



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA - CET
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO MONOFÁSICO DE FLUIDOS VISCOSOS EM
BOMBAS CENTRÍFUGAS DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

ANA CARLA COSTA ANDRADE

**NATAL / RN
JUNHO DE 2013**

ANA CARLA COSTA ANDRADE

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO MONOFÁSICO DE FLUIDOS VISCOSOS EM
BOMBAS CENTRÍFUGAS DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

Esta monografia corresponde ao trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia do Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientadora: Prof.^a Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

**NATAL / RN
JUNHO DE 2013**

ANA CARLA COSTA ANDRADE

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO MONOFÁSICO DE FLUIDOS VISCOSOS EM
BOMBAS CENTRÍFUGAS DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

Este trabalho foi avaliado e considerado adequado como requisito na obtenção do título de Engenheiro de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Natal, 24 de junho de 2013

Prof.^a Dr.^a Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
(Orientador – UFRN)

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
(Membro Examinador - UFRN)

Prof. MSc. Célio Gurgel Amorim
(Membro externo à instituição - ANP)

DEDICATÓRIA

A Deus, em primeiro lugar, por estar sempre ao meu lado me concedendo força e fé, na consolidação desta conquista.

Aos meus pais, Maria Helena Farias e Canindé Costa, bases da minha vida, pelo carinho e apoio sempre.

Às minhas filhas Catarina e Amanda, amores da minha vida, pela paciência e ausência nos momentos de família.

Ao meu marido Gilson, pelo incentivo, ausência, compreensão e ajuda na busca de meus ideais.

Aos meus irmãos, Vânia Lúcia, Jocelin Helder, Jorge Ramon, e Rosângela Helena, pelos conselhos e incentivos.

E a todos que estiveram presentes diretamente ou indiretamente no percorrer desta conquista, que de alguma forma me ajudaram a crescer como pessoa e profissionalmente.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, pela orientação, apoio, amizade e confiança, depositada em mim desde o primeiro momento.

Aos meus professores do Programa de Engenharia de Petróleo, que contribuíram para aumentar meu conhecimento, como também aos amigos do curso, pela amizade, conselhos, estudos, companheirismo e conquistas realizadas.

Aos professores Célio Gurgel Amorim (Pesquisador Visitante do PRH - ANP/MCTI Nº 43) e Tarcílio Viana Dutra Júnior (Coordenador do PRH - ANP/MCTI Nº 43), pelas orientações e contribuições.

Ao (LAUT/UFRN) - Laboratório de Automação em Petróleo, pela parceria para o desenvolvimento do projeto.

À ANP e ao PRH pela concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro.

RESUMO

Uma das diversas técnicas aplicadas aos processos de produção e exploração de petróleo é a elevação artificial, que utiliza equipamentos com o objetivo de promover um aumento na vazão e pressão em poços de óleo e de gás. A escolha do método de elevação depende de uma análise precisa do projeto e de fatores como custos iniciais de instalação, manutenção e condições existentes no campo produtor. O método BCS (Bombeio Centrífugo Submerso) mostra-se bastante eficiente quando a finalidade é produzir altas vazões de líquido, tanto em ambientes terrestres como marítimos, em condições adversas de temperatura, existência de gás livre na mistura e fluidos viscosos. Por definição, o BCS é um método de elevação artificial em que um motor elétrico de subsuperfície transforma a energia elétrica em mecânica e uma bomba centrífuga de múltiplos estágios sobrepostos converte a energia mecânica do motor em energia cinética, elevando o fluido à superfície. Problemas como a viscosidade elevada no interior da bomba afetam seu funcionamento e podem ocasionar falhas e até paradas no sistema. Uma precisa avaliação dos efeitos da viscosidade pode ajudar na previsão de falhas e baixo desempenho na utilização do método de elevação artificial por Bombeio Centrífugo Submerso. Neste trabalho foram realizadas simulações através de um programa comercial o ANSYS® CFX® 11.0 para descrever a influência da viscosidade no escoamento do fluido monofásico nos canais de um estágio de uma bomba centrífuga típica de sistemas BCS. Os objetivos da pesquisa são: desenvolvimento de simulações utilizando dois fluidos monofásicos, definição do modelo matemático para as equações de conservação no caso de escoamentos viscosos em um estágio da bomba centrífuga e comparação com dados experimentais.

Palavras-chave: Elevação Artificial, Bombeio Centrífugo Submerso, Bombas Centrífugas, Simulação.

ABSTRACT

One of several techniques applied to production processes and oil exploration is the artificial lift, which uses equipment with the aim of promoting an increase in flow and pressure in oil and gas wells. The choice of artificial lift method depends on accurate analysis and design factors such as initial costs of installation, maintenance, and conditions in the producing field. The ESP method (Electrical Submersible Pumping) appears to be quite effective when the aim is to produce high flows of liquid, both offshore and onshore environments, in adverse conditions of temperature, presence of free gas in the mixture and viscous fluids. By definition, the ESP is a method of artificial lift in which a subsurface electric motor transforms electrical energy into mechanical and a multistage centrifugal pump converts mechanical energy into kinetic energy, bringing the fluid to the surface. The high viscosity inside the pump affects its operation and may lead to failures and the system stops. An accurate assessment of the effects of viscosity can help in predicting failures and low performance in the method of artificial lift by Electrical Submersible Pumping. In this work, simulations were performed using a commercial program ANSYS ® CFX ® 11.0 to describe the influence of the viscosity in the flow of the single phase fluid in the channels of a stage of a typical centrifugal pump systems ESP. The research objectives are development of simulation models using two single phase fluids, definition of mathematical model for the conservation equations in the case of viscous flows in a stage centrifugal pump and comparison with experimental data.

Keywords: Artificial Lift, Electrical Submersible Pumping, Centrifugal Pumps, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Etapas de fluxo dado um poço surgente | 15 |
| Figura 2 - Distribuição dos métodos de elevação artificial | 17 |
| Figura 3 - Esquema de poços operando com GLC (a) e gli (b)..... | 19 |
| Figura 4 - Poço equipado com bomba centrífuga submersa..... | 20 |
| Figura 5 - Poço equipado com bombeio mecânico | 21 |
| Figura 6 - Poço equipado com bomba de cavidades progressivas | 22 |
| Figura 7 - Representação completa de um poço operando por bcs | 25 |
| Figura 8 - Motor elétrico (a) e (b) | 26 |
| Figura 9 - Curvas representativas do motor | 27 |
| Figura 10 - Protetor ou selo mecânico..... | 28 |
| Figura 11 - Bomba centrífuga de múltiplos estágios..... | 29 |
| Figura 12 - Impelidor (a) e difusor (b) | 29 |
| Figura 13 - Classificação das bombas quanto à direção do fluido | 30 |
| Figura 14 - Curva característica ou de <i>performance</i> de uma bomba centrífuga utilizada em BCS..... | 31 |
| Figura 15 - Representação de um separador de gás | 32 |
| Figura 18 - Quadro de comando..... | 33 |
| Figura 19 - Transformador | 33 |
| Figura 20 - Caixa de ventilação (<i>Junction Box</i>)..... | 34 |
| Figura 16 - Cabo elétrico redondo..... | 34 |
| Figura 17 - Cabo elétrico chato | 35 |
| Figura 21 - Cabeça do poço..... | 35 |
| Figura 22 - Variador de velocidade (<i>variable speed velocity – VSD</i>) | 36 |
| Figura 23 - Geometria no formato CAD do impelidor de sistema BCS | 40 |
| Figura 24 - Geometria no formato CAD do difusor de sistema BCS..... | 41 |
| Figura 25 - Tela do BladeGen [®] , definição do perfil meridional do impelidor..... | 42 |
| Figura 26 - Tela do BladeGen [®] , definição do perfil meridional do difusor..... | 42 |
| Figura 27 - Malha difusor (a) e malha impelidor (b)..... | 43 |
| Figura 28 - Regiões geradas da malha para o impelidor | 44 |
| Figura 29 - Definição das condições de escoamento na entrada e na saída dos domínios, modelo de turbulência e outros parâmetros da simulação..... | 46 |
| Figura 30 - Gráfico do fabricante (<i>head x flowrate</i>) | 48 |

Figura 31 - Condições de simulação da água, 3500rpm e 1cp e condições de simulação do óleo, 3500rpm e 60cp. 50

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Características das malhas geradas pelo sistema..... | 44 |
| Tabela 2 - Vazões utilizadas como condição de contorno..... | 46 |
| Tabela 3 - Valores de altura de elevação da água para o fabricante e o simulador..... | 49 |
| Tabela 4 - Valores de altura de elevação do óleo experimental e para o simulador..... | 49 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 OBJETIVOS GERAIS | 12 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 13 |
| 2 ASPECTOS TEÓRICOS..... | 14 |
| 2.1 ELEVAÇÃO NATURAL..... | 14 |
| 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO ACUMULADA POR SURGÊNCIA | 15 |
| 2.3 ELEVAÇÃO ARTIFICIAL | 16 |
| 2.3.1 Principais Métodos de Elevação Artificial | 17 |
| 2.4 BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO (BCS)..... | 22 |
| 2.5 COMPONENTES DE UM SISTEMA BCS | 24 |
| 2.5.1 Equipamentos de Subsuperfície | 25 |
| 2.5.3 Equipamentos de Superfície | 32 |
| 3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL | 37 |
| 3.1 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) E APLICAÇÕES | 37 |
| 3.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES | 37 |
| 3.3 CONVERSÃO DE MASSA..... | 38 |
| 3.4 QUANTIDADE DE MOVIMENTO..... | 38 |
| 4 METODOLOGIA..... | 40 |
| 4.1 GEOMETRIA NO FORMATO CAD..... | 40 |
| 4.2 GEOMETRIA NO FORMATO ANSYS [®] CFX [®] | 41 |
| 4.3 GERAÇÃO DAS MALHAS | 43 |
| 4.4 PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES..... | 44 |
| 4.4.1 Propriedades físicas do domínio | 44 |
| 4.4.2 Condições de contorno | 45 |
| 4.4.3 Critérios de Convergência | 47 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 48 |
| | 48 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 51 |
| 6.1 RECOMENDAÇÕES FUTURAS | 51 |
| 6.2 SUBMISSÃO | 52 |
| REFERÊNCIAS | 53 |

1 INTRODUÇÃO

O método elevação artificial operando por BCS, possui como um dos componentes a bomba centrífuga de múltiplos estágios que transporta os fluidos à superfície. A bomba é formada por um impelidor rotativo (*rotor*) que transmite a energia cinética sob a forma de velocidade ao fluido e um difusor estacionário (*estator*) que converte a energia cinética do líquido coletado do rotor em pressão e encaminha o fluido bombeado para o próximo impelidor, posicionando o fluido imediatamente acima (MAITELLI, 2010).

Os principais equipamentos de um poço equipado por BCS podem ser subdivididos em equipamentos de subsuperfície sendo eles, motor elétrico; protetor ou selo mecânico; bomba; separador de gás e o cabo elétrico. Enquanto que os equipamentos de superfície são classificados em quadro de comando; transformador; caixa de ventilação (*junction box*); cabeça de poço; variador de velocidade (*variable speed velocity VSD*).

No funcionamento de um sistema BCS, algumas características do fluido como viscosidade elevada e a existência de gás livre interferem no desempenho da bomba centrífuga dificultando o transporte dos fluidos até a superfície. Outros problemas também podem afetar o comportamento do fluido no interior da bomba como a transmissão de energia através dos cabos até o ponto de acionamento e os impactos dos efeitos térmicos na partida do motor.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver simulações para descrever a influência da viscosidade do fluido monofásico nos canais de um estágio de uma bomba centrífuga típica de sistemas BCS, através de um programa comercial, o ANSYS-CFX.

1.1.2 Objetivos Específicos

Através de um programa comercial, o ANSYS® CFX® 11.0, realizar simulações para verificar a influência da viscosidade no escoamento de fluidos no interior de uma bomba de sistema BCS, tendo como objetivos específicos da pesquisa os seguintes pontos:

- Desenvolvimento de simulações preliminares utilizando modelos monofásicos com água;
- Definição do modelo matemático para as equações de conservação no caso de escoamentos viscosos na bomba centrífuga;
- Modelagem e simulações do escoamento viscoso em um estágio da bomba centrífuga de fluxo misto;
- Comparação com dados experimentais (AMARAL, 2007).

2 ASPECTOS TEÓRICOS

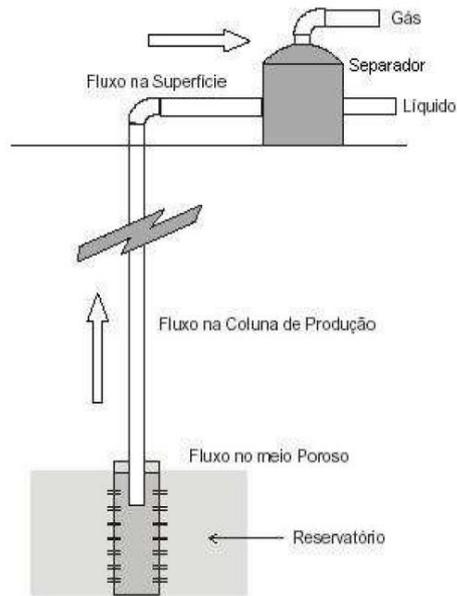
2.1 ELEVAÇÃO NATURAL

A elevação natural ocorre quando a pressão do reservatório é suficientemente elevada para conduzir os fluidos naturalmente até a superfície na vazão desejada. Os poços que produzem por essa forma, são denominados de poços surgentes. A surgência pode ocorrer no início da vida produtiva dos poços, porém com o passar do tempo e com a produção acumulada, a pressão do reservatório tende a declinar sendo insuficiente para elevar os fluidos à superfície.

Alguns fatores são determinantes numa produção por surgência como, o índice de produtividade do poço, pressão estática, propriedades dos fluidos, RGO, BSW, algum dano causado à formação, aplicações de técnicas de estimulação, dentre outros fatores.

Num poço que venha a operar por surgência, faz-se necessário que o fluido em movimento vença a extensão da coluna de produção, havendo diferença de pressão suficiente entre o fundo do poço e a cabeça de produção. É necessário que essa diferença de pressão supere as perdas de pressão oriundas do peso dos fluidos no interior da coluna, das perdas por fricção resultante do movimento, assim como das perdas por aceleração resultante da descompressão dos fluidos à medida que tendem a subir, como observado na Figura 1 (THOMAS, 2001).

Figura 1 - Etapas de fluxo dado um poço surgente



Fonte: Nascimento, 2005

Comparados aos poços que produzem por elevação artificial, os surgentes produzem normalmente com menos custos operacionais, devidos à simplicidade dos equipamentos de superfície e subsuperfície e maiores vazões de líquido, resultando assim, num menor custo por barril de óleo produzido. Levando-se em consideração as vantagens mencionadas, procura-se obter a máxima produção acumulada do reservatório através da elevação natural.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO ACUMULADA POR SURGÊNCIA

Alguns fatores influenciam na produção acumulada resultante da elevação artificial, dentre os quais destacam-se:

- ✓ Mecanismos de produção do reservatório (gás em solução, capa de gás, influxo de água);
- ✓ Algumas propriedades dos fluidos produzidos como: RGL, °API do óleo, viscosidade, BSW, dentre outros;

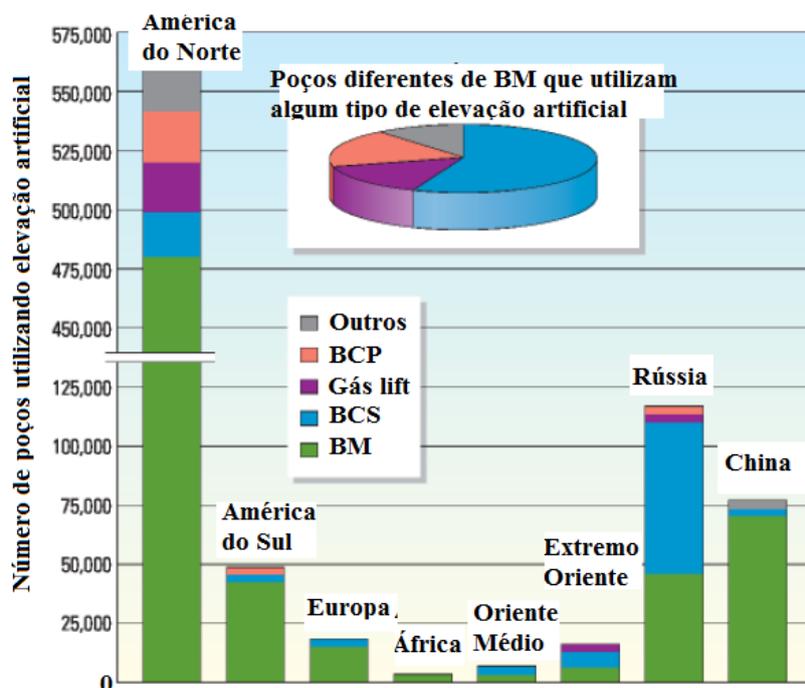
- ✓ Índice de produtividade do poço;
- ✓ Dano causado à formação produtora durante a etapa de perfuração e/ou completção do poço;
- ✓ Aplicação de técnicas de estimulação (faturamento, acidificação);
- ✓ Adequado controle da produção dos poços através de testes periódicos de produção e contínuo acompanhamento da queda de pressão do reservatório;
- ✓ Manutenção da pressão do reservatório por injeção de água e ou gás.

2.3 ELEVAÇÃO ARTIFICIAL

Elevação artificial é a área de engenharia de petróleo relacionada com a utilização de tecnologias para promover um aumento produção de petróleo, tendo como um dos principais objetivos desse método promover um aumento da vazão de produção.

O método de elevação artificial pode se aplica quando a pressão do reservatório não é suficiente para conduzir livremente os fluidos até a superfície. Portanto, há necessidade de se adicionar energia externa, através de meios artificiais, para que o poço produza. Cerca de 90% dos poços produtores de petróleo no mundo utilizam algum dos métodos de elevação artificial como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Distribuição dos métodos de elevação artificial



Fonte: Adaptado de Prado, 2007

2.3.1 Principais Métodos de Elevação Artificial

Alguns fatores fazem a diferença na escolha do melhor método de elevação artificial a ser utilizado num determinado poço ou campo, tais como: o tipo da geometria do poço, vazão, razão gás-líquido, viscosidade dos fluidos, produção de areia, mecanismo de produção do reservatório, disponibilidade de energia elétrica, disponibilidade de gás, distância das facilidades de produção, equipamento disponível, investimento, custos operacionais, segurança, entre outros. Como todos os métodos possuem vantagens e desvantagens, deve-se ter algum conhecimento de todos eles para uma escolha correta, embora em certas situações uma análise de viabilidade técnico-econômica-ambiental poderá determinar o método a ser utilizado.

Desta forma, os métodos de elevação artificial podem ser classificados de duas maneiras:

- **Bombeamento:** Quando se utiliza algum tipo de bombeio para fornecer uma redução da pressão de fundo para a elevação do fluido até a superfície. São exemplos desse método

o Bombeio Mecânico (BM), Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP) e Bombeio Centrífugo Submerso (BCS);

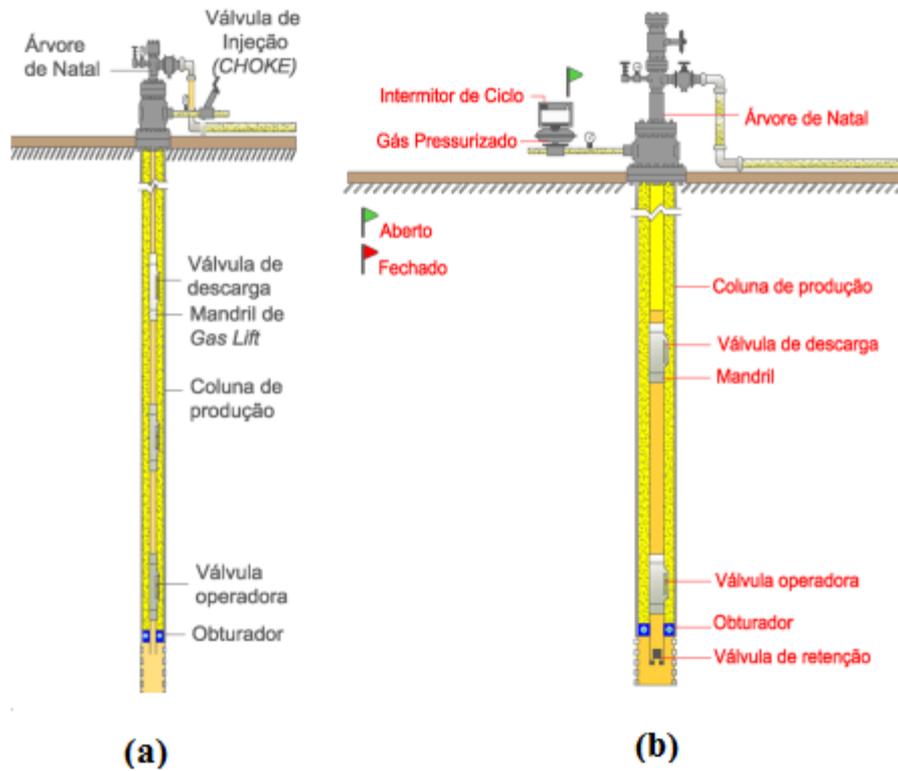
- **Pneumáticos:** Quando se utiliza a injeção de gás em algum ponto da coluna de produção com a finalidade de diminuir a densidade dos fluidos, diminuindo assim as perdas de carga deste até a superfície causada pela coluna hidrostática. Como exemplo tem-se o *Gas lift* Contínuo (GLC).

Em função da classificação dos métodos de elevação artificial, os mais comumente utilizados na indústria do petróleo são os seguintes:

- ***Gas-Lift* Contínuo (GLC):** Similar ao método de elevação natural, baseia-se na injeção contínua de gás a alta pressão na coluna de produção com o objetivo de gaseificar o fluido desde o ponto de injeção até a superfície.
- ***Gas-Lift* Intermitente (GLI):** Baseia-se no deslocamento de golfadas de fluido para a superfície através de injeção de gás a alta pressão na base da coluna. Esta injeção de gás possui tempos bem definidos e, normalmente, é controlada na superfície por um intermitor de ciclo e no poço por uma válvula de *Gas Lift*.

Pode-se observar nas Figuras 3a e 3b, exemplos de poços equipados com GLC e GLI. O GLC é caracterizado por uma mistura entre o gás injetado e os fluidos que estão sendo produzidos. No GLI, a injeção de gás promove uma grande golfada na base dos fluidos que estão no poço, fazendo com que os hidrocarbonetos possam subir e atingir a cabeça do poço (NUNES, 2008).

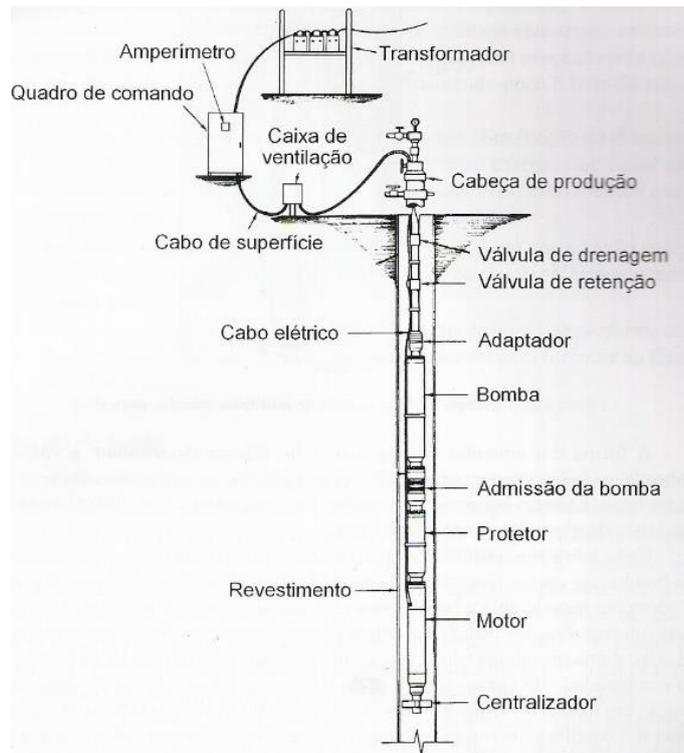
Figura 3 - Esquema de poços operando com GLC (a) e GLI (b)



Fonte: Maitelli, 2008

- **Bombeio Centrífugo Submerso (BCS):** É considerado um método de elevação artificial para poços que produzem altas vazões, baixa razão gás-óleo, aplicado em poços com fluidos de alta viscosidade como em poços com altas temperaturas. Segundo a Figura 4, um poço equipado por um sistema BCS pode ser formado por componentes de superfície e de subsuperfície.

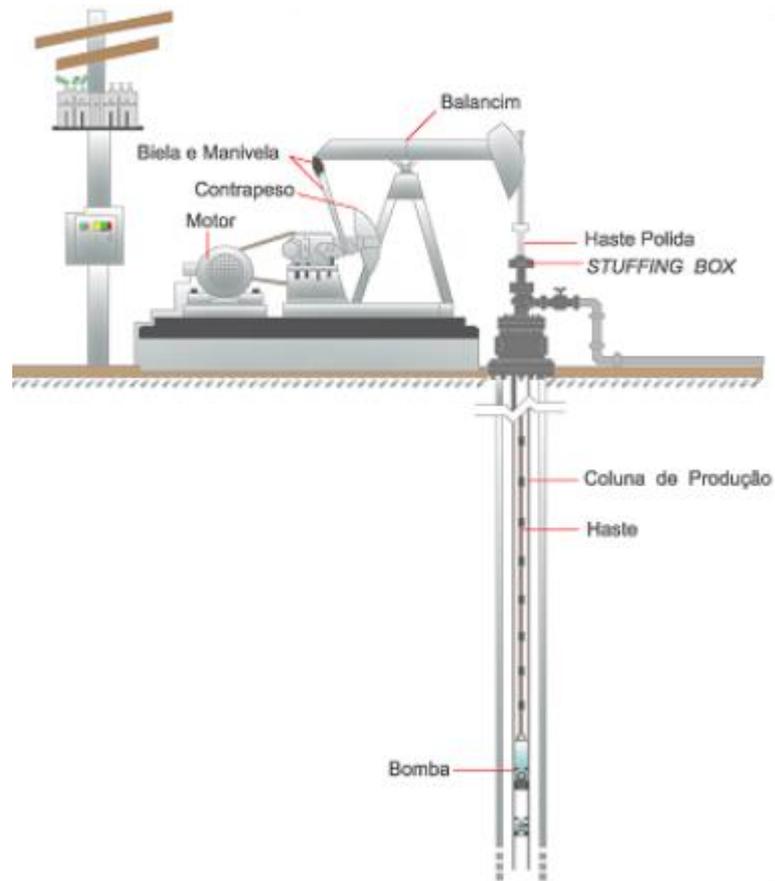
Figura 4 - Poço equipado com bomba centrífuga submersa



Fonte: Thomas, 2011

- **Bombeio Mecânico (BM):** É utilizado principalmente em campos terrestres, onde seu princípio de funcionamento se baseia no movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna, transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio localizada próxima à cabeça do poço. É considerado o método mais utilizado em todo o mundo para elevar vazões médias de poços rasos ou baixas vazões para poços de grande profundidade. Na Figura 5 observa-se um poço equipado por uma unidade de bombeio mecânico.

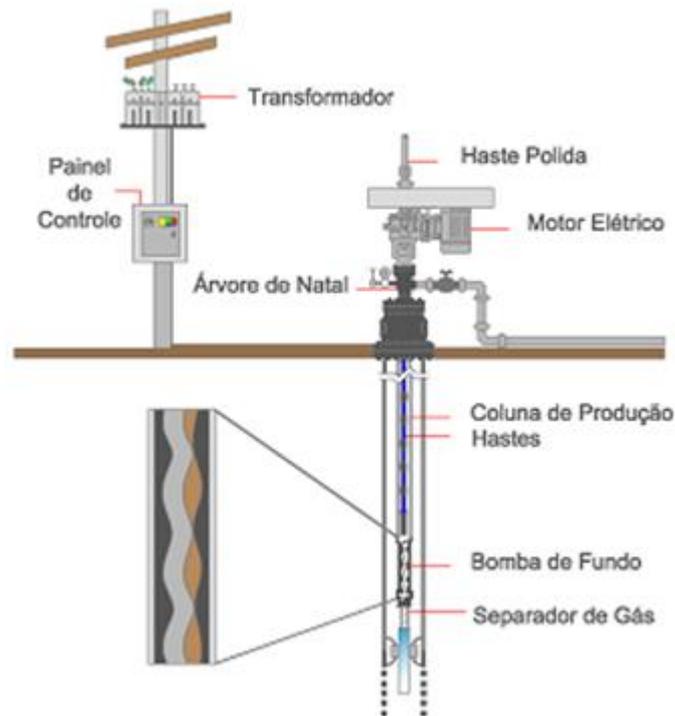
Figura 5 - Poço equipado com bombeio mecânico



Fonte: Maitelli, 2008

- **Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP):** É um método de elevação artificial em que a transferência de energia ao fluido é feita através de uma bomba de cavidades progressivas. É uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa em poço de petróleo, constituída de rotor e estator, de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Poço equipado com bomba de cavidades progressivas



Fonte: Maitelli, 2008

Além desses métodos descritos anteriormente, alguns autores adotam outros, como: Bombeio Hidráulico a Jato (BHJ), Bombeio Hidráulico com Pistão (BHP), Bombeio Hidráulico Alternativo (BRH) e *Plunger Lift* (PGL).

2.4 BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO (BCS)

O método aplicado no trabalho é o BCS (Bombeio Centrífugo Submerso), que tem forte aplicação na indústria do petróleo e tem como finalidade auxiliar na elevação de fluidos do reservatório para a superfície, de forma eficiente e econômica, com objetivo de aumentar a produção. Tal procedimento pode ocorrer com a presença de gás livre na entrada da bomba afetando negativamente o desempenho da operação.

Historicamente, o método de elevação por BCS foi desenvolvido por Armais Arutunoff, por volta dos anos de 1910. Em 1911, foi fundada a REDA (*Russian Electric Dynamo of Arutunoff*) (TAKACS, 2009).

Um fato importante na evolução do método foi à instalação de um mecanismo de transmissão de velocidade variável (Variable Speed Drive – VSD) em 1977, melhorando consideravelmente o desempenho de uma bomba submersível.

Segundo Takacs (2009), o método BCS desde a sua concepção, vem se destacando na elevação artificial por trabalhar com vazões elevadas de fluido, sendo utilizado também em aplicações offshore (*localizado ou operando no mar*), onde atualmente cerca de 10% da oferta mundial de petróleo é produzido com instalações de bombeio submerso.

Como todo método de elevação, o BCS apresenta vantagens, assim como suas desvantagens (TAKACS, 2009).

▪ **Vantagens:**

- ✓ Ideal para produzir elevadas vazões de fluido a partir de médias profundidades;
- ✓ A eficiência energética é relativamente alta cerca de 50% para os sistemas de produção mais de 1.000 bpd (*barris por dia*);
- ✓ Pode ser usado em poços desviados sem quaisquer problemas;
- ✓ Requer pouca manutenção, desde que a instalação tenha sido corretamente projetada e operada;
- ✓ Pode ser usado em locais urbanos, pois, os equipamentos de superfície necessitam de um espaço mínimo;
- ✓ Bem adaptado ao ambiente offshore (*localizado ou operando no mar*) por causa da exigência do espaço reduzido;
- ✓ A automação, supervisão e controle são relativamente simples;
- ✓ Os vazamentos na superfície são mínimos, não poluindo assim, o meio ambiente;
- ✓ A corrosão nestes sistemas é relativamente fácil de solucionar.

▪ **Desvantagens:**

- ✓ Uma fonte confiável de energia de tensão elétrica deve estar disponível;
- ✓ Menor eficácia para óleos pesados;
- ✓ Sensível à presença de sólidos e gás;
- ✓ Sensível à abrasão;
- ✓ Para reparar/substituir qualquer equipamento do conjunto de fundo, é necessária a retirada de toda a coluna de produção.
- ✓ Limitação quanto à altas temperaturas;
- ✓ Alto custo.

2.5 COMPONENTES DE UM SISTEMA BCS

Um sistema BCS é composto, além da bomba e do motor, por outros componentes igualmente importantes. Desta forma, os componentes de um sistema BCS podem ser divididos em equipamentos de subsuperfície e superfície.

Figura 7 - Representação completa de um poço operando por BCS



Fonte: Maitelli, 2010

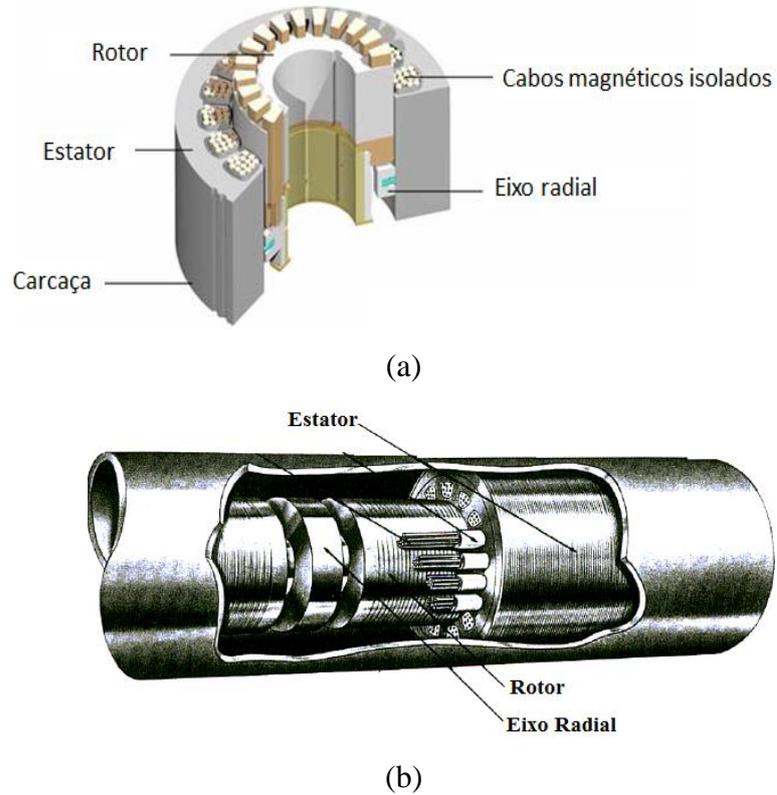
2.5.1 Equipamentos de Subsuperfície

Diante da necessidade de se ter um entendimento quanto a função e características de cada equipamento pertencente ao sistema BCS, é feita uma descrição sucinta dos principais equipamentos, embora cada fabricante possua seus referidos equipamentos com algumas diferenças, quando comparado aos demais.

- **Motor Elétrico:** De acordo com suas especificações, o motor elétrico é trifásico, bipolar, de indução e gira com velocidade de 3.500 rpm (*rotações por minuto*) com frequência de 60Hz (*hertz*). Consiste basicamente de uma parte estacionária (*difusor*) e outra giratória (*impelidor*) montada sobre um eixo, como mostra a Figura 8. O motor é projetado para trabalhar com altas pressões e temperaturas. É preenchido por um óleo mineral com alta resistência dielétrica e boa condutividade térmica, para a lubrificação dos mancais. Seu princípio de funcionamento é baseado na indução eletromagnética onde uma corrente eletromagnética será induzida em um condutor movendo-se em relação a um campo magnético. Quanto ao seu funcionamento, a velocidade rotacional do campo magnético é considerada a velocidade síncrona do motor onde depende da frequência da corrente alternada e do número de polos do rotor (THOMAS, 2001). Em se tratando das curvas do motor, como observado na Figura 9, as mesmas são obtidas

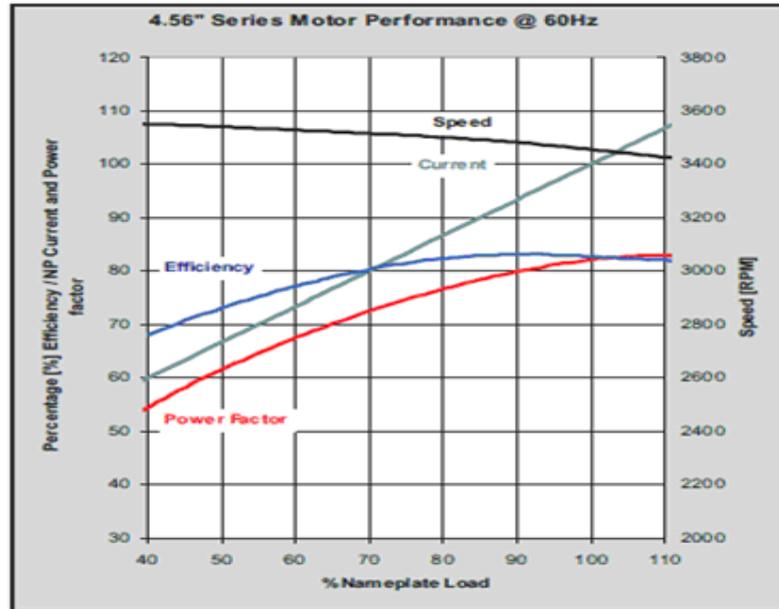
por ensaios de laboratório e para cada série do motor e sua importância é determinada principalmente quando se deseja obter a rotação, eficiência, corrente e fator de potência.

Figura 8 - Motor elétrico (a) e (b)



Fonte: Adaptado de Prado, 2007

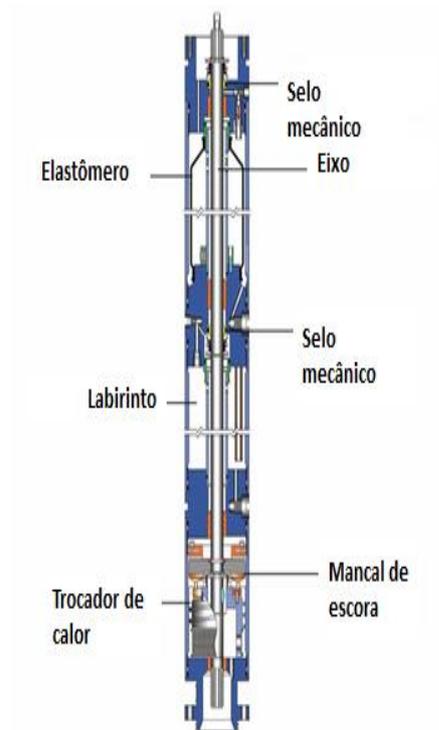
Figura 9 - Curvas representativas do motor



Fonte: Maitelli, 2012

- **Protetor ou Selo Mecânico:** É instalado entre o motor e a admissão da bomba, conectando o eixo do motor ao eixo da bomba através de duas luvas de acoplamento e do próprio eixo do protetor, de acordo com a Figura 10. Sendo assim, possui várias funções, como: providenciar uma área para expansão do óleo; prevenir a entrada de fluido produzido no motor; equalizar as pressões do fluido produzido e do motor, de forma a evitar o diferencial de pressão no protetor; garantir que as cargas geradas pela bomba não sejam transmitidas ao eixo e por fim possui a capacidade de ser colocado em série em relação a altas temperaturas, grandes profundidades como também potências elevadas.

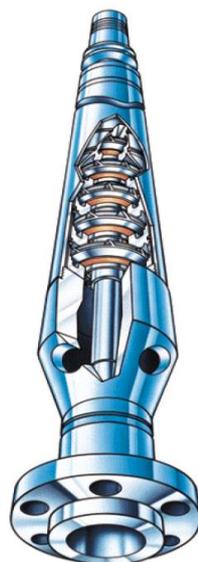
Figura 10 - Protetor ou selo mecânico



Fonte: Maitelli, 2012

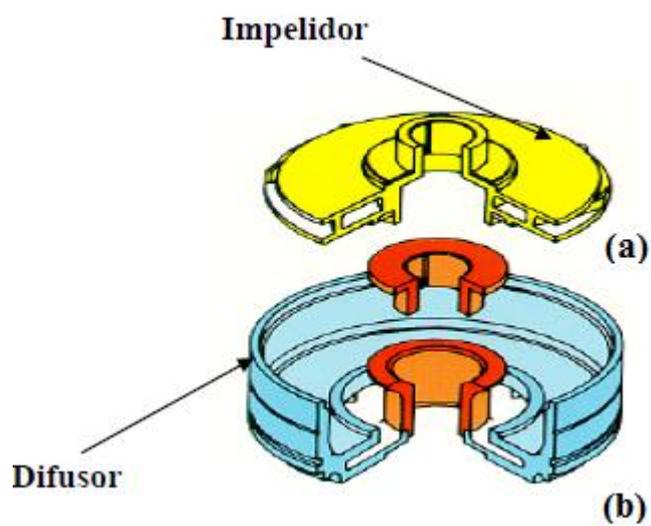
Bomba: É considerada o coração do sistema. Formada por múltiplos estágios, como representado na Figura 11, sendo que cada estágio é composto por um impelidor e um difusor conforme (Figura 12 impelidor (a) e difusor(b)). O impelidor é preso a um eixo e gira a uma velocidade de aproximadamente 3500 rotações por minuto e ao girar fornece energia ao fluido sob a forma de energia cinética, aumentando sua velocidade. O difusor que envolve o impelidor é estacionário e tem por finalidade mudar a direção do fluido, transformando parte desta energia cinética em pressão. A forma e o tamanho do impelidor e do difusor determinam a vazão a ser bombeada, já o número de estágios determina a sua capacidade de elevação, ou o *head* da bomba, bem como a potência necessária do motor. Com relação à direção de fluxo nos estágios, as bombas podem ser classificadas em fluxo radial e misto, observado na (Figura 13 fluxo radial (a) e fluxo misto (b)) (THOMAS, 2001).

Figura 11 - Bomba centrífuga de múltiplos estágios



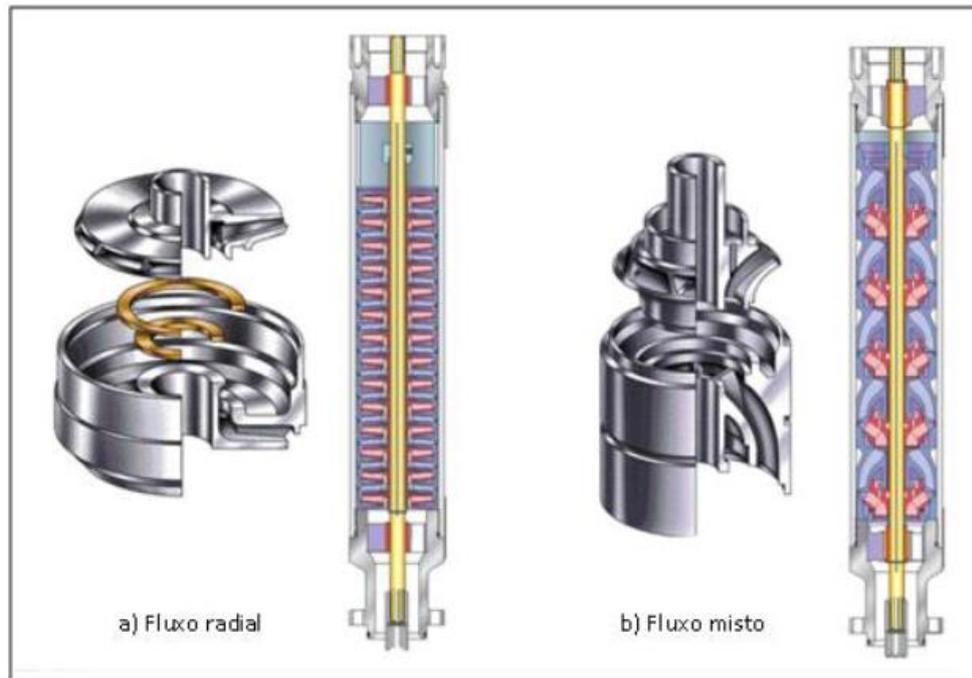
Fonte: Prado, 2007

Figura 12 – Impelidor (a) e difusor (b)



Fonte: Prado, 2007

Figura 13 - Classificação das bombas quanto à direção do fluido

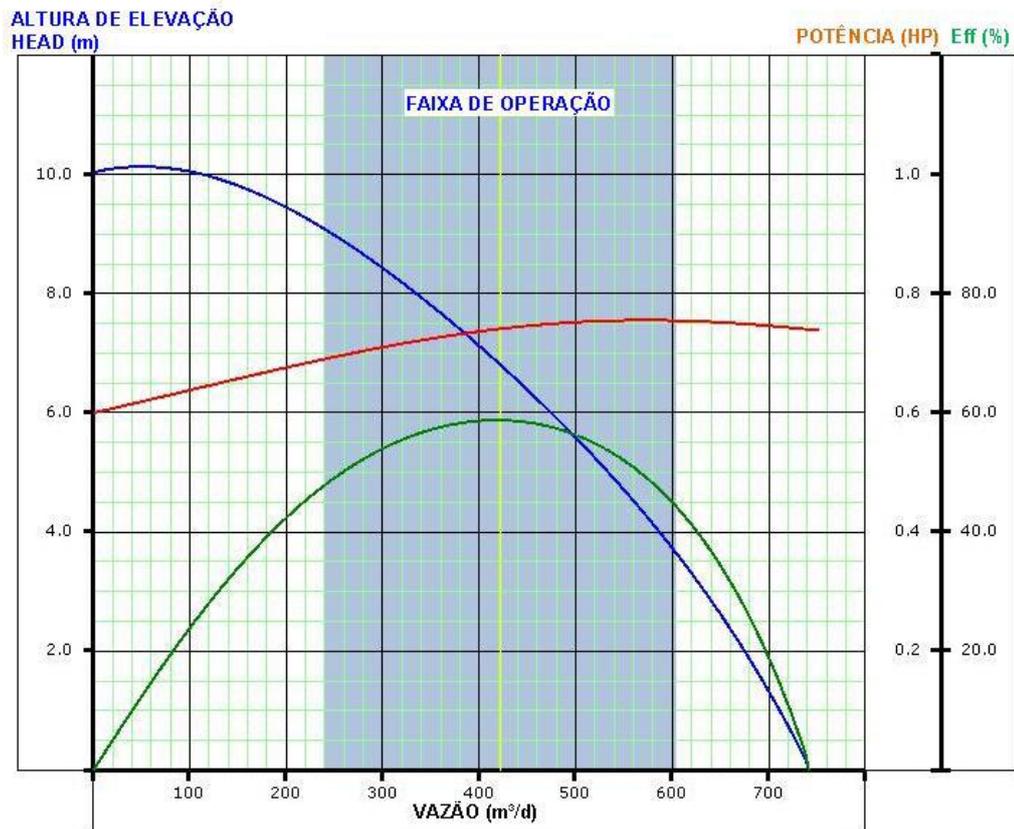


Fonte: Maitelli, 2010

Fabricantes fornecem a curva característica ou curva de *performance* para cada bomba, levando em consideração o bombeio da água e dependendo da necessidade, sofrem correções quando aplicadas a fluidos com diferentes densidades e viscosidade. As curvas características das bombas centrífugas apresentam uma faixa de operação de vazão, (*range* de operação) onde a bomba deve trabalhar para obter um funcionamento estável como uma maior vida útil da bomba.

De acordo com a Figura 14, podem-se obter os dados relacionados com as vazões, como: eficiência da bomba, capacidade de elevação e a potência necessária do motor em função da vazão. As bombas centrífugas utilizadas em sistemas BCS, devem operar preferencialmente dentro da faixa de operação, como também nas proximidades do ponto de mais alta eficiência (THOMAS, 2001)

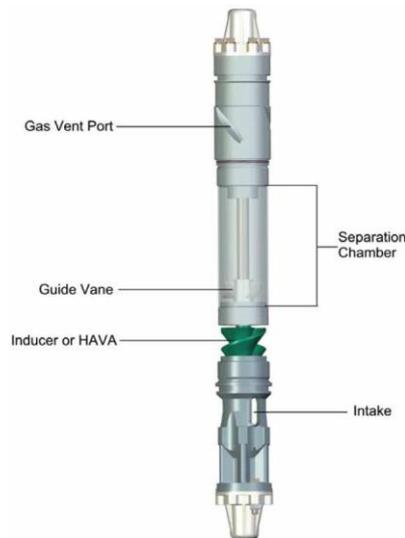
Figura 14 - Curva característica ou de performance de uma bomba centrífuga utilizada em BCS



Fonte: Maitelli, 2010

- **Separador de Gás (intake):** Para que o funcionamento da bomba centrífuga com eficiência faz-se necessário um separador de gás (Figura 15) para a utilização do método em poços de gás.

Figura 15 - Representação de um separador de gás



Fonte: Maitelli, 2012

2.5.2 Outros Componentes de Subsuperfície

Além da existência dos componentes mais comumente utilizado num sistema BCS, outros são utilizados nos poços apenas quando as condições de produção justificarem seu uso. Desta forma, alguns podem ser citados: acoplamentos, cabeça de descarga, check-valve e standing-valve, sensor de pressão e temperatura, abraçadeiras para cabo ou cintas, calha para cabo chato e bloco “y”.

2.5.3 Componentes de Superfície

Para cada poço que produz utilizando sistema BCS, existe na superfície uma determinada fonte de energia elétrica rede elétrica ou gerador, quadro de comando ou painel de controle, cabo elétrico de superfície e cabeça de poço. Dependendo do poço, o variador de velocidade ou de frequência pode ser ou não instalado. Quanto à caixa de ventilação, somente pode ser utilizada em poços terrestres.

- **Quadro de Comando ou Painel de Controle:** Considerado como sendo o equipamento de segurança e controle para a operação de sistema de BCS, conforme mostra a Figura 18. Em poços *offshore*, é especificada em função da tensão e corrente de

trabalho. Na sua constituição, fazem parte os seguintes componentes: disjuntor magnético, contator, transformador de corrente e fusíveis.

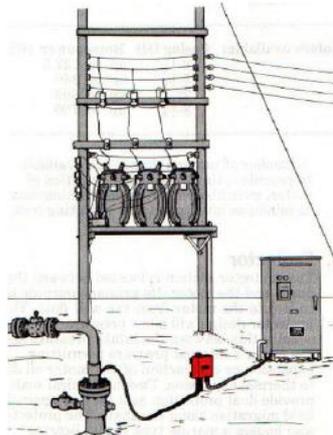
Figura 16 - Quadro de comando



Fonte: Prado, 2007

- **Transformador:** Como a voltagem dos equipamentos de superfície não é compatível com a voltagem do motor há necessidade da utilização de transformadores como demonstrado na Figura 19, com a finalidade de adequar a voltagem. O transformador é um equipamento sem partes móveis, que transfere a energia de um circuito para outro por meio de indução magnética (MAITELLI, 2010).

Figura 17 - Transformador

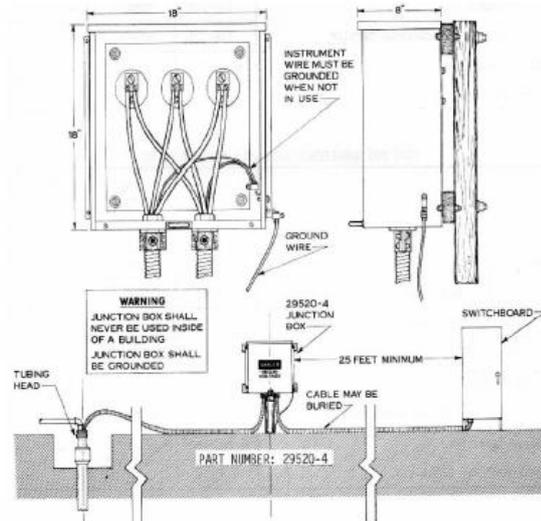


Fonte: Prado, 2007

- **Caixa de Junção ou de Ventilação (Junction Box):** Utilizada em poços localizados em terra, instalada entre o poço e o quadro de comandos, possui a finalidade de ventilar do

cabo trifásico, ou seja, promover a saída para a atmosfera do gás que por alguma eventualidade migre do poço pelo interior do cabo. A representação do esquema de uma caixa de ventilação é mostrada na Figura 20.

Figura 18 - Caixa de ventilação (*Junction Box*)



Fonte: Prado, 2007

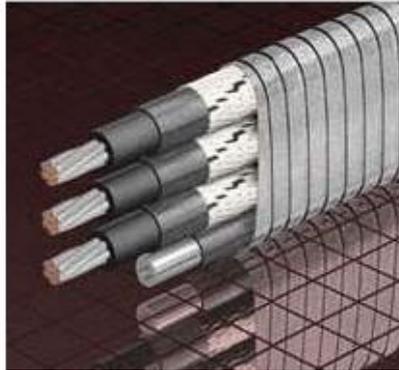
- **Cabo Elétrico:** A energia é transmitida da superfície para o motor através do cabo elétrico do tipo trifásico, que pode ser especificamente dividido em duas partes distintas, cabo redondo (Figura 16) e cabo chato (Figura 17). Quanto à formação, possui três condutores paralelos, sólidos ou trançados, que são revestidos por um isolamento primário de material termoplástico. É considerado um componente sensível, de custo elevado, e qualquer dano durante sua descida, resulta em quebra de isolamento e conseqüentemente numa falha prematura da instalação.

Figura 19 - Cabo elétrico redondo



Fonte: Prado, 2007

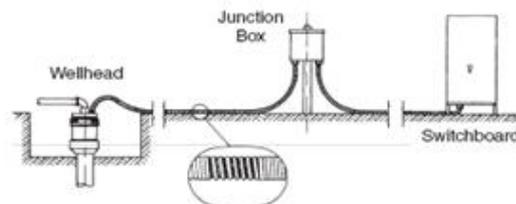
Figura 20 - Cabo elétrico chato



Fonte: Prado, 2007

- **Cabeça de Poço:** Tem como funções, assegurar a passagem do cabo elétrico até à coluna de produção, conseguir suportar o peso da coluna e manter estável a pressão no anular do poço. Na Figura 21 observa-se uma exemplificação da cabeça do poço. Em poços no mar, onde normalmente as pressões são maiores, a passagem da corrente elétrica pela cabeça de poço é feita utilizando um mandril elétrico. Para poços em terra, o cabo elétrico passa através da cabeça de poço e a vedação é feita através de placas de borracha que são prensadas contra o cabo elétrico.

Figura 21 - Cabeça do poço



Fonte: Prado, 2007

- **Variador de Velocidade ou de Frequência (Variable Speed Velocity – VSD):** É um equipamento que possibilita a operação do BCS em outras frequências, além da frequência usual de 60 Hz. Possibilita a operação na faixa de 30 a 90 Hz, sendo mais

comum operar na faixa de 50 a 70 Hz, a fim de obter um melhor *performance* do sistema (Figura 22).

Figura 22 - Variador de velocidade (*Variable Speed Velocity – VSD*)



Fonte: Maitelli, 2012

A curva de desempenho para diferentes frequências pode ser calculada a partir de leis conhecidas como Leis de Afinidade, que possuem as seguintes relações (MAITELLI, 2010).

- A nova vazão de bombeio varia diretamente com a variação da velocidade;
- O novo *head* fornecido pela bomba será proporcional ao quadrado da velocidade;
- A nova potência requerida pela bomba será proporcional ao cubo da velocidade.

3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

3.1 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) E APLICAÇÕES

Nos últimos anos, a análise de projeto experimentou grande progresso devido à evolução conjunta do poder computacional e precisão dos métodos numéricos, que são usados para se obter a solução de problemas matemáticos de maneira aproximada, quando não existe a possibilidade de resolvê-los por técnicas exatas.

A Ciência Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) tem como objetivos a análise de sistemas, envolvendo escoamento, transferência de calor e fenômenos associados como reações químicas através de simulações de fluidos baseadas em esforços computacionais.

Para se implementar essa técnica, utilizam-se programas computacionais, onde se definem a geometria do escoamento bem como sua malha, as condições de contorno do escoamento e os modelos a serem utilizados. As resoluções numéricas das equações diferenciais parciais ficam por conta do software, sendo possível o usuário interferir em critérios e parâmetros de convergência (ASUAJE, 2005).

Conceitualmente, a técnica de CFD aplica-se como uma substituição das equações diferenciais parciais governantes do escoamento (Navier-Stokes, continuidade e modelos de turbulência) por equações algébricas, de forma a dispor estes números no espaço e/ou no tempo, obtendo-se uma descrição numérica final do campo completo do escoamento de interesse (ASUAJE, 2005).

3.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

As equações de Navier-Stokes são aplicadas quando se tem escoamento incompressível com viscosidade constante, e são consideradas fundamentais na mecânica dos fluidos. Descrevem o comportamento de um fluido e é composta pela equação de conservação da massa e da equação da quantidade de movimento associadas ao volume de controle, quanto à geometria, condições iniciais e de condições de contorno aplicadas (FOX, 2006).

3.3 CONSERVAÇÃO DA MASSA

Baseia-se no princípio físico aplicado para as formulações de sistema como também de volume de controle, sendo o princípio de conservação da massa, onde por definição exige-se que a massa do sistema seja constante.

Sendo o escoamento incompressível onde a massa específica permanece constante não se tem uma função do espaço nem do tempo, sendo assim a equação de conservação da massa ou da continuidade após simplificações, de uma forma genérica pode ser escrita de tal forma, (FOX, 2006).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

Onde ∂ : operador de derivada parcial, t : variável tempo, ∇ : média temporal do vetor da velocidade, \mathbf{V} : vetor resultante das componentes de velocidade e ρ : massa específica.

O primeiro termo descreve a taxa de variação da massa dentro do volume de controle, enquanto que o segundo termo é a representação da taxa líquida de fluxo de massa, ou seja, a vazão líquida em massa através da superfície de controle.

3.4 QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Já o movimento do fluido pode ser representado por uma equação dinâmica que descreve a segunda lei de Newton através da dedução da forma diferencial da equação da quantidade de movimento sob um volume de controle infinitesimal de massa dm .

Quando se trata do escoamento incompressível com viscosidade constante, as equações de movimento são chamadas de equações de Navier-Stokes. Apresentar-se simplificadas quando escritas em termos das componentes de velocidade, (FOX, 2006).

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho(\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{S} \quad (2)$$

Onde ∇^2 : operador laplaciano, μ : viscosidade e \mathbf{S} : forças de campo ou de corpo.

4 METODOLOGIA

4.1 GEOMETRIA NO FORMATO CAD

Diante da necessidade dos programas comerciais que trabalham com CFD em se obter uma geometria compatível com objeto real a ser simulado, onde a análise tridimensional tem como base um conjunto completo difusor e impelidor de uma bomba de fluxo misto de uso comercial. A geometria da bomba foi desenhada, conforme a Figura 23, utilizando o programa AUTOCAD® versão 2012, considerando alguns parâmetros essenciais que definem o escoamento no interior dos canais do impelidor e difusor (Figura 24).

Figura 23 - Geometria no formato CAD do impelidor de sistema BCS

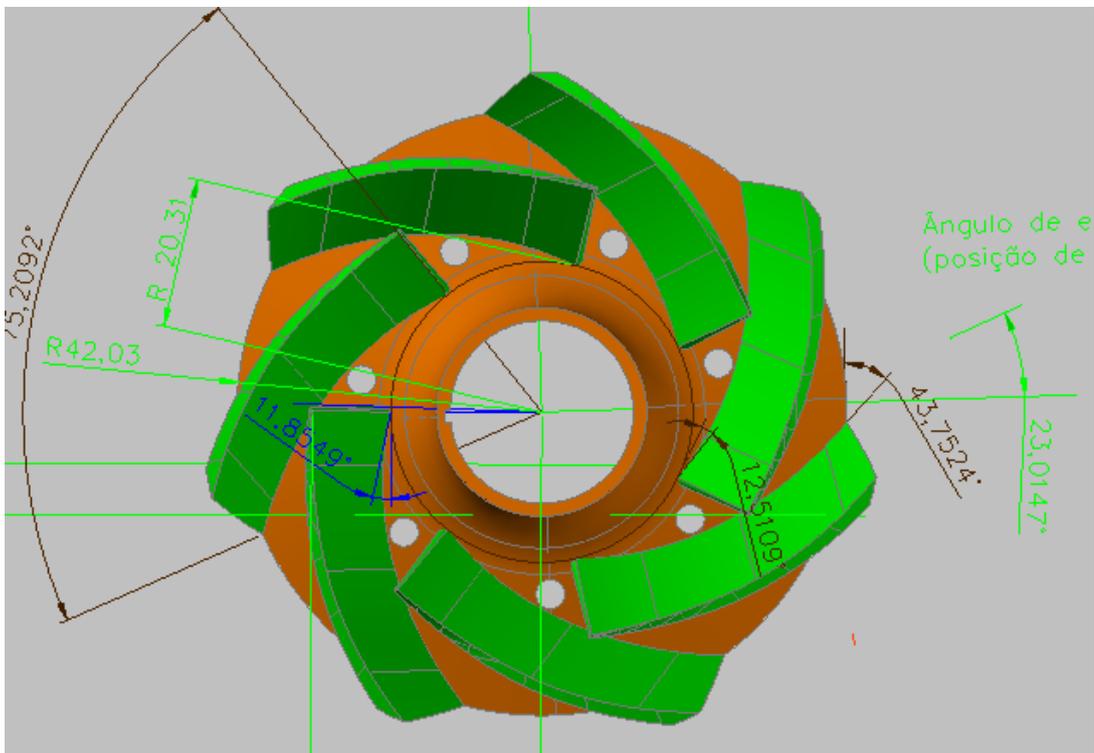
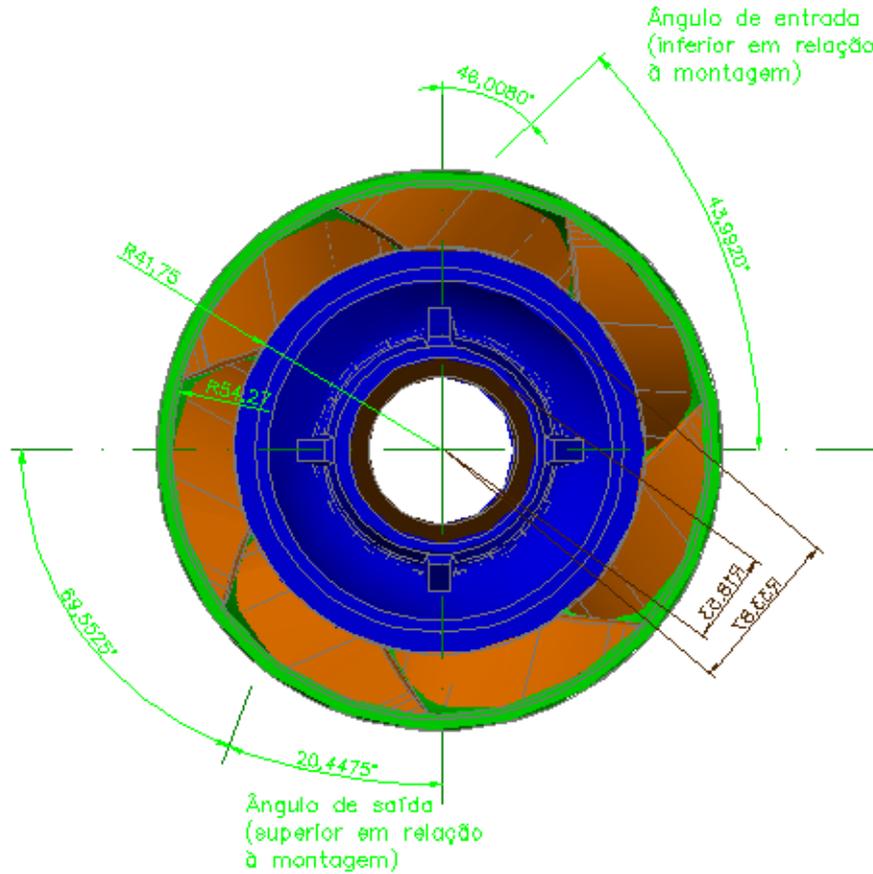


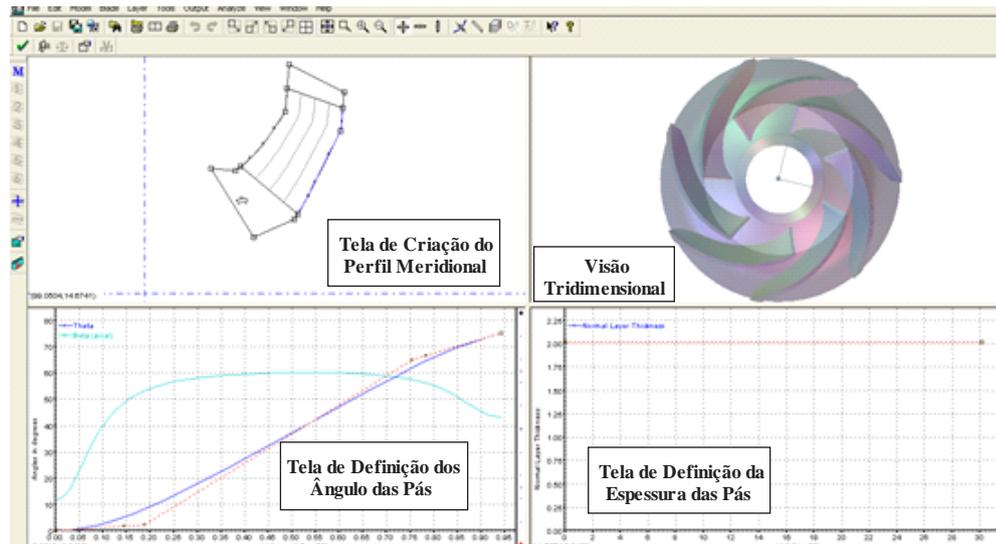
Figura 24 - Geometria no formato CAD do difusor de sistema BCS



4.2 GEOMETRIA NO FORMATO ANSYS® CFX®

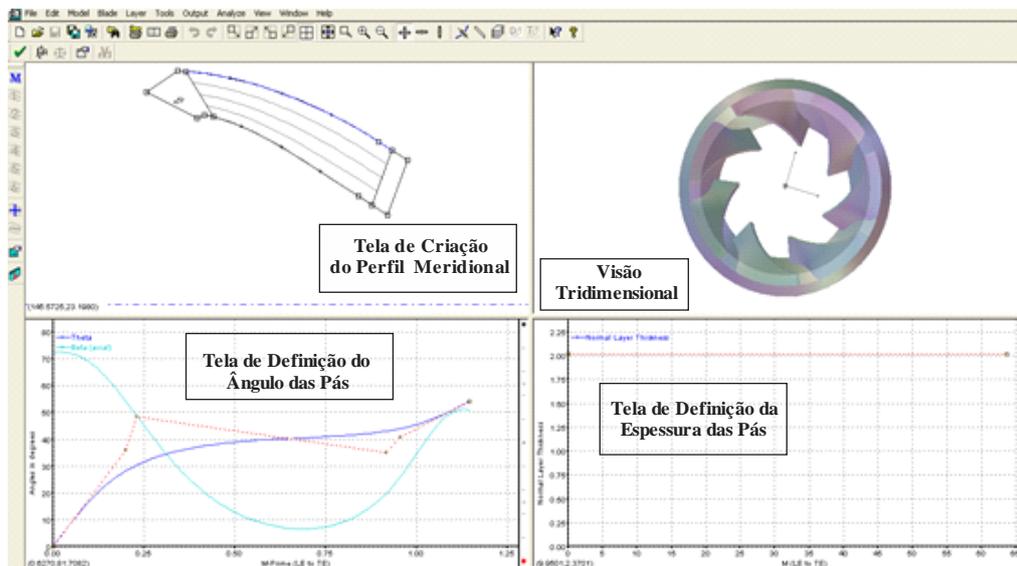
Seguindo a etapa de pré-processamento, toda a geometria foi refeita considerando as dimensões anteriormente obtidas na geometria em 3D no formato CAD (*Computer-Aided Design* - Desenho Assistido por Computador), onde um modelo para os perfis meridionais tanto do impelidor quanto do difusor foram definidos no módulo denominado BladeGen, pertencente ao programa ANSYS® CFX®. O perfil meridional revelado na Figuras 25 e Figura 26, permite uma descrição da pá em um sistema de coordenadas axial-radial, bem como definir as entradas (*inlets*) e saídas (*outlets*). Além disso, pode-se obter definições de ângulos e espessura das pás, resultando uma geometria tridimensional dos parâmetros inseridos.

Figura 25 - Tela do BladeGen®, definição do perfil meridional do impelidor



Fonte: Adaptado do software ANSYS® CFX®

Figura 26 - Tela do BladeGen®, definição do perfil meridional do difusor



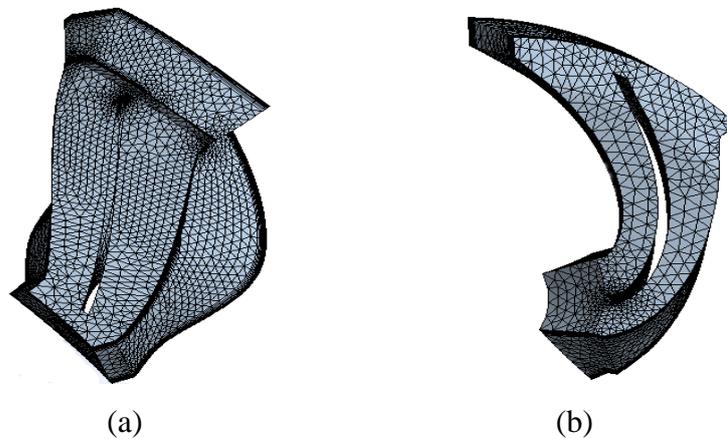
Fonte: Adaptado do software ANSYS® CFX®

4.3 GERAÇÃO DAS MALHAS

Com inserção de parâmetros para a definição do perfil meridional do impelidor quanto do difusor, obtém-se a partir do ANSYS® CFX® a geração automática da geometria da malha separadamente de ambos modelos (Figura 27 malha difusor (a) e malha impelidor (b)).

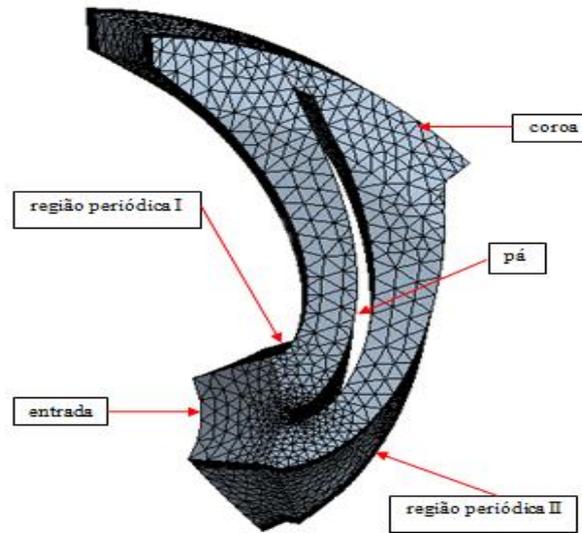
De acordo com a (Figura 28), é observado o caminho o qual o fluido pode percorrer, sendo o domínio do fluido, constituído por regiões sólidas tais como: pás, cubo e coroa. Como elementos pertencentes à constituição da malha, destacam-se: elementos tetraédricos, prismáticos e pirâmides. Na (Tabela 1) estão especificadas as características de cada malha gerada.

Figura 27 - Malha difusor (a) e Malha impelidor (b)



Fonte: Adaptado do software ANSYS® CFX®

Figura 28 - Regiões geradas da malha para o impelidor



Fonte: Adaptado de Maitelli, 2010

Tabela 1 - Características das malhas geradas pelo sistema

| <i>Domínio</i> | <i>Nós</i> | <i>Elementos</i> | <i>Tetraedros</i> | <i>Prismas</i> | <i>Pirâmides</i> |
|----------------|------------|------------------|-------------------|----------------|------------------|
| Impelidor | 41171 | 125962 | 75344 | 50416 | 202 |
| Difusor | 55888 | 175213 | 107699 | 66123 | 1391 |
| Domínio | 97059 | 30175 | 183043 | 116539 | 1593 |
| Total | | | | | |

4.4 PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

4.4.1 Propriedades físicas do domínio

Para a realização das simulações, necessita-se de um computador com uma configuração que suporte a utilização do programa ANSYS® CFX® e seus módulos. Como etapas seguintes no desenvolvimento do projeto: fase de geração da malha, como a determinação dos parâmetros físicos e propriedades dos fluidos para execução do programa. Nas simulações

foram utilizados dois fluidos sendo eles: a água de densidade 1000 kg/m^3 e viscosidade de $0,01 \text{ kg/m.s}$; e o óleo de densidade 946 kg/m^3 e viscosidade de $0,06 \text{ kg/m.s}$. O tipo de regime de escoamento é estacionário e o cálculo das pressões toma-se como base o valor de referência de um (1) atm. Quanto às superfícies sólidas foram consideradas lisas e o modelo de turbulência padrão definido no programa foi o $k - \epsilon$, que apesar de apresentar vantagem quanto a estabilidade em aplicações industriais, possui desempenho não adequado para determinados tipos de escoamento como em fluxos rotativos e possui como desvantagem de não tratar de forma adequada problemas de recirculações (MAITELLI, 2010).

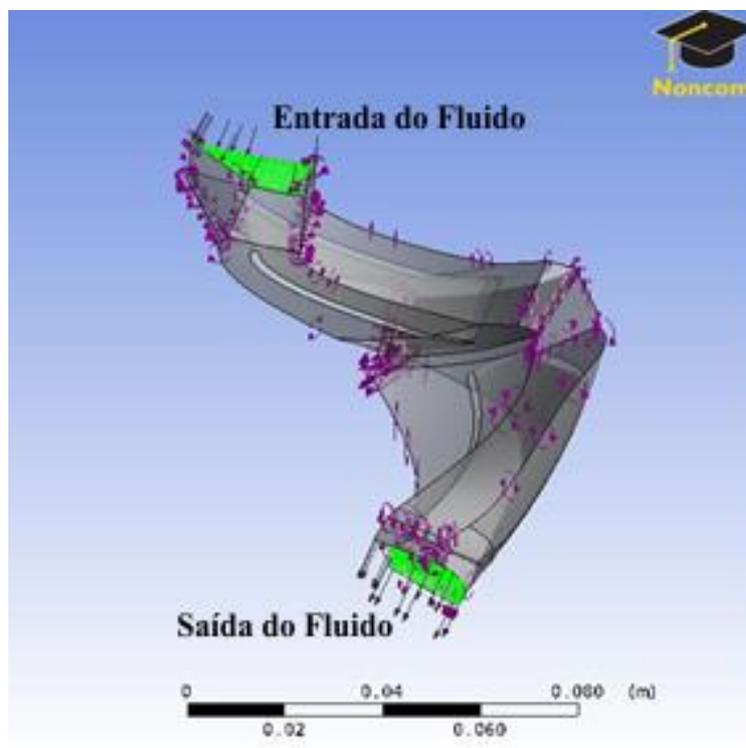
4.4.2 Condições de contorno

As condições de contorno são aplicadas quando se tem o objetivo de fazer uma análise de escoamento dos fluidos, determinando que um fluido ao entrar em contato com a parede sólida que é apenas uma das condições de contorno, deve ter a velocidade igual à da parede, ou seja, não há escorregamento entre o fluido e a parede.

De acordo a Figura 29, verificam-se as condições de contorno, de forma que na entrada (*inlet*) do canal foi definida uma pressão total de 1atm aplicada para todas as simulações. Quanto à condição de contorno na saída (*outlet*) foi definida uma vazão mássica para cada caso, como especificada na Tabela2.

Na interface, o modelo escolhido a ser utilizado através do programa ANSYS® CFX® é o *frozen rotor*. Esse modelo relaciona o escoamento do componente fixo para o rotativo, mudando o sistema de referência sem fazer médias, o que possibilita que características locais do escoamento como recirculações sejam transportadas através da interface.

Figura 29 - Definição das condições de escoamento na entrada e na saída dos domínios, modelo de turbulência e outros parâmetros da simulação



Fonte: Adaptado do software ANSYS® CFX®

Tabela 2 - Vazões utilizadas como condição de contorno

| <i>Vazão de cálculo volumétrica (m^3/d)</i> | <i>Vazão de cálculo Mássica (Kg/s)</i> | <i>Altura de Elevação correspondente (m)</i> |
|--|--|--|
| (q ₀) 600 | 6,94 | 12,8 |
| (q ₁) 800 | 9,26 | 11,8 |
| (q ₂) 900 | 10,41 | 11,3 |
| (q ₃) 1000 | 11,57 | 10,8 |
| (q ₄) 1200 | 13,88 | 9,6 |
| (q ₅) 1400 | 16,20 | 7,6 |

4.4.3 Critérios de Convergência

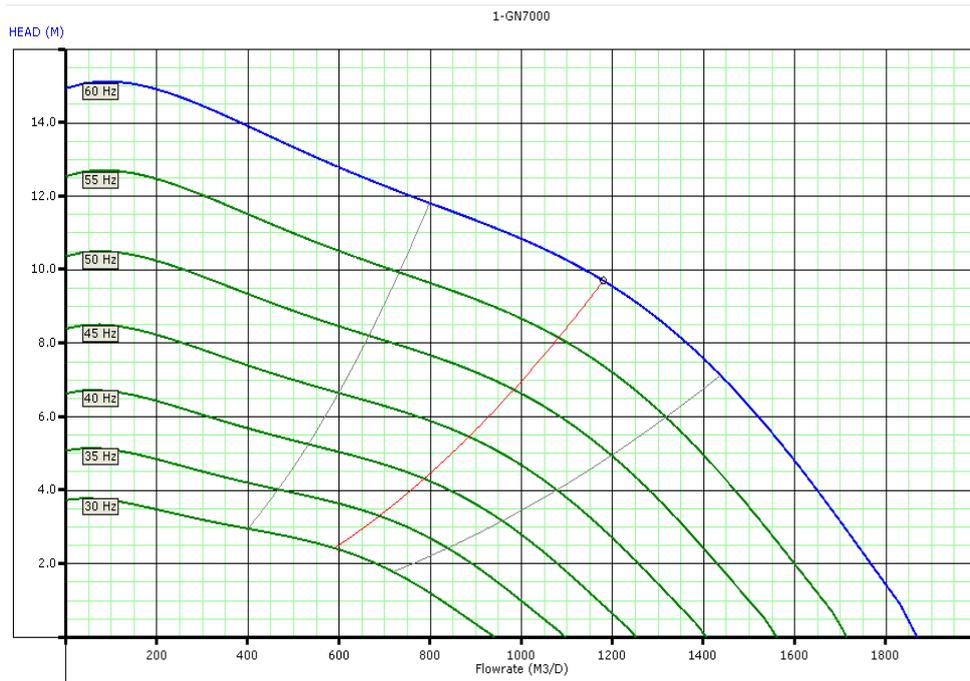
Como critério de convergência foi utilizado a Raiz Quadrada da Média dos Quadrados (*Root Mean Square - RMS*), que é definido como a raiz quadrada da média dos quadrados da velocidade obtido tomando todos os resíduos através do domínio. O valor de resíduo nas simulações com a água foi de 0,001, enquanto que nas simulações de óleo foi de 0,0005, com um número mínimo de iterações de 1 e máximo de 200, em todas as simulações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente simulações foram implementadas para um modelo geométrico em 3D através do programa comercial o ANSYS® CFX® 11.0, tendo como objetivo descrever a influência da viscosidade do fluido monofásico nos canais de um estágio de uma bomba de sistema BCS utilizando fluidos como água e o óleo.

Tendo em vista as simulações realizadas com o modelo computacional, dados geométricos da bomba e curvas características fornecidas pelos fabricantes conforme Figura 30, que representaram o desempenho das bombas com água, modificações foram realizadas quando a bomba passou a operar com fluidos de outros valores de densidade e viscosidade, resultando em uma redução na altura de elevação (*Head*) da bomba, resultado esse definido diante de parâmetros utilizados como também o próprio desempenho da bomba para uma comparação com os dados experimentais segundo Amaral (2007), como também com os dados do fabricante.

Figura 30 - Gráfico do fabricante (*head* x *flowrate*)



Quanto à etapa de processamento nos testes com a água utilizando um valor de resíduo de 0,001 a convergência foi atingida entre 60 e 100 iterações, onde o número de iterações

apresentou-se maior quando aplicado para vazões mais baixas mostrando maiores dificuldades de convergir para vazões mássicas próximas de zero, enquanto que no óleo o tempo de convergência foi maior entre 100 e 150 devido ao valor residual de 0,0005 sendo uma convergência mais confiável devido ao menor valor residual.

Segundo Maitelli (2010), diante dos percentuais obtidos tanto para o óleo quanto para a água, é que ambos encontram-se dentro do percentual aceitável na literatura que é de mais ou menos 30% de defasagem entre o modelo experimental e o simulado, como observado na Tabela 3 e Tabela 4. Todo esse processo foi analisado e testado com determinados parâmetros gerais e as condições de contorno utilizadas para a simulação do fluxo.

Tabela 3 - Valores de altura de elevação da água para o fabricante e o simulador

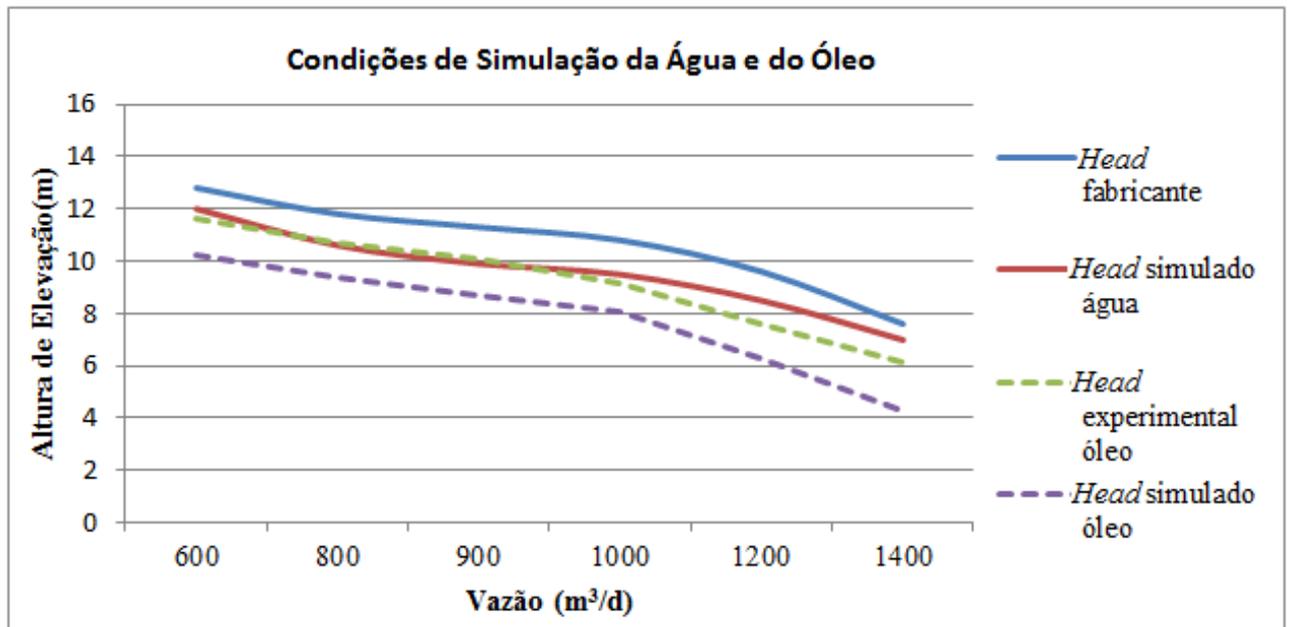
| <i>Vazão de cálculo volumétrica (m³/d)</i> | <i>Vazão de cálculo Mássica (Kg/s)</i> | <i>Altura de Elevação do fabricante (m)</i> | <i>Altura de Elevação do Simulador (m)</i> | <i>Desvio %</i> |
|---|--|---|--|-----------------|
| (q ₀) 600 | 6,94 | 12,8 | 12,05 | 6 |
| (q ₁) 800 | 9,26 | 11,8 | 10,69 | 9 |
| (q ₂) 900 | 10,41 | 11,3 | 9,9 | 11 |
| (q ₃) 1000 | 11,57 | 10,8 | 9,49 | 10 |
| (q ₄) 1200 | 13,88 | 9,6 | 8,5 | 11 |
| (q ₅) 1400 | 16,20 | 7,6 | 6,99 | 8 |

Tabela 4 - Valores de altura de elevação do óleo experimental e para o simulador

| <i>Vazão de cálculo volumétrica (m³/d)</i> | <i>Vazão de cálculo Mássica (Kg/s)</i> | <i>Altura de Elevação Experimental (m)</i> | <i>Altura de Elevação do Simulador (m)</i> | <i>Desvio (%)</i> |
|---|--|--|--|-------------------|
| (q ₀) 600 | 6,94 | 11,6 | 10,2 | 12 |
| (q ₁) 800 | 9,26 | 10,7 | 9,4 | 12,1 |
| (q ₂) 900 | 10,41 | 10,06 | 8,7 | 13,5 |
| (q ₃) 1000 | 11,57 | 9,14 | 8,09 | 11,5 |
| (q ₄) 1200 | 13,88 | 7,62 | 6,27 | 17,8 |
| (q ₅) 1400 | 16,20 | 6,09 | 4,26 | 30 |

Como resultados finais das simulações, conclui-se que o modelo tridimensional em estudo é adequado para a simulação de uma bomba centrífuga de fluxo misto, tanto para a água como para fluidos viscosos (óleos), pois os resultados foram compatíveis quando comparados com dados experimentais segundo Amaral (2007), como observado na Figura 31.

Figura 31 - Condições de simulação da água, 3500rpm e 1cp e condições de simulação do óleo, 3500rpm e 60cp.



6 CONCLUSÃO

- Uma etapa importante no desenvolvimento do projeto foi a geração da geometria da bomba para criação de malhas que resultaram num aceitável desempenho da bomba quando comparados com resultados do próprio fabricante;
- As análises foram realizadas a fim de obter a curva característica de altura de elevação (*Head*) da água e do óleo e comparar com os dados do fabricante como também com os experimentais segundo Amaral (2007);
- Como resultados obtidos com as simulações, conclui-se que o modelo em estudo é adequado para a simulação de uma bomba centrífuga de fluxo misto, devido aos resultados mostrarem compatibilidade quando comparados com dados experimentais disponíveis na bibliografia existente.

6.1 RECOMENDAÇÕES

- Como trabalho futuro tem-se a necessidade de uma geometria mais aprimorada, de forma a se obter resultados do *head* simulado cada vez mais próximo do experimental;
- Realização de novos testes com diferentes óleos, visto que os resultados até o momento mostraram um *head* simulado excelente quando comparado com o experimental;
- Avaliar os parâmetros de convergência;
- Descrever a influência das variáveis típicas de uma bomba centrífuga, relacionadas quanto a geometria e ao escoamento de forma a otimizar o processo de produção.

6.2 SUBMISSÃO

- **SILVA, A. L. M.; ANDRADE, A. C. C.; MAITELLI, C. W. S. P. Simulação do escoamento monofásico em bombas centrífugas típicas da indústria de petróleo.** (Apresentação de Trabalho na XXII CIC Congresso de Iniciação Científica da UFRN – CIC, de 17 a 20 de outubro de 2011).
- **ANDRADE, A. C. C.; MAITELLI, C. W. S. P.; SILVA, A. L. M. Simulação do escoamento monofásico em bombas centrífugas típicas da indústria de petróleo.** (Artigo publicado em anais do congresso - *Rio Oil & Gas Conference* 2012, de 17 a 20 de setembro, Rio de Janeiro).
- **ANDRADE, A. C. C.; MAITELLI, C. W. S. P. Simulação do escoamento monofásico de fluidos viscosos em bombas centrífugas da indústria de petróleo.** (Trabalho Apresentado na Reunião Anual de Avaliação dos PRH's N-NE 2012, de 10 e 11 de outubro, Natal - RN).
- **ANDRADE, A. C. C.; MAITELLI, C. W. S. P. Simulação do escoamento monofásico de fluidos viscosos em bombas centrífugas da indústria de petróleo.** (Apresentação de Trabalho na XVIII SEMANA DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E CULTURA - CIENTEC no período de 23 a 27 de outubro de 2012 na UFRN).
- **ANDRADE, A. C. C.; MAITELLI, C. W. S. P. Simulação do escoamento monofásico de fluidos viscosos em bombas centrífugas da indústria de petróleo.** (Artigo aceito e publicado na Revista Petro & Química, edição 348) janeiro 2013.

REFERÊNCIAS

AMARAL, G. D. L. **Modelagem do escoamento monofásico em bomba centrífuga submersa operando com fluidos viscosos**. 2007, 260f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. Disponível:<http://bdt.d.bczm.ufrn.br/tde_arquivos/41/TDE-2011-08-09T083423Z-3560/Publico/CarlaWSPM_TESE.pdf>. Acesso em 10 maio 2013.

ASUAJE, M.; BAKIR, F.; KOUIDRI, S.; KENYERY, F.; REY, R. **Numerical modelization of the flow in centriugal pump: volute influence in velocity and pressure fields**. International Journal of Rotating Machinery, 2005:3, p.244-255, 2005. Disponível:<<http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=numerical%20modelization%20of%20the%20flow%20in%20centriugal%20pump%3A%20volute%20influence%20in%20velocity%20and%20pressure%20fields.%20&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDQQFjAB&url=http%3A%2F%2Fdownloads.hindawi.com%2Fjournals%2Fijrm%2F2005%2F345857.pdf&ei=CUG8UZPIIZDm8wSqiIHgDw&usg=AFQjCNFZQ8JSSvXbXXI0UD0sBn1XXcF2wA&bvm=bv.47883778,d.eWU>>. Acesso em 02 jun. 2013.

BIRD, R. B.; LIGHTFOOT, E. N.; STEWART, W. E. **Fenômenos de transporte**. Segunda edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC, 2004.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Sexta edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, LTC, 2006.

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. Disponível:<http://bdt.d.bczm.ufrn.br/tde_arquivos/41/TDE-2011-08-09T083423Z-3560/Publico/CarlaWSPM_TESE.pdf>. Acesso em: 20 maio 2013.

MAITELLI, C. W. S. de P. **Normas e práticas para instalações de bombeio centrífugo submerso**. 2012. Notas de aula.

NUNES, J. da S. **Estudos, modelagem e simulações de instalações de produção de petróleo no simulador pipesim com ênfase na otimização de Gas Lift Contínuo**, Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008. Disponível:<http://www.prh29.ufes.br/downloads/PG_Jonathan%20%20Nunes.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

NASCIMENTO, J. M. A. **Simulador computacional para poços de petróleo com método de elevação artificial por bombeio mecânico**. 2005, 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Elétrica, 2005.

Disponível:<<http://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/JoaoMAN.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

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

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

THOMAS, J. E.; TRIGGIA, A.; CORREIA, C. A.; FILHO, C. V.; XAVIER, J. A. D.; MACHADO, J. C. V.; FILHO, J. E. de S.; PAULA, J. L. de; ROSSI, N. C. M. de; PITOMBO, N. E. S.; GOUVEIA, P. C. V. de M.; CARVALHO, R. de S.; BARAGAN, R. V. **Fundamentos da engenharia de petróleo**. Segunda edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.