade. A operação alternada das bombas apresenta flexibilidade em se alterar a vazão de produção do poço de acordo com a necessidade, além de economia por evitar a parada da produção no caso de alguma das bombas falhar (Takacs, 2009).

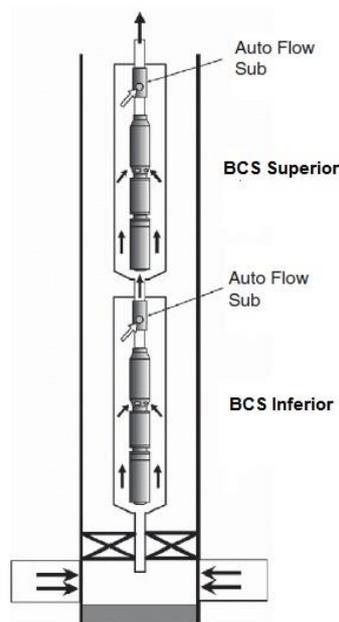


Figura 3.3: Associação em Série de Bombas BCS. Fonte: Adaptado Takacs (2009)

A associação em série também pode ser realizada na forma de bombas redundantes, tendo como vantagem o aumento do MTTF (*Mean Time To Failure*). Outra vantagem da associação em série, é a utilização em poços de fluxo multifásico, nesse caso é viável a instalação de uma bomba com maior capacidade de vazão na parte

inferior para lidar com maior vazão devido o gás está livre, e uma de menor capacidade na parte superior, onde ocorre o fluxo monofásico.

Ao se associar bombas em série deve-se ter cuidado e verificar a resistência mecânica das bombas, pois as bombas devem ser capazes de suportar a pressão desenvolvida pelas bombas anteriores.

3.2.1 Curvas Características para Associações em Série

A curva característica para uma associação de bombas em série é obtida através da soma da altura manométrica, *head*, correspondentes aos mesmos valores de vazão. A curva para associação de duas bombas diferentes em série é ilustrada na Figura 3.4, nela é possível perceber que ao se associar bombas em série há o incremento do *head*, e, além disso, há o aumento da vazão de operação com a associação em série, em relação à vazão de operação de cada bomba quando operam separadamente.

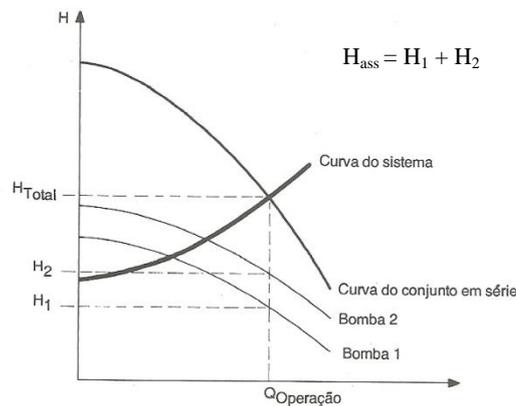


Figura 3.4: Curva Característica Associação em Série. Fonte: Mattos & Falco (1998)

A curva da potência absorvida pela bomba é obtida da mesma maneira que a da associação em paralelo, pela soma das potências de cada bomba individualmente, Equação (6). A eficiência da associação (8), também é obtida através da potência absorvida pela bomba.

$$\frac{q_{ass} \gamma H_{ass}}{\eta_{ass}} = \frac{q_1 \gamma H_1}{\eta_1} + \frac{q_2 \gamma H_2}{\eta_2}$$

Como o peso específico γ é constante, e $Q_{ass} = Q_1 = Q_2$:

$$\eta_{ass} = \frac{H_{ass}}{\frac{H_1}{\eta_1} + \frac{H_2}{\eta_2}} \quad (8)$$

3.3 Procedimeto para Obter a Curva Característica da Associação em Série Através do Programa *Microsoft Office Excel*

A determinação da curva característica da bomba é de grande importância para análise do sistema BCS. Como os fabricantes não fornecem as curvas para associação de bombas é necessário o desenvolvimento de uma metodologia que facilite a obtenção da curva para esse tipo de associação.

Para se obter a curva característica para associação de bombas BCS em série foi utilizado o programa *Microsoft Office Excel* para se elaborar uma planilha de modo que ao inserir os dados das bombas que se deseja associar ela gere a curva característica para associação.

Como foi mencionado anteriormente no tópico 2.2.3, a curva característica para uma única bomba é obtida através de ensaios em laboratório e é fornecida pelo fabricante, na forma gráfica ou através de polinômios. Cada bomba possui um polinômio para o *head* e outro para o BHP. A forma geral para o polinômio do *head* e do BHP para apenas um estágio da bomba é representado nas Equações (9) e (10), respectivamente. A curva de eficiência da bomba pode ser obtida através da Equação (11).

$$H = A q^5 + B q^4 + C q^3 + D q^2 + E q^1 + F \quad (9)$$

$$BHP = A q^5 + B q^4 + C q^3 + D q^2 + E q^1 + F \quad (10)$$

$$\eta = \frac{100 \cdot \gamma_w \cdot q \cdot 0,649836 \cdot 10^{-4} \cdot H}{550 \cdot BHP} \quad (11)$$

Onde A, B, C, D, E, F são fatores que variam de acordo com a bomba, e são diferentes para o *head* e o BHP, q é a vazão em bpd, H é o *head* em ft, BHP é a potência absorvida pela bomba em HP, η é a eficiência em %, e γ_w é o peso específico da água igual a 62,43 lb/ft³.

A planilha elaborada utiliza como dados de entrada as características de cada bomba. Os dados de entrada que devem ser obrigatoriamente informados para cada bomba são os fatores dos polinômios do *head* e do BHP, a vazão máxima, e o número de estágios. Além disso, por questão de organização a planilha possui um espaço onde pode ser informada para cada bomba a referência da bomba, o fabricante, o ponto de melhor eficiência (BEP), e o range mínimo e máximo. A interface dos parâmetros de entrada é mostrada na Figura 3.5.

BOMBA 1: GC2900 - Baker			BOMBA 2: P22 - Baker				
Range Mínimo:	2000 bpd	Número de Estágios:	167	Range Mínimo:	1200 bpd	Número de Estágios:	120
Range Máximo:	3700 bpd			Range Máximo:	2900 bpd		
BEP:	3000 bpd			BEP:	2200 bpd		
Vazão Máxima:	5065 bpd			Vazão Máxima:	3715 bpd		
	Head	BHP			Head	BHP	
A	8,45E-17	-1,28E-18		A	0	0	
B	-8,86E-13	1,73E-14		B	-1,44E-13	3,20E-15	
C	2,59E-09	-7,80E-11		C	2,16E-10	-1,68E-11	
D	-2,76E-06	9,84E-08		D	-1,64E-06	-3,21E-08	
E	-0,00427047	0,000138		E	0,00131691	0,000283	
F	57,7	0,972855		F	34,2253	0,384062	

Figura 3.5: Interface Planilha Parâmetros de Entrada

Foram elaboradas três tabelas para organização dos parâmetros calculados para gerar as curvas, Figura 3.6, uma para cada bomba e outra para associação de bombas em série. Cada tabela possui o número de pontos utilizados para gerar a curva, o qual corresponde a 150 pontos, sendo calculado para cada um a vazão, *head*, BHP, e eficiência.

BOMBA 1					BOMBA 2					ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE				
Nº Pontos	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Eficiência (%)	Nº Pontos	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Eficiência (%)	Nº Pontos	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Eficiência (%)
1	24,76666667	9617,96	163,05	1,077639162	1	24,76666667	9043,82	103,23	1,600401609	1	24,76667	18661,78595	266,28	1,280309
2	49,53333333	9599,50	163,85	2,143269644	2	49,53333333	9051,64	105,07	3,147729364	2	49,53333	18651,13976	268,71	2,5360129
3	74,3	9580,54	164,26	3,196512312	3	74,3	9058,94	106,89	4,644929395	3	74,3	18639,48274	271,15	3,7674765
4	99,06666667	9561,13	164,90	4,23704653	4	99,06666667	9065,72	108,69	6,094745558	4	99,06667	18626,85539	273,59	4,9750934
5	123,8333333	9541,30	165,54	5,264607035	5	123,8333333	9071,99	110,49	7,499731199	5	123,8333	18613,29653	276,04	6,1592823
6	148,6	9521,09	166,21	6,278990809	6	148,6	9077,75	112,28	8,862269987	6	148,6	18598,8434	278,48	7,3204827
7	173,3666667	9500,53	166,88	7,280003976	7	173,3666667	9083,00	114,05	10,18458712	7	173,3667	18583,53162	280,93	8,4591522
8	198,1333333	9479,64	167,57	8,267558719	8	198,1333333	9087,75	115,81	11,46876241	8	198,1333	18567,39523	283,38	9,5757631
9	222,9	9458,47	168,27	9,241570255	9	222,9	9092,00	117,55	12,71674167	9	222,9	18550,46671	285,83	10,6708
10	247,6666667	9437,03	168,99	10,20200387	10	247,6666667	9095,75	119,28	13,93034693	10	247,6667	18532,77699	288,27	11,744755
11	272,4333333	9415,35	169,71	11,14866202	11	272,4333333	9099,00	121,00	15,112858	11	272,4333	18514,35543	290,71	12,79813
12	297,2	9393,47	170,44	12,08218154	12	297,2	9101,76	122,70	16,26115396	12	297,2	18495,2299	293,14	13,83143
13	321,9666667	9371,40	171,17	13,00203089	13	321,9666667	9104,03	124,39	17,38147278	13	321,9667	18475,42676	295,57	14,845162
14	346,7333333	9349,17	171,92	13,90850755	14	346,7333333	9105,80	126,07	18,47363642	14	346,7333	18454,97088	297,98	15,839936
15	371,5	9326,80	172,67	14,80173553	15	371,5	9107,08	127,72	19,53897814	15	371,5	18433,88563	300,39	16,81596
16	396,2666667	9304,32	173,42	15,68186286	16	396,2666667	9107,87	129,37	20,57874623	16	396,2667	18412,19297	302,79	17,77404

Figura 3.6: Interface Planilha Parâmetros Calculados

A vazão máxima da bomba de menor capacidade foi utilizada como referência para gerar os gráficos. Por isso, de forma incremental, foi determinado para cada ponto à vazão correspondente utilizando a Equação (12), onde $q_{m\acute{a}x}$ é a vazão máxima da bomba que possui menor capacidade de vazão em bpd, q_{ant} é a vazão do ponto anterior em bpd, e o N°_{pontos} é o número total de pontos utilizados na planilha, o qual equivale a 150.

$$q = \frac{q_{m\acute{a}x}}{N^{\circ}_{pontos}} + q_{ant} \quad (12)$$

O head e o BHP para cada bomba foram obtidos multiplicando o número de estágios pelas Equações (9) e (10), respectivamente. A eficiência foi obtida através da Equação (11). Para associação de bombas em série, o head (13) e o BHP (14) foram obtidos através da soma dos polinômios multiplicados pelo número de estágios de cada bomba. A eficiência da associação foi obtida através da Equação (8).

$$H = (A_1 N^{\circ}_{est1} + A_2 N^{\circ}_{est2}) q^5 + (B_1 N^{\circ}_{est1} + B_2 N^{\circ}_{est2}) q^4 + (C_1 N^{\circ}_{est1} + C_2 N^{\circ}_{est2}) q^3 + (D_1 N^{\circ}_{est1} + D_2 N^{\circ}_{est2}) q^2 + (E_1 N^{\circ}_{est1} + E_2 N^{\circ}_{est2}) q^1 + (F_1 N^{\circ}_{est1} + F_2 N^{\circ}_{est2}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 BHP = & (A_1 N_{est1}^0 + A_2 N_{est2}^0) q^5 + (B_1 N_{est1}^0 + B_2 N_{est2}^0) q^4 + (C_1 N_{est1}^0 + C_2 N_{est2}^0) q^3 + (D_1 N_{est1}^0 + D_2 N_{est2}^0) q^2 + (E_1 N_{est1}^0 + E_2 N_{est2}^0) q^1 + (F_1 N_{est1}^0 + F_2 N_{est2}^0)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

A planilha gera seis gráficos, Figura 3.7: curvas para bomba 1, curvas para bomba 2, curvas para associação de bombas em série, comparação do *head*, comparação do BHP, e comparação da eficiência.

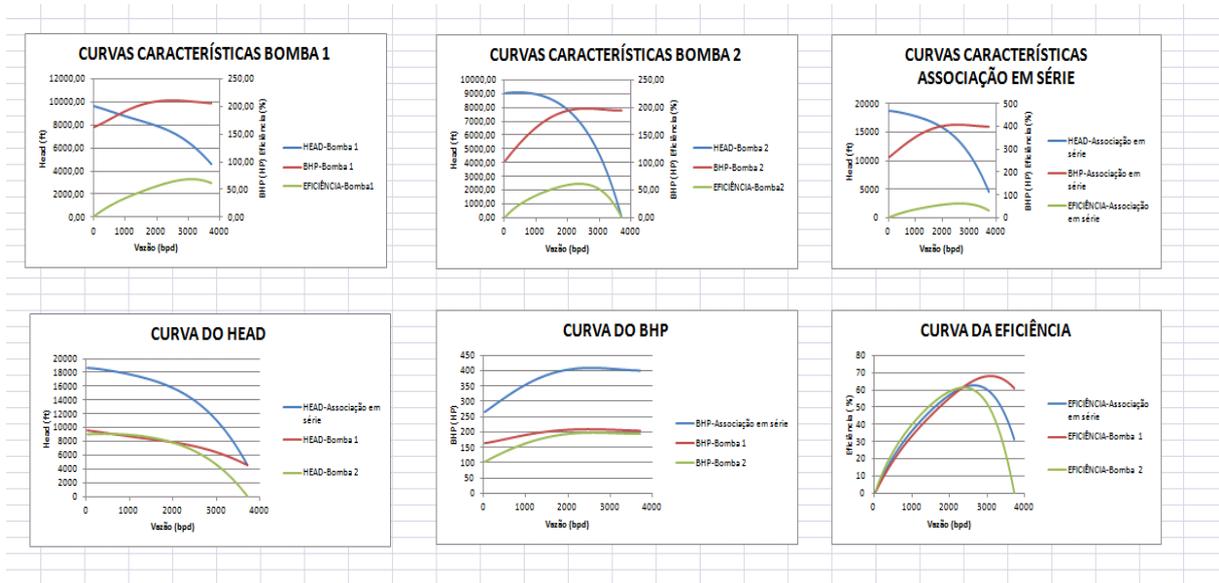


Figura 3.7: Interface Planilha dos Gráficos Obtidos

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da planilha desenvolvida no programa *Microsoft Office Excel*, foi realizada a associação para duas bombas com características diferentes. As bombas escolhidas foram a GC2900 e a P22, ambas da Baker. Os seus parâmetros são apresentados na Tabela 1, e os fatores dos polinômios na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros das Bombas Utilizadas

BOMBA :	GC2900 - Baker	P22- Baker
RANGE MÍNIMO:	2000 bpd	1200 bpd
RANGE MÁXIMO:	3700 bpd	2900 bpd
BEP:	3000 bpd	2200 bpd
VAZÃO MÁXIMA:	5065 bpd	3715 bpd
NÚMERO DE ESTÁGIOS:	167	120

Tabela 2: Fatores dos Polinômios das Bombas Utilizadas

	GC2900		P22	
	Head	BHP	Head	BHP
A	8,45 E-17	-1,28E-18	0	0
B	-8,86E-13	1,73E-14	-1,44E-13	3,20E-15
C	2,59E-09	-7,80E-11	2,16E-10	-1,68E-11
D	-2,76E-06	9,84E-08	-1,64E-06	-3,21E-08
E	-0,00427047	0,000138	0,00131691	0,000283
F	57,7	0,972855	34,2253	0,384062

Foram obtidas três tabelas com os parâmetros calculados para obtenção das curvas, para a bomba 1 (Anexo D), bomba 2 (Anexo II), e para a associação em série (Anexo III). A Figura 4.1 apresenta o gráfico com as curvas obtidas para a bomba 1, nela é possível observar o *head*, o BHP e a eficiência. A faixa de operação da bomba é delimitada pela faixa translúcida azul, e o ponto de melhor eficiência é representado

pela linha laranja. Da mesma forma, foram obtidas as curvas do *head*, BHP e eficiência para bomba 2, Figura 4.2, nela também é possível visualizar a faixa de operação da bomba e o ponto de melhor eficiência.

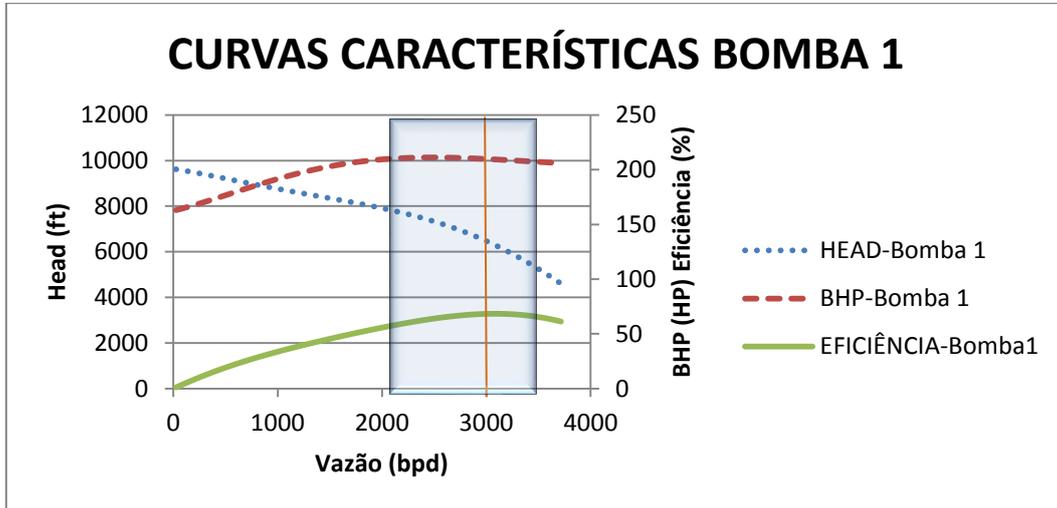


Figura 4.1: Curvas Características Bomba 1

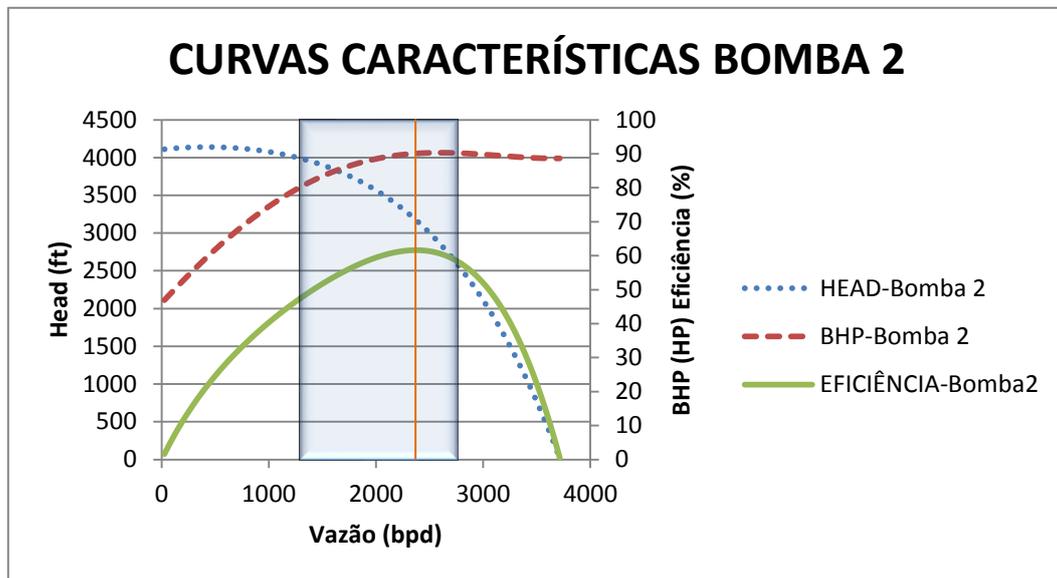


Figura 4.2: Curvas Características Bomba 2

As curvas para associação de bombas BCS em série é mostrada na Figura 4.3. Através da análise do gráfico é possível perceber que a faixa de operação da associação de bombas diminuiu em relação à de cada bomba separadamente, o range mínimo da faixa de operação para associação em série é o maior valor de range mínimo das bombas utilizadas, e o range máximo é o menor valor de range máximo das bombas utilizadas . A linha laranja mostra o ponto de melhor eficiência para associação, o qual é de aproximadamente 2775 bpd.

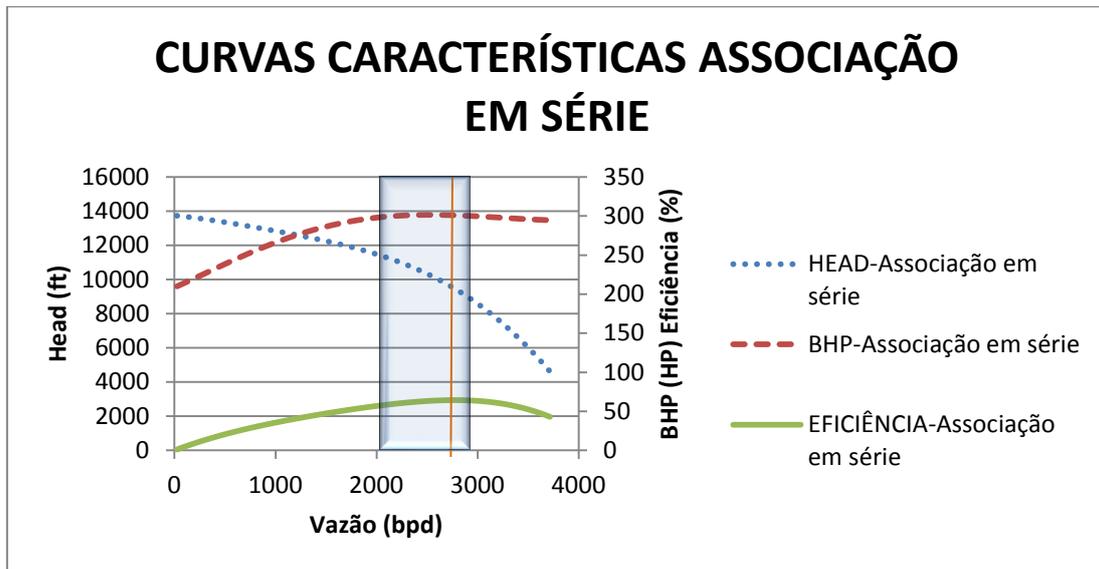


Figura 4.3: Curvas Características Associação de Bombas em Série

A Figura 4.4 apresenta as curvas do *head* para cada bomba separadamente e para associação em série das duas bombas. A principal razão de se utilizar a associação foi alcançado, aumento do *head*, como mostra o gráfico. A bomba 1 utilizada é capaz de elevar fluidos de alturas manométricas maiores que a bomba 2, por isso a sua contribuição é maior para a curva da associação, a qual, como já mencionada, é a soma do *head* das duas bombas para o mesmo valor de vazão .

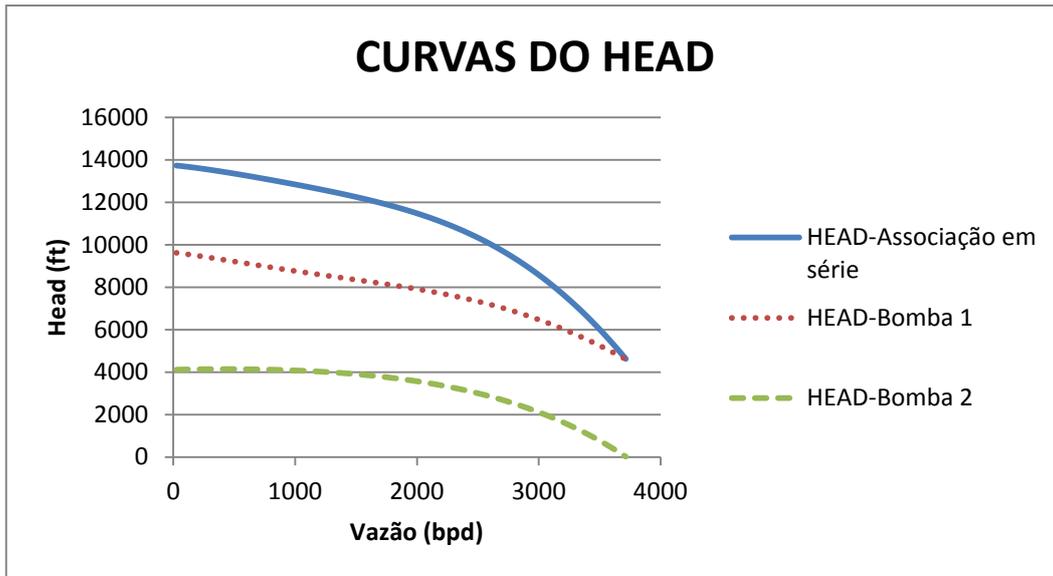


Figura 4.4: Comparação do Head das Bombas Individualmente e das Bombas Associadas

O gráfico da Figura 4.5, compara a potência consumida por cada bomba individualmente com a potência consumida quando as mesmas são associadas. É possível perceber que a bomba 1 consome mais potência quando comparada com a bomba 2. É possível perceber também, que o sistema com associação em série consumirá mais potência do que uma única bomba isoladamente, e que essa potência é a soma das potências de cada uma das bombas utilizadas para um mesmo valor de vazão.

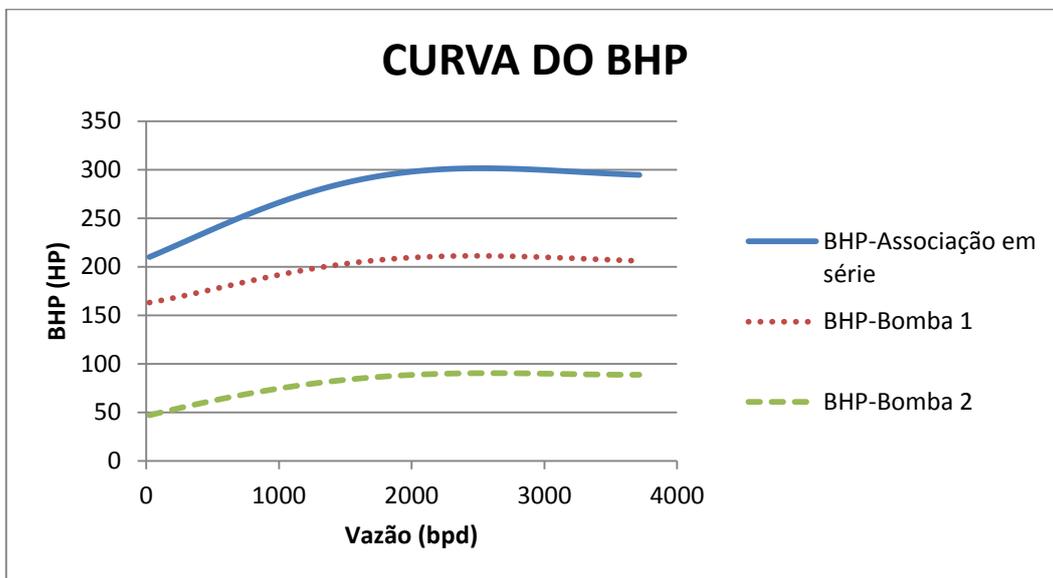


Figura 4.5: Comparação do BHP das Bombas Individualmente e das Bombas Associadas

A eficiência das bombas individualmente e da associação em série é comparada na Figura 4.6. É possível perceber que a bomba 1 possui maior eficiência quando comparada com a bomba 2. A curva da eficiência para associação em série é praticamente a mesma que a da bomba 1 até aproximadamente a vazão de 2300 bpd, após esse ponto, a eficiência da associação alcança valores médios entre as eficiências das duas bombas isoladamente. Pode-se concluir que na associação em série a eficiência da associação é uma média ponderada entre as eficiências das bombas, o que pode ser confirmado através dos pontos de melhor eficiência de cada bomba destacados nas curvas.

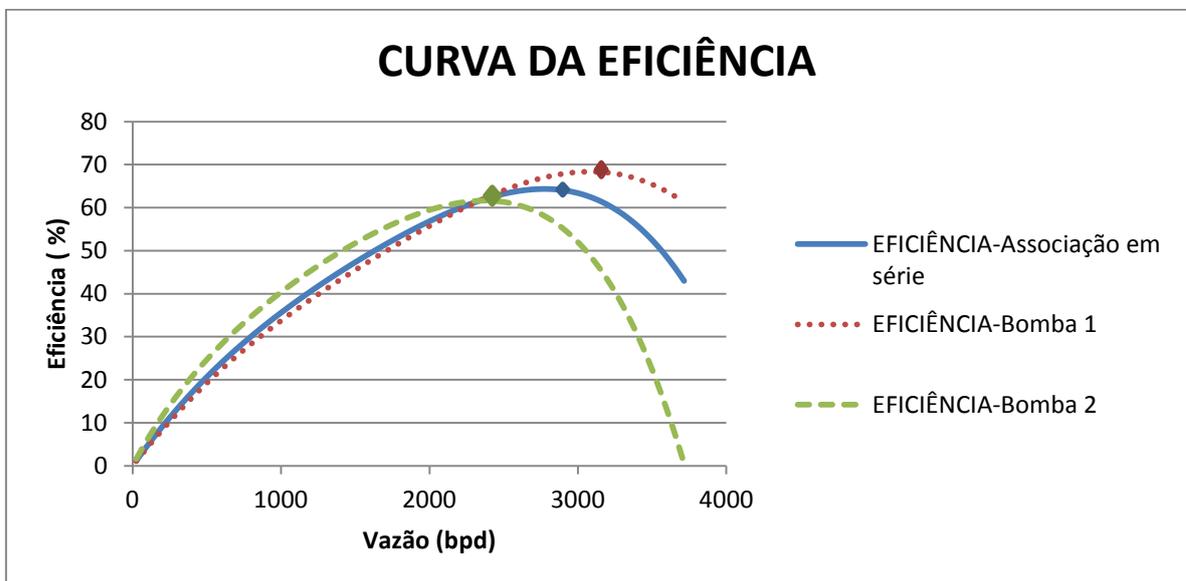


Figura 4.6: Comparação da Eficiência das Bombas Individualmente e das Bombas Associadas

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o procedimento de cálculo para obtenção da curva equivalente para associação de bombas BCS em série através de uma planilha do programa *Microsoft Office Excel*. A planilha elaborada possibilita obter as curvas do *head*, potência absorvida pela bomba e eficiência para cada bomba utilizada individualmente, e para associação das bombas em série. Além disso, a planilha fornece gráficos onde se pode comparar o *head*, a potência e a eficiência entre o uso das bombas individualmente e o uso das mesmas associadas em série.

O trabalho apresenta os motivos que levam a se associar as bombas BCS, vantagens em se usar esse tipo de sistema, e o cuidado que se deve ter ao se utilizar. São descritas as equações utilizadas para se obter as curvas, e apresentadas às interfaces dos parâmetros de entrada, parâmetros calculados, e dos gráficos obtidos.

Utilizando-se a planilha elaborada, foi realizada a associação de duas bombas BCS em série com características diferentes de um mesmo fabricante. Foram gerados seis gráficos, e discutidos os resultados da associação. Foi possível observar que a associação em série é uma boa solução para satisfazer a necessidade de se elevar fluidos de alturas manométricas elevadas, e que além das vantagens técnicas esse tipo de sistema pode representar redução de custos com a compra de bombas mais caras ao se utilizar equipamentos existentes em estoque. No entanto, esse tipo de associação pode gerar uma redução da eficiência quando comparado com algumas bombas que operam individualmente.

A associação de bombas BCS em série é uma importante ferramenta que pode ser utilizada em sistemas BCS por apresentar várias vantagens, entre elas o aumento do MTTF. Através das curvas para associação e para as bombas usadas individualmente, é possível analisar se para determinada aplicação o uso desse sistema é viável no ponto de vista técnico e econômico. Portanto, a planilha desenvolvida no programa *Microsoft Office Excel* para obtenção da curva equivalente para associação de bombas BCS em série pode ser considerada uma ferramenta para análise e compreensão do funcionamento de bombas operando nesse tipo de sistema.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, R. de O. *Controle Aplicado a Poços com Método de Elevação Bombeio Centrífugo Submerso*. 2012, 160 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo,2012.

MACINTYRE, A. J. *Bombas e Instalações de Bombeamento*, Ed. Guanabara Dois, 2^a edição, Rio de Janeiro, 1997.

MAITELLI, C. W. S. de P. *Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional*. 2010, 182 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, 2010.

MATTOS, E.E. & FALCO, R. (1998). *Bombas Industriais*. Rio de Janeiro: Interciência.

PRADO, M. G. *Transparências do curso electrical submersible pumping - PETROBRAS*, agosto, 2007, RJ, Brasil.

TAKACS, G. *Electrical submersible pumps manual: design, operations and maintenance*. Gulf Professional Publishing, 2009.

THOMAS, J. E. *Fundamentos da engenharia de petróleo*. Segunda edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

ANEXO I- TABELA PARÂMETROS CALCULADOS BOMBA 1

Tabela A-I: Parâmetros Bomba 1

BOMBA 1				
Nº Pontos	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Eficiência(%)
1	24,76666667	9617,96	163,05	1,077639162
2	49,53333333	9599,50	163,65	2,143269644
3	74,3	9580,54	164,26	3,196512312
4	99,06666667	9561,13	164,90	4,23704653
5	123,8333333	9541,30	165,54	5,264607035
6	148,6	9521,09	166,21	6,278980809
7	173,3666667	9500,53	166,88	7,280003976
8	198,1333333	9479,64	167,57	8,267558719
9	222,9	9458,47	168,27	9,241570255
10	247,6666667	9437,03	168,99	10,20200387
11	272,4333333	9415,35	169,71	11,14886202
12	297,2	9393,47	170,44	12,08218154
13	321,9666667	9371,40	171,17	13,00203089
14	346,7333333	9349,17	171,92	13,90850755
15	371,5	9326,80	172,67	14,80173553
16	396,2666667	9304,32	173,42	15,68186286
17	421,0333333	9281,74	174,18	16,5490594
18	445,8	9259,09	174,95	17,4035145
19	470,5666667	9236,38	175,71	18,24543502
20	495,3333333	9213,63	176,48	19,07504327
21	520,1	9190,86	177,25	19,89257513
22	544,8666667	9168,08	178,02	20,6982783
23	569,6333333	9145,31	178,79	21,4924106
24	594,4	9122,56	179,56	22,27523838
25	619,1666667	9099,84	180,33	23,04703505
26	643,9333333	9077,16	181,09	23,80807968
27	668,7	9054,53	181,86	24,55865572
28	693,4666667	9031,97	182,62	25,29904973
29	718,2333333	9009,49	183,37	26,02955032
30	743	8987,08	184,12	26,75044703

31	767,7666667	8964,76	184,87	27,46202935
32	792,5333333	8942,53	185,61	28,16458586
33	817,3	8920,40	186,35	28,85840333
34	842,0666667	8898,38	187,08	29,54376595
35	866,8333333	8876,46	187,80	30,22095462
36	891,6	8854,65	188,52	30,89024628
37	916,3666667	8832,94	189,23	31,55191325
38	941,1333333	8811,36	189,93	32,20622274
39	965,9	8789,88	190,62	32,85343625
40	990,6666667	8768,51	191,30	33,49380914
41	1015,433333	8747,26	191,98	34,12759019
42	1040,2	8726,11	192,64	34,75502114
43	1064,966667	8705,08	193,30	35,3763364
44	1089,733333	8684,14	193,94	35,99176266
45	1114,5	8663,31	194,58	36,60151861
46	1139,266667	8642,57	195,21	37,20581462
47	1164,033333	8621,92	195,82	37,80485254
48	1188,8	8601,36	196,42	38,39882543
49	1213,566667	8580,87	197,02	38,98791736
50	1238,333333	8560,46	197,60	39,5723032
51	1263,1	8540,11	198,16	40,15214848
52	1287,866667	8519,82	198,72	40,72760922
53	1312,633333	8499,57	199,27	41,29883176
54	1337,4	8479,37	199,80	41,86595267
55	1362,166667	8459,19	200,32	42,42909862
56	1386,933333	8439,04	200,83	42,98838626
57	1411,7	8418,89	201,33	43,54392215
58	1436,466667	8398,74	201,81	44,09580268
59	1461,233333	8378,58	202,28	44,64411395
60	1486	8358,39	202,74	45,18893177
61	1510,766667	8338,17	203,19	45,73032153
62	1535,533333	8317,90	203,62	46,26833822
63	1560,3	8297,56	204,04	46,80302632
64	1585,066667	8277,15	204,45	47,3344198
65	1609,833333	8256,65	204,84	47,86254207
66	1634,6	8236,05	205,23	48,38740597
67	1659,366667	8215,33	205,60	48,90901372
68	1684,133333	8194,48	205,95	49,4273569
69	1708,9	8173,48	206,29	49,94241649
70	1733,666667	8152,32	206,63	50,45416278
71	1758,433333	8130,98	206,94	50,96255543
72	1783,2	8109,45	207,25	51,46754345

73	1807,966667	8087,72	207,54	51,96906518
74	1832,733333	8065,75	207,82	52,46704834
75	1857,5	8043,55	208,09	52,96141003
76	1882,266667	8021,09	208,35	53,45205672
77	1907,033333	7998,36	208,59	53,93888433
78	1931,8	7975,33	208,82	54,42177819
79	1956,566667	7952,00	209,04	54,90061313
80	1981,333333	7928,35	209,25	55,37525353
81	2006,1	7904,36	209,44	55,84555328
82	2030,866667	7880,01	209,63	56,31135595
83	2055,633333	7855,28	209,80	56,77249474
84	2080,4	7830,16	209,96	57,22879264
85	2105,166667	7804,64	210,11	57,68006243
86	2129,933333	7778,69	210,25	58,12610679
87	2154,7	7752,29	210,38	58,56671841
88	2179,466667	7725,44	210,50	59,00168006
89	2204,233333	7698,11	210,60	59,43076468
90	2229	7670,28	210,70	59,85373555
91	2253,766667	7641,94	210,79	60,27034636
92	2278,533333	7613,08	210,86	60,68034139
93	2303,3	7583,67	210,93	61,0834556
94	2328,066667	7553,70	210,99	61,47941487
95	2352,833333	7523,15	211,04	61,86793608
96	2377,6	7492,01	211,08	62,24872734
97	2402,366667	7460,25	211,11	62,62148818
98	2427,133333	7427,87	211,13	62,98590975
99	2451,9	7394,85	211,14	63,34167503
100	2476,666667	7361,17	211,15	63,68845907
101	2501,433333	7326,81	211,15	64,02592925
102	2526,2	7291,77	211,14	64,3537455
103	2550,966667	7256,02	211,12	64,67156064
104	2575,733333	7219,56	211,09	64,97902061
105	2600,5	7182,36	211,06	65,27576481
106	2625,266667	7144,42	211,02	65,56142642
107	2650,033333	7105,72	210,98	65,83563274
108	2674,8	7066,24	210,92	66,09800554
109	2699,566667	7025,98	210,87	66,34816142
110	2724,333333	6984,91	210,80	66,58571224
111	2749,1	6943,04	210,73	66,8102655
112	2773,866667	6900,34	210,66	67,02142476
113	2798,633333	6856,81	210,58	67,2187901
114	2823,4	6812,43	210,49	67,40195857

115	2848,166667	6767,20	210,40	67,57052468
116	2872,933333	6721,09	210,31	67,72408089
117	2897,7	6674,12	210,21	67,8622181
118	2922,466667	6626,25	210,11	67,98452623
119	2947,233333	6577,49	210,00	68,09059474
120	2972	6527,84	209,89	68,1800132
121	2996,766667	6477,27	209,78	68,25237187
122	3021,533333	6425,78	209,66	68,30726231
123	3046,3	6373,37	209,54	68,34427801
124	3071,066667	6320,03	209,42	68,36301498
125	3095,833333	6265,76	209,30	68,36307245
126	3120,6	6210,55	209,17	68,3440535
127	3145,366667	6154,40	209,04	68,30556575
128	3170,133333	6097,30	208,91	68,24722207
129	3194,9	6039,25	208,78	68,16864126
130	3219,666667	5980,25	208,65	68,06944876
131	3244,433333	5920,30	208,51	67,94927744
132	3269,2	5859,39	208,38	67,80776827
133	3293,966667	5797,54	208,24	67,64457112
134	3318,733333	5734,73	208,10	67,45934549
135	3343,5	5670,97	207,96	67,25176131
136	3368,266667	5606,26	207,83	67,0214997
137	3393,033333	5540,61	207,69	66,76825373
138	3417,8	5474,02	207,55	66,49172925
139	3442,566667	5406,50	207,41	66,19164565
140	3467,333333	5338,04	207,27	65,86773667
141	3492,1	5268,66	207,13	65,51975117
142	3516,866667	5198,37	207,00	65,14745397
143	3541,633333	5127,17	206,86	64,75062659
144	3566,4	5055,07	206,72	64,32906807
145	3591,166667	4982,08	206,58	63,88259577
146	3615,933333	4908,22	206,45	63,41104612
147	3640,7	4833,49	206,32	62,91427543
148	3665,466667	4757,91	206,18	62,39216064
149	3690,233333	4681,50	206,05	61,84460007
150	3715	4604,26	205,92	61,27151419

ANEXO II- TABELA PARÂMETROS CALCULADOS BOMBA 2

Tabela A-II: Parâmetros Bomba 2

BOMBA 2				
Nº Pontos	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Eficiência(%)
1	24,76666667	4110,83	46,92	1,600401609
2	49,53333333	4114,38	47,76	3,147729364
3	74,3	4117,70	48,58	4,644929935
4	99,06666667	4120,78	49,41	6,094745558
5	123,8333333	4123,63	50,22	7,499731199
6	148,6	4126,25	51,03	8,862269987
7	173,3666667	4128,64	51,84	10,18458712
8	198,1333333	4130,80	52,64	11,46876241
9	222,9	4132,73	53,43	12,71674167
10	247,6666667	4134,43	54,22	13,93034693
11	272,4333333	4135,91	55,00	15,1112858
12	297,2	4137,16	55,77	16,26115996
13	321,9666667	4138,19	56,54	17,38147278
14	346,7333333	4139,00	57,30	18,47363642
15	371,5	4139,58	58,06	19,53897814
16	396,2666667	4139,94	58,80	20,57874623
17	421,0333333	4140,08	59,54	21,59411525
18	445,8	4139,99	60,27	22,586191
19	470,5666667	4139,67	61,00	23,55601491
20	495,3333333	4139,14	61,72	24,50456822
21	520,1	4138,37	62,42	25,43277567
22	544,8666667	4137,38	63,13	26,34150901
23	569,6333333	4136,17	63,82	27,23159018
24	594,4	4134,72	64,51	28,10379417
25	619,1666667	4133,05	65,18	28,95885179
26	643,9333333	4131,14	65,85	29,79745211
27	668,7	4129,00	66,51	30,62024474
28	693,4666667	4126,63	67,16	31,42784196
29	718,2333333	4124,02	67,81	32,22082065
30	743	4121,17	68,44	32,9997241
31	767,7666667	4118,09	69,07	33,76506364

32	792,5333333	4114,75	69,69	34,51732019
33	817,3	4111,18	70,30	35,25694568
34	842,0666667	4107,35	70,90	35,98436433
35	866,8333333	4103,27	71,49	36,69997387
36	891,6	4098,94	72,07	37,40414662
37	916,3666667	4094,35	72,64	38,09723059
38	941,1333333	4089,50	73,21	38,77955032
39	965,9	4084,39	73,76	39,45140785
40	990,6666667	4079,00	74,31	40,11308343
41	1015,4333333	4073,35	74,84	40,76483634
42	1040,2	4067,42	75,37	41,4069055
43	1064,9666667	4061,21	75,89	42,03951012
44	1089,7333333	4054,72	76,40	42,66285027
45	1114,5	4047,93	76,89	43,27710737
46	1139,2666667	4040,86	77,38	43,88244469
47	1164,0333333	4033,49	77,86	44,47900775
48	1188,8	4025,81	78,33	45,06692474
49	1213,5666667	4017,83	78,79	45,64630682
50	1238,3333333	4009,53	79,24	46,21724846
51	1263,1	4000,91	79,68	46,7798277
52	1287,8666667	3991,97	80,12	47,33410642
53	1312,6333333	3982,71	80,54	47,8801305
54	1337,4	3973,10	80,95	48,41793003
55	1362,1666667	3963,16	81,35	48,94751949
56	1386,9333333	3952,86	81,75	49,4688978
57	1411,7	3942,22	82,13	49,98204849
58	1436,4666667	3931,21	82,50	50,48693974
59	1461,2333333	3919,84	82,87	50,98352445
60	1486	3908,09	83,22	51,47174023
61	1510,7666667	3895,96	83,57	51,95150948
62	1535,5333333	3883,44	83,91	52,42273928
63	1560,3	3870,53	84,23	52,88532145
64	1585,0666667	3857,22	84,55	53,33913243
65	1609,8333333	3843,50	84,86	53,78403324
66	1634,6	3829,36	85,16	54,21986941
67	1659,3666667	3814,79	85,44	54,64647082
68	1684,1333333	3799,79	85,72	55,06365163
69	1708,9	3784,35	86,00	55,47121012
70	1733,6666667	3768,46	86,26	55,86892855
71	1758,4333333	3752,12	86,51	56,25657297
72	1783,2	3735,30	86,75	56,63389307
73	1807,9666667	3718,01	86,99	57,00062198

74	1832,733333	3700,23	87,21	57,35647603
75	1857,5	3681,96	87,43	57,70115459
76	1882,266667	3663,19	87,64	58,03433981
77	1907,033333	3643,90	87,84	58,35569636
78	1931,8	3624,10	88,03	58,66487122
79	1956,566667	3603,76	88,21	58,9614934
80	1981,333333	3582,88	88,38	59,24517367
81	2006,1	3561,44	88,55	59,51550429
82	2030,866667	3539,45	88,71	59,77205874
83	2055,633333	3516,88	88,86	60,01439139
84	2080,4	3493,73	89,00	60,24203724
85	2105,166667	3469,99	89,13	60,45451163
86	2129,933333	3445,64	89,25	60,65130988
87	2154,7	3420,68	89,37	60,83190703
88	2179,466667	3395,09	89,48	60,99575753
89	2204,233333	3368,86	89,58	61,14229491
90	2229	3341,99	89,68	61,27093145
91	2253,766667	3314,45	89,77	61,38105794
92	2278,533333	3286,24	89,85	61,4720433
93	2303,3	3257,34	89,92	61,54323431
94	2328,066667	3227,75	89,99	61,59395532
95	2352,833333	3197,46	90,05	61,62350795
96	2377,6	3166,43	90,10	61,6311708
97	2402,366667	3134,68	90,15	61,61619919
98	2427,133333	3102,18	90,19	61,57782491
99	2451,9	3068,92	90,23	61,51525594
100	2476,666667	3034,89	90,26	61,42767626
101	2501,433333	3000,07	90,28	61,31424562
102	2526,2	2964,46	90,30	61,17409934
103	2550,966667	2928,03	90,31	61,00634817
104	2575,733333	2890,78	90,32	60,81007811
105	2600,5	2852,68	90,32	60,58435032
106	2625,266667	2813,74	90,32	60,32820103
107	2650,033333	2773,92	90,31	60,04064149
108	2674,8	2733,22	90,30	59,72065794
109	2699,566667	2691,63	90,28	59,36721165
110	2724,333333	2649,13	90,26	58,97923897
111	2749,1	2605,70	90,24	58,55565145
112	2773,866667	2561,33	90,21	58,09533602
113	2798,633333	2516,01	90,18	57,59715517
114	2823,4	2469,71	90,14	57,05994724
115	2848,166667	2422,43	90,10	56,48252673

116	2872,933333	2374,14	90,06	55,86368473
117	2897,7	2324,84	90,02	55,20218935
118	2922,466667	2274,51	89,97	54,49678628
119	2947,233333	2223,13	89,92	53,74619939
120	2972	2170,68	89,87	52,9491314
121	2996,766667	2117,15	89,82	52,1042647
122	3021,533333	2062,53	89,76	51,21026219
123	3046,3	2006,78	89,71	50,26576825
124	3071,066667	1949,91	89,65	49,26940979
125	3095,833333	1891,89	89,59	48,21979741
126	3120,6	1832,71	89,54	47,11552668
127	3145,366667	1772,34	89,48	45,9551795
128	3170,133333	1710,77	89,42	44,73732559
129	3194,9	1647,99	89,36	43,46052413
130	3219,666667	1583,97	89,30	42,12332546
131	3244,433333	1518,69	89,25	40,72427293
132	3269,2	1452,15	89,19	39,26190495
133	3293,966667	1384,32	89,13	37,73475701
134	3318,733333	1315,18	89,08	36,14136401
135	3343,5	1244,71	89,03	34,48026264
136	3368,266667	1172,90	88,98	32,74999386
137	3393,033333	1099,73	88,93	30,94910562
138	3417,8	1025,17	88,89	29,07615563
139	3442,566667	949,22	88,85	27,12971433
140	3467,333333	871,84	88,81	25,10836798
141	3492,1	793,02	88,77	23,01072185
142	3516,866667	712,75	88,74	20,83540363
143	3541,633333	630,99	88,71	18,5810669
144	3566,4	547,74	88,69	16,24639475
145	3591,166667	462,97	88,67	13,83010353
146	3615,933333	376,65	88,66	11,33094678
147	3640,7	288,78	88,65	8,747719105
148	3665,466667	199,33	88,65	6,079260371
149	3690,233333	108,28	88,66	3,32445983
150	3715	15,60	88,67	0,48226041

ANEXO III- TABELA PARÂMETROS CALCULADOS ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE

Tabela A-III: Parâmetros Associação das Bombas em Série

ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE				
Nº Pontos	Vazão (bpd)	Head (ft)	BHP (HP)	Eficiência (%)
1	24,7666667	13728,79052	209,9714	1,194467122
2	49,5333333	13713,87908	211,4026	2,370183841
3	74,3	13698,24125	212,8465	3,527130032
4	99,0666667	13681,91515	214,3019	4,66533406
5	123,833333	13664,93744	215,7675	5,784868633
6	148,6	13647,34335	217,2421	6,885846842
7	173,366667	13629,1667	218,7244	7,968418391
8	198,133333	13610,43993	220,2132	9,032766026
9	222,9	13591,19406	221,7074	10,07910215
10	247,666667	13571,45877	223,2059	11,10766564
11	272,433333	13551,2624	224,7076	12,11871885
12	297,2	13530,63194	226,2113	13,11254476
13	321,966667	13509,59305	227,7161	14,08944439
14	346,733333	13488,17011	229,2209	15,0497343
15	371,5	13466,38621	230,7247	15,99374427
16	396,266667	13444,26315	232,2266	16,92181522
17	421,033333	13421,82149	233,7256	17,83429716
18	445,8	13399,08055	235,2209	18,73154736
19	470,566667	13376,05843	236,7114	19,61392868
20	495,333333	13352,77201	238,1964	20,48180792
21	520,1	13329,23698	239,6749	21,33555446
22	544,866667	13305,46785	241,1463	22,17553883
23	569,633333	13281,478	242,6097	23,00213153
24	594,4	13257,27962	244,0643	23,8157019
25	619,166667	13232,8838	245,5094	24,61661706
26	643,933333	13208,30051	246,9443	25,40524101
27	668,7	13183,53861	248,3682	26,18193371
28	693,466667	13158,6059	249,7806	26,94705035
29	718,233333	13133,5091	251,1807	27,7009406

30	743	13108,25388	252,5679	28,44394797
31	767,766667	13082,84489	253,9417	29,17640924
32	792,533333	13057,28573	255,3014	29,8986539
33	817,3	13031,57903	256,6465	30,6110037
34	842,066667	13005,72641	257,9765	31,31377217
35	866,833333	12979,72854	259,2908	32,0072643
36	891,6	12953,58511	260,5889	32,69177611
37	916,366667	12927,29489	261,8704	33,36759443
38	941,133333	12900,85572	263,1349	34,03499651
39	965,9	12874,26452	264,3818	34,69424985
40	990,666667	12847,51734	265,6108	35,34561196
41	1015,433333	12820,60933	266,8214	35,98933012
42	1040,2	12793,5348	268,0134	36,62564124
43	1064,966667	12766,28719	269,1864	37,2547717
44	1089,733333	12738,85914	270,34	37,87693719
45	1114,5	12711,24246	271,4739	38,49234258
46	1139,266667	12683,42816	272,5879	39,10118184
47	1164,033333	12655,40647	273,6816	39,70363788
48	1188,8	12627,16686	274,7548	40,29988255
49	1213,566667	12598,69805	275,8073	40,89007646
50	1238,333333	12569,98801	276,8389	41,47436897
51	1263,1	12541,024	277,8492	42,05289811
52	1287,866667	12511,79259	278,8383	42,62579051
53	1312,633333	12482,27965	279,8058	43,19316135
54	1337,4	12452,47037	280,7517	43,75511432
55	1362,166667	12422,34929	281,6758	44,31174155
56	1386,933333	12391,90033	282,578	44,86312358
57	1411,7	12361,10677	283,4582	45,4093293
58	1436,466667	12329,95126	284,3164	45,95041593
59	1461,233333	12298,4159	285,1524	46,48642897
60	1486	12266,48218	285,9661	47,01740214
61	1510,766667	12234,13104	286,7577	47,54335737
62	1535,533333	12201,34288	287,527	48,06430474
63	1560,3	12168,09757	288,274	48,58024243
64	1585,066667	12134,37444	288,9988	49,0911567
65	1609,833333	12100,15237	289,7014	49,59702185
66	1634,6	12065,40972	290,3818	50,09780015
67	1659,366667	12030,12439	291,04	50,59344179
68	1684,133333	11994,27384	291,6762	51,0838849
69	1708,9	11957,83509	292,2903	51,56905541
70	1733,666667	11920,78473	292,8826	52,04886709
71	1758,433333	11883,09898	293,4531	52,52322144

72	1783,2	11844,75362	294,0019	52,99200766
73	1807,96667	11805,72411	294,5292	53,45510263
74	1832,73333	11765,98552	295,035	53,9123708
75	1857,5	11725,5126	295,5196	54,36366422
76	1882,26667	11684,27976	295,9832	54,80882241
77	1907,03333	11642,26111	296,4258	55,24767236
78	1931,8	11599,43047	296,8478	55,68002847
79	1956,56667	11555,76137	297,2492	56,10569251
80	1981,33333	11511,22709	297,6303	56,52445355
81	2006,1	11465,80067	297,9914	56,93608795
82	2030,86667	11419,4549	298,3327	57,34035927
83	2055,63333	11372,16237	298,6543	57,7370183
84	2080,4	11323,89547	298,9566	58,12580294
85	2105,16667	11274,62641	299,2398	58,50643825
86	2129,93333	11224,32723	299,5043	58,87863634
87	2154,7	11172,96982	299,7502	59,24209642
88	2179,46667	11120,52593	299,9778	59,59650471
89	2204,23333	11066,9672	300,1876	59,94153448
90	2229	11012,26516	300,3797	60,27684603
91	2253,76667	10956,39126	300,5546	60,60208664
92	2278,53333	10899,31686	300,7124	60,91689064
93	2303,3	10841,01328	300,8536	61,2208794
94	2328,06667	10781,4518	300,9785	61,51366132
95	2352,83333	10720,60367	301,0875	61,79483191
96	2377,6	10658,44013	301,1808	62,06397379
97	2402,36667	10594,93243	301,2589	62,32065677
98	2427,13333	10530,05184	301,3221	62,56443789
99	2451,9	10463,76967	301,3708	62,79486149
100	2476,66667	10396,05729	301,4054	63,01145934
101	2501,43333	10326,88612	301,4263	63,21375067
102	2526,2	10256,2277	301,4339	63,40124234
103	2550,96667	10184,05363	301,4284	63,57342895
104	2575,73333	10110,33567	301,4105	63,72979297
105	2600,5	10035,04568	301,3804	63,86980493
106	2625,26667	9958,15569	301,3386	63,99292356
107	2650,03333	9879,637877	301,2855	64,09859602
108	2674,8	9799,464612	301,2215	64,1862581
109	2699,56667	9717,608457	301,1471	64,25533443
110	2724,33333	9634,042187	301,0626	64,30523877
111	2749,1	9548,738806	300,9686	64,33537427
112	2773,86667	9461,67156	300,8653	64,34513374
113	2798,63333	9372,813954	300,7534	64,33390003

114	2823,4	9282,13977	300,6332	64,3010463
115	2848,16667	9189,62308	300,5051	64,2459364
116	2872,93333	9095,238262	300,3696	64,16792531
117	2897,7	8998,960017	300,2273	64,06635947
118	2922,46667	8900,763387	300,0784	63,94057729
119	2947,23333	8800,623763	299,9234	63,78990957
120	2972	8698,516909	299,7629	63,61368
121	2996,76667	8594,418975	299,5973	63,41120566
122	3021,53333	8488,306512	299,4269	63,18179761
123	3046,3	8380,156487	299,2524	62,92476139
124	3071,06667	8269,9463	299,0741	62,63939768
125	3095,83333	8157,653802	298,8925	62,32500288
126	3120,6	8043,257306	298,708	61,98086977
127	3145,36667	7926,735608	298,5211	61,60628821
128	3170,13333	7808,067996	298,3323	61,20054583
129	3194,9	7687,234275	298,142	60,76292876
130	3219,66667	7564,214773	297,9506	60,29272238
131	3244,43333	7438,990364	297,7587	59,78921215
132	3269,2	7311,542482	297,5666	59,25168438
133	3293,96667	7181,853133	297,3749	58,67942708
134	3318,73333	7049,904916	297,1839	58,07173085
135	3343,5	6915,681036	296,9941	57,42788972
136	3368,26667	6779,165321	296,806	56,7472021
137	3393,03333	6640,342236	296,6199	56,02897173
138	3417,8	6499,1969	296,4364	55,27250856
139	3442,56667	6355,715102	296,2559	54,47712983
140	3467,33333	6209,883317	296,0787	53,64216098
141	3492,1	6061,68872	295,9054	52,7669367
142	3516,86667	5911,119205	295,7362	51,85080198
143	3541,63333	5758,163396	295,5718	50,89311308
144	3566,4	5602,810669	295,4124	49,89323868
145	3591,16667	5445,05116	295,2585	48,85056089
146	3615,93333	5284,875789	295,1105	47,76447631
147	3640,7	5122,276271	294,9687	46,63439718
148	3665,46667	4957,245131	294,8336	45,45975238
149	3690,23333	4789,775723	294,7056	44,2399886
150	3715	4619,862244	294,585	42,97457135