



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET



CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – CEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROTÓTIPO DE UMA UNIDADE DE BOMBEIO MECÂNICO

Ana Rafaelly Amaral Bezerra

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

Dezembro de 2015

ANA RAFAELLY AMARAL BEZERRA

PROTÓTIPO DE UMA UNIDADE DE BOMBEIO MECÂNICO

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. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Orientadora – UFRN

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
Membro Examinador – UFRN

Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues
Membro Examinador – UFRN

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Roquefeller e Maria da Conceição,
e a minha irmã, Roberta Alessandra.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida, por me dar forças nos momentos de maior dificuldade e as várias graças alcançadas no decorrer da caminhada.

A toda minha família, em especial meu pai, minha mãe e minha irmã pelo incentivo, apoio e carinho.

Aos meus tios, em especial a minha Tia Havana Bezerra, por todo apoio prestado desde o início da graduação.

À minha orientadora, Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, por aceitar guiar meus passos nesta difícil caminhada, por seus ensinamentos, pela confiança depositada em mim, seus conselhos e sua disponibilidade.

Ao Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa, por seus ensinamentos, conselhos e orientações.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Petróleo, pelos valiosos ensinamentos e conhecimento compartilhado.

À João Paulo e Arivaldo Alves, por toda atenção e dedicação para desenvolvimento e consolidação deste trabalho.

Aos colegas do curso de Engenharia de Petróleo, especialmente Amanda Braun, Larissa Martins e Brenda Martins e Macel Henrique, o meu muito obrigado pelos momentos de dificuldades superados juntos, pelo companheirismo e incentivo.

A todos os meus companheiros de pesquisa, especialmente Hannah Lícia, Gabriel Bessa, Diogo Pocrifka e Lucas Gurgel, por toda aprendizagem e troca de conhecimento, por estarem sempre dispostos a ajudar e por todo profissionalismo e incentivo para entrega de bons resultados.

Aos meus amigos, mesmos os fisicamente distantes, que contribuíram de forma direta e indiretamente para meu crescimento nessa árdua caminhada.

À empresa WEG por financiar parte desse projeto.

À Petrobras e ao PRH PB-221 pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN), pela parceria para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

O Bombeio Mecânico é um método de elevação artificial bastante utilizado por ser de simples operação, fácil diagnóstico de falhas e boa relação custo/benefício. Nesse método, a unidade de bombeio que está localizada na superfície transforma o movimento rotativo de um motor elétrico, ou de combustão interna, em movimento alternativo de uma coluna de hastes. Então, as hastes transmitem o movimento para o fundo do poço, acionando uma bomba de fundo que eleva os fluidos produzidos pelo reservatório para a superfície. Este trabalho apresenta e descreve a construção de um protótipo capaz de simular a operação de uma unidade real de bombeio mecânico. A metodologia adotada para a construção do protótipo foi a elaboração de um projeto gráfico na ferramenta computacional *SketchUp*. Os parâmetros para os desenhos técnicos do projeto vieram a partir da redução de escala das medidas obtidas de uma unidade de bombeio real. Essa etapa foi de fundamental importância na fabricação dos componentes específicos para garantir harmonia na montagem do conjunto. O protótipo construído consiste de um sistema completo e transportável, apto a simular o funcionamento de uma unidade real, incluindo a operação de bombeamento. Tal funcionalidade é possível em função de os componentes de subsuperfície terem sido construídos com material transparente. Dessa forma, caracteriza-se o projeto como uma ferramenta de ensino em ambiente acadêmico com potencial em aplicações de técnicas de automação e controle.

Palavras-chave: Elevação Artificial, Bombeio Mecânico, Protótipo.

ABSTRACT

The Sucker-Rod Lift is an artificial lift method widely used because it is relatively simple to operate, easy to point out possible failures, and it has a good cost-benefit relationship. In this method, the pumping unit located at the surface transforms the rotary motion of an electric motor, or internal combustion engine, in an alternative motion for the rod string. The rod string transmits motion to the well bottom-hole to turn on the pump that lifts the production fluids from the reservoir to the surface. This work presents and describes the construction of a prototype able to simulate the operation of a real sucker-rod pumping unit. The methodology adopted for the construction of the prototype was the development of a structural project design in a computational tool called SketchUp. The parameters for the project's technical drawings came from the downscaling of measurements obtained from an actual pumping unit. This step was of fundamental importance to build specific components to ensure harmony in the assembly. The built prototype is a complete, transportable system, able to simulate the operation of a real unit including pumping operation. Such functionality is possible because subsurface components have been made with transparent material. Therefore, the project may be characterized as a teaching tool in an academic environment with potential for automation and control engineering applications.

Keywords: Artificial Lift, Sucker-Rod Pumping, Prototype.

Sumário

1. Introdução.....	14
1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.1 Objetivos específicos	15
2. Aspectos Teóricos	18
2.1 Produção de Petróleo	18
2.1.2 Elevação Natural.....	18
2.1.3 Elevação Artificial.....	19
2.1.3.1 <i>Gas lift</i>	20
2.1.3.2 <i>Plunger lift</i>	21
2.1.3.3 Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP).....	22
2.1.3.4 Bombeio Centrífugo Submerso (BCS).....	22
2.1.3.5 Bombeio Hidráulico a Jato (BHJ)	23
2.1.3.5 Bombeio Mecânico	24
2.2 Parâmetros básicos de projeto.....	33
3. Metodologia e Desenvolvimento	41
3.1 Metodologia para os componentes de superfície (Unidade de Bombeio)	41
3.2 Metodologia para os componentes de subsuperfície	53
3.3 Metodologia para os componentes elétricos	59
4. Resultados e Discussões.....	62
4.1 Construção do protótipo.....	62
4.2 Dificuldades encontradas	66
5. Conclusão.....	70
Referências Bibliográficas.....	72

Lista de Figuras

Figura 2.1. Poço equipado com <i>gas lift</i>	20
Figura 2.2. Poço equipado com <i>plunger lift</i>	21
Figura 2.3. Configuração típica de um sistema de BCP.	22
Figura 2.4. Sistema de Bombeio Centrífugo Submerso.	23
Figura 2.5. Sistema completo de um poço produzindo com elevação por BHJ.	24
Figura 2.6. Unidade de Bombeio.....	26
Figura 2.7. Unidade de Bombeio tipo Mark II.	28
Figura 2.8. Unidade de Bombeio balanceada a ar.	29
Figura 2.9. Unidade de Bombeio contrapesos no balancim.	29
Figura 2.10. Bomba tubular e bomba insertável.....	30
Figura 2.11. Curso ascendente do ciclo de bombeio.	32
Figura 2.12. Curso descendente do ciclo de bombeio.	33
Figura 2.13. Geometria da UB convencional.	34
Figura 2.14. Triângulo retângulo para determinação do comprimento K.	35
Figura 3.1. Fotografia da unidade de bombeio, NUPEG/UFRN.....	41
Figura 3.2. Modelo 3D do protótipo de bombeio mecânico.....	44
Figura 3.3. Modelo 3D da viga principal.....	45
Figura 3.4. Modelo 3D com foco nas dimensões frontais da cabeça da UB.	46
Figura 3.5. Modelo 3D com foco nas dimensões posteriores da cabeça da UB.....	46
Figura 3.6. Modelo 3D do tripé.	47
Figura 3.7. Modelo 3D do Mancal Central (Viga principal).	48
Figura 3.8. Modelo 3D do Mancal Central (Tripé).	48
Figura 3.9. Modelo 3D do Mancal Equalizador.	49
Figura 3.10. Modelo 3D da viga equalizadora.	50
Figura 3.11. Modelo 3D da biela.	50
Figura 3.12. Modelo 3D dos contrapesos e da manivela.	51
Figura 3.13. Modelo 3D do redutor.	52
Figura 3.14. Modelo 3D da base (Mesa).	53
Figura 3.15. Modelo 3D do Revestimento.	55
Figura 3.16. Modelo 3D do Reservatório.	56

Figura 3.17. Modelo 3D da coluna de produção.	56
Figura 3.18. Modelo 3D do pistão.	57
Figura 3.19. Modelo 3D da válvula de passeio.	58
Figura 3.20. Modelo 3D da válvula de pé.	58
Figura 3.21. Relação entre polias.	60
Figura 4.1. Protótipo de uma unidade de bombeio.	62
Figura 4.2. Painel de controle.	63
Figura 4.3. Carta dinamométrica idealizada.	66
Figura 4.4. Cabeça da UB reajustada.	67
Figura 4.5. Adaptação realizada para inserção do revestimento a base.	67

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Medidas da UB de referência e medidas do protótipo.....	42
Tabela 3.2. Orçamento para escolha do material da UB.	43
Tabela 3.3. Dimensões dos componentes de subsuperfície.....	54
Tabela 4.1. Dados de entrada.....	64
Tabela 4.2. Parâmetros operacionais do protótipo.	65

Lista de Símbolos e Abreviaturas

API – American Petroleum Institute

A_{rk} – área da seção transversal da haste (pol²)

BCP – Bombeio por Cavidades Progressivas

BCS – Bombeio Centrífugo Submerso

BHJ – Bombeio Hidráulico a Jato

BM – Bombeio Mecânico

C – comprimento entre a articulação e a extremidade da viga principal onde fica presa a biela (cm)

CBE – efeito de contrabalanceio (lbf)

D_p – diâmetro do pistão (pol)

E_f – empuxo (lbf)

F_o – peso da coluna de fluido (lbf)

g – aceleração gravitacional (m/s)

GLC – *Gas-lift* contínuo

GLI – *Gas-lift* intermitente

h_{desc} – coluna hidrostática de descarga (m)

h_{suc} – coluna hidrostática de sucção (m)

K – comprimento compreendido entre a articulação do da viga principal e o eixo do redutor (cm)

l – comprimento do pistão (pol)

L_k – comprimento da haste (m)

MPRL – carga mínima (lbf)

N – velocidade de bombeio (cpm)

P – comprimento da biela (cm)

PD – deslocamento volumétrico (m³ /dia)

P_{desc} – pressão de descarga (psi)

P_H – pressão devido ao nível dinâmico (psi)

P_{suc} – pressão de sucção (psi)

PPRL – carga máxima (lbf)

PT – Torque máximo (lbf.in)

R – comprimento compreendido entre o eixo do redutor e a posição de conexão da biela na manivela (cm)

RGO – razão gás-óleo (m^3/m^3)

S – curso do pistão (cm)

S_p – curso do pistão (pol)

UB – unidade de bombeio

$V_{deslocado}$ – volume deslocado de fluido (m^3)

W_r – peso estático da coluna de hastes no ar (lbf)

W_{rf} – peso estático da coluna de hastes flutuante (lbf)

Letras gregas

Δ_d – folga entre camisa e pistão (pol)

Δ_p – diferença de pressão sobre o pistão (psi)

ρ_{rk} – massa específica da haste (lbm/ft^3)

ρ_w – massa específica da água (lbm/ft^3)

ρ_f – massa específica do fluido (lbm/ft^3)

δ – esforço dinâmico (lbf)

μ – viscosidade do fluido (cP)

ψ_b – ângulo que corresponde à posição mais baixa da cabeça (grau)

ψ_t – ângulo que corresponde à posição mais alta da cabeça (grau)

δ – esforço dinâmico (lbf)

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Ao serem descobertas novas jazidas de petróleo, surge a necessidade de elevar os hidrocarbonetos até a superfície para serem comercializados. Essa elevação pode acontecer através da pressão natural do reservatório ou por meio de métodos de elevação artificial.

A pressão natural do reservatório é geralmente elevada no início da vida produtiva da maioria dos poços, permitindo aos fluidos presentes no reservatório escoarem livremente até a superfície e quando isso acontece, pode ser afirmado que o poço está produzindo por elevação natural. Com a produção contínua, a pressão natural do reservatório diminui, não sendo mais suficiente para vencer as perdas de pressão no caminho até a superfície. Quando isso acontece é necessária a utilização de métodos que forneçam energia necessária para a elevação dos fluidos, são os chamados métodos de elevação artificial.

A escolha do melhor método de elevação para um poço está associada ao estudo da capacidade atual e futura do reservatório, além disso, a geometria do poço, as propriedades dos fluidos contidos na formação, profundidade do reservatório, razão gás-óleo (RGO), condições de operação, produção de areia, segurança e os custos, são parâmetros essenciais para seleção do método a ser usado.

Os métodos de elevação artificial mais conhecidos são:

- Bombeio Mecânico (BM);
- Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP);
- Bombeio Centrífugo Submerso (BCS);
- Bombeio Hidráulico a Jato (BHJ);
- *Gas-lift* contínuo e intermitente (GLC e GLI), e
- *Plunger-lift*.

O bombeio mecânico surgiu logo após o nascimento da indústria de petróleo e é considerado o primeiro método de elevação artificial. Estima-se que dos poços equipados com elevação artificial, a nível mundial, cerca de 71% utilizam o sistema de bombeio mecânico. No Brasil, 73% dos poços produzem através do bombeio mecânico (PETROBRAS, 2014 *apud* LIMA, 2014).

Sua popularidade se dá pelo fato de o método apresenta como vantagem uma boa relação custo/benefício, manutenção fácil e barata, e simplicidade de operação. Neste método a unidade de bombeio que está localizada próxima à cabeça do poço, transforma o movimento rotativo de um motor em movimento alternativo da coluna de hastes, esta por sua vez, transmite o movimento alternativo para o fundo do poço acionando uma bomba de fundo que eleva os fluidos produzidos até a superfície.

Devido a sua importância na área de elevação, o bombeio mecânico tornou-se foco principal nesse trabalho. O objetivo inicial foi projetar um protótipo articulado de uma unidade de bombeio que fosse capaz de simular tanto os componentes, como o funcionamento de uma unidade de bombeio real.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é exposto todo conteúdo do trabalho, bem como os seus objetivos gerais e específicos. No capítulo dois, compreende-se todo o fundamento teórico a respeito do bombeio mecânico. No capítulo três é descrita toda a metodologia para o desenvolvimento do protótipo da unidade de bombeio. No quarto capítulo, os resultados obtidos da construção do protótipo, e, por fim, no capítulo cinco são abordadas as conclusões a cerca do trabalho desenvolvido.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é construir um protótipo funcional de uma unidade de bombeio, capaz de reproduzir um sistema de Bombeio Mecânico em ambiente industrial numa escala reduzida.

1.1.1 Objetivos específicos

Elaborar um projeto gráfico de um sistema de BM.

Desenvolver um sistema completo transportável, com no máximo 1,30m de altura, de forma que seja possível ser conduzida em uma mesa com rodinhas, e que todos os seus componentes sejam visíveis e distintos.

Construir todos os componentes de subsuperfície com material transparente para obter uma ótima visualização da operação das válvulas de pé e de passeio, e do movimento do pistão.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos Teóricos

Neste capítulo, é feito um levantamento teórico a cerca dos principais tópicos, cruciais para o entendimento e desenvolvimento desse trabalho.

2.1 Produção de Petróleo

Para a produção de petróleo é necessário, primeiramente, uma análise dos dados geológicos e sísmicos, visando reconhecer as situações mais favoráveis para o armazenamento de petróleo. Após o reconhecimento, decide-se perfurar o poço, sendo possível confirmar a presença de óleo. Juntamente com a perfuração é feita a completação do poço com diversas operações destinadas a preparar o poço para produzir óleo ou gás.

Em seguida é realizada a avaliação das formações, que são estudos destinados a estimar a capacidade produtiva das reservas, verificando se a produção é viável comercialmente ou não. Quando um reservatório possui pressão naturalmente elevada e suficiente para que haja o fluxo de fluidos do reservatório até a superfície, dizemos que esse poço é surgente e que está produzindo por elevação natural.

Porém, quando a pressão do reservatório não é mais suficiente para elevar os fluidos até a superfície ou deseja-se um aumento na vazão de produção, faz-se necessário a utilização dos métodos de elevação artificial, que são capazes de fornecer pressão suficiente para o aumento da vazão.

2.1.2 Elevação Natural

A produção por surgência ou elevação natural, é o método de elevação mais simples e econômico, e requer do reservatório grande quantidade de energia armazenada na forma de pressão. Os poços surgentes, em sua grande maioria, não apresentam problemas técnicos ou operacionais e produzem com menores custos (Nascimento, 2005).

A elevação natural ocorre no início da vida produtiva da maioria dos poços e demanda que eles apresentem uma pressão de fluxo no fundo do poço capaz de vencer as perdas de pressão no caminho até a superfície. Quando essa pressão não é mais

suficiente e os fluidos presentes no reservatório deixam de fluir livremente até a superfície, são necessárias intervenções através da aplicação de métodos que forneçam energia extra.

Um poço deixa de ser surgente quando a produção contínua reduz a pressão do reservatório, tornando-a menor que as perdas de pressão do poço, ou se houver modificações na composição do fluido provocando aumento nas perdas de pressão, como por exemplo, a queda na produção de gás que provoca um acréscimo na resistência ao fluxo.

2.1.3 Elevação Artificial

Um poço no início de sua vida produtiva pode ser surgente, mas com o passar do tempo e a produção contínua necessitará de energia extra para produzir, devido à queda de pressão no reservatório. Em outros casos, o reservatório é depletado, e desde o início necessita de equipamentos que auxiliem na elevação dos fluidos até a superfície (Lima, 2014).

Essa energia extra é fornecida através de mecanismos que forneçam um diferencial de pressão adicional sobre o reservatório, resultando em um aumento de vazão. Esses mecanismos são conhecidos na indústria petrolífera como métodos de elevação artificial.

A elevação artificial consiste em mecanismos, equipamentos e técnicas que transmitem a energia da superfície para o fundo do poço, a fim de elevar os fluidos contidos no reservatório para a superfície e tornando a produção do poço viável economicamente.

A seleção do método de elevação artificial é de suma importância para a vida produtiva de um poço, pois está atrelada ao estudo da capacidade atual e futura do reservatório, além disso, a escolha incorreta do método e seu dimensionamento inadequado podem levar a uma perda de produção e inúmeros problemas operacionais.

Desta forma, a seleção do método a ser usado depende de vários parâmetros dos quais podemos destacar: a geometria do poço, as propriedades dos fluidos contidos na

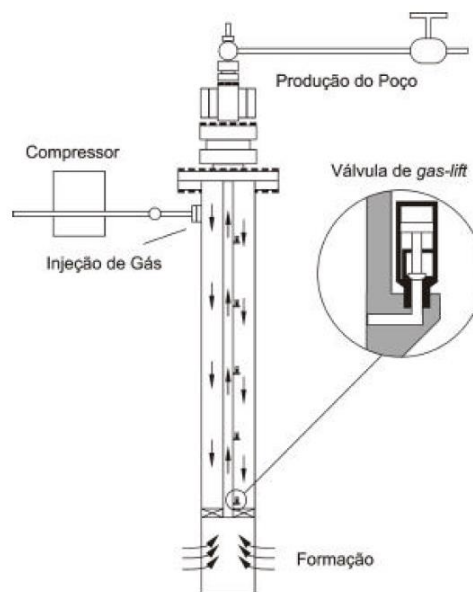
formação, profundidade do reservatório, razão gás-óleo (RGO), condições de operação, produção de areia, segurança e os custos (Nascimento, 2005).

A seguir, são brevemente apresentadas alguns dos principais métodos de elevação artificial existentes na indústria de petróleo.

2.1.3.1 *Gas lift*

O *gas lift* é um dos sistemas de elevação mais utilizados (Figura 2.1), onde a energia do gás comprimido é utilizada para reduzir a densidade dos fluidos produzidos e elevá-los até a superfície. Este método pode ser dividido em dois tipos: *gas lift* contínuo e *gas lift* intermitente.

Figura 2.1. Poço equipado com *gas lift*.



Fonte: Nascimento, 2005.

No *gas lift* contínuo, o gás altamente pressurizado é injetado continuamente na coluna de produção, provocando uma redução da densidade média dos fluidos e das perdas de cargas em seu interior. Assim a pressão do reservatório torna-se suficiente para elevar a mistura gás-líquido para superfície.

Já o *gas lift* intermitente, consiste na injeção periódica de um grande volume de gás a alta pressão logo abaixo de uma coluna de fluidos que é elevada através do

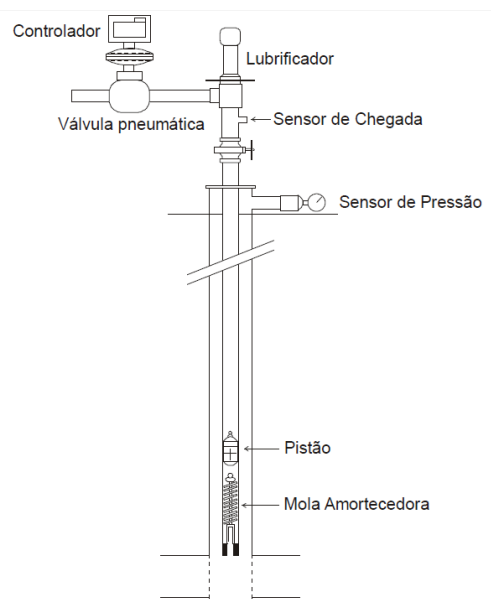
deslocamento de golfadas. As injeções são em intervalos definidos e controlados, isto é, é realizada toda vez que a coluna de fluido é novamente formada.

A escolha entre o GLC e o GLI depende essencialmente da pressão estática da formação e do índice de produtividade do poço. Geralmente, utiliza-se GLI para poços que apresentam pressão estática e IP baixos (Lima, 2014).

2.1.3.2 *Plunger lift*

O *plunger lift* se assemelha ao *gas lift* intermitente. Seu princípio de funcionamento consiste na acumulação de uma coluna de líquido, logo acima de um pistão especial, na coluna de produção. O gás pressurizado se expande e toda coluna de líquido formada acima do pistão é elevada até a superfície, como uma golfada. A Figura 2.2 apresenta um poço equipado com *plunger lift*.

Figura 2.2. Poço equipado com *plunger lift*.



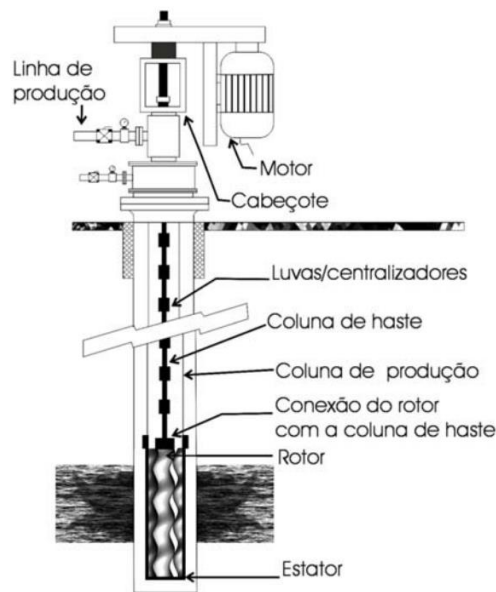
Fonte: Nascimento, 2005.

O pistão é o elemento mais importante desse sistema, sendo responsável por impedir o retorno de líquido para o fundo do poço, também conhecido como *fallback*. Além disso, o pistão também exerce o importante papel de remover as incrustações ou hidratos da parede da coluna de produção.

2.1.3.3 Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP)

O bombeio por cavidades progressivas é um método de elevação artificial em que a energia extra é transmitida através de uma bomba de cavidades progressivas, elevando os fluidos produzidos até a superfície, sua configuração típica pode ser observada na Figura 2.3.

Figura 2.3. Configuração típica de um sistema de BCP.



Fonte: Vidal, 2005.

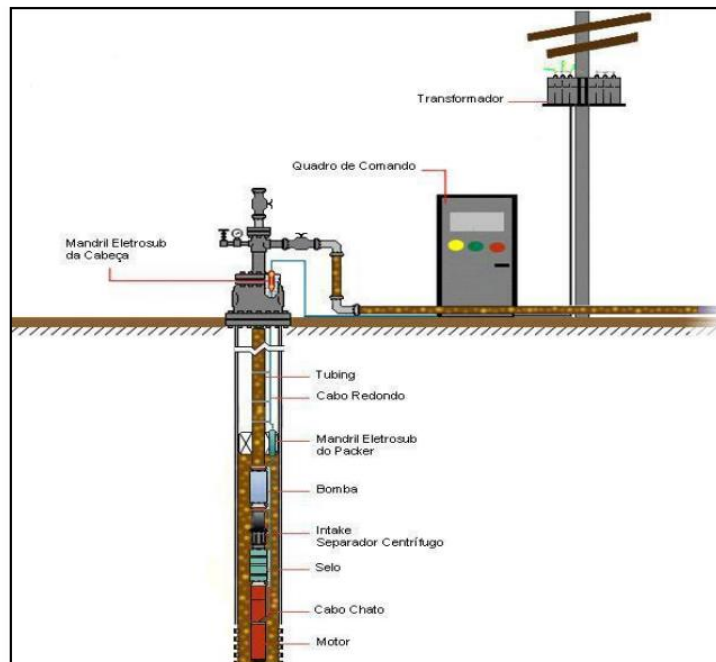
A bomba de cavidades progressivas é do tipo deslocamento positivo e é constituída basicamente de um rotor e um estator. A geometria do conjunto é tal que forma uma série de cavidades herméticas idênticas. O rotor ao girar no interior do estator no sentido da sucção para a descarga, origina um movimento axial das cavidades e realizando a ação de bombeio. A bomba pode ser acionada na superfície, por meio de uma coluna de hastes e um cabeçote de acionamento, ou diretamente no fundo do poço, por meio de um acionador elétrico ou hidráulico acoplado á bomba (ESTEVAM, 1993 apud Sousa et al).

2.1.3.4 Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)

No BCS a energia é transmitida para o fundo do poço através de um cabo elétrico. O motor elétrico de subsuperfície transforma a energia elétrica em energia

mecânica, que é entregue ao fluido sob a forma de pressão, através de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios. O conjunto motor-bomba é instalado no fundo poço, fixado na extremidade da coluna e fica submerso nos fluidos provenientes do reservatório, de acordo com a Figura 2.4.

Figura 2.4. Sistema de Bombeio Centrífugo Submerso.



Fonte: Mançú, 2013.

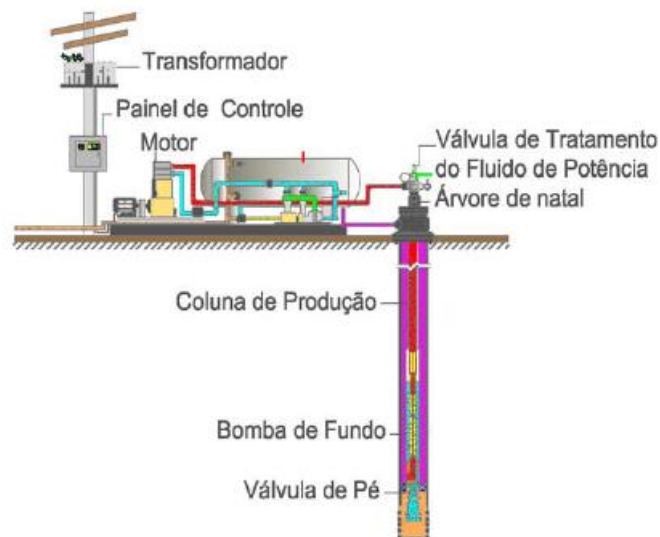
O sistema BCS pode ser dividido em conjunto de equipamentos de superfície e conjunto de equipamentos de subsuperfície. Na superfície, os principais componentes são a cabeça de produção, caixa de ventilação, fonte de energia elétrica, quadro de comandos e transformadores. Já os componentes de subsuperfície são o motor elétrico, a bomba, o cabo, o protetor e a coluna de produção.

2.1.3.5 Bombeio Hidráulico a Jato (BHJ)

O Bombeio Hidráulico a Jato consiste no bombeamento de um fluido hidráulico para o fundo do poço, onde está instalada uma bomba hidráulica. O fluido injetado se mistura com o fluido produzido e ao passar por um difusor converte a energia de uma corrente de jato de alta velocidade em pressão elevando os fluidos até a superfície.

Esse método pode ser utilizado em poços desviados, com qualquer tipo de óleo, inclusive óleos pesados, sendo capaz de produzir com profundidades e vazões altas. A Figura 2.5 apresenta um sistema completo de um poço produzindo com elevação por BHJ.

Figura 2.5. Sistema completo de um poço produzindo com elevação por BHJ.



Fonte: Maitelli, 2010.

2.1.3.5 Bombeio Mecânico

O bombeio mecânico (*Sucker-rod Pumping*) é considerado o primeiro método de elevação artificial e sua importância se reflete na grande quantidade de poços instalados em todo mundo. O início do BM como método de elevação artificial de petróleo se confunde com o início da própria indústria de petróleo. No século XIX, os poços eram perfurados com brocas fixadas à extremidade de cabos de aço, que eram elevados e abaixados por vigas de madeira (“cavalos-de-pau”). Esse mesmo mecanismo de perfuração, geralmente movido a máquinas a vapor, acionava a coluna de hastes que se movimentava elevando os fluidos produzidos através de uma bomba alternativa fixa a sua extremidade (Araújo Júnior, 2014).

Neste método, a unidade de bombeio que está localizada na superfície transforma o movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna, em movimento alternativo de uma coluna de hastes. Esta por sua vez, transmite o movimento para o fundo do poço, acionando uma bomba de fundo que eleva os fluidos produzidos pelo reservatório para a superfície.

O BM é um método bastante utilizado por ser de simples operação e de fácil diagnóstico. Seu projeto é de instalação simples e pode estar em locais onde não há a presença de energia elétrica, pois o método apresenta como solução para este caso, o uso de motor de combustão interna.

Segundo TAKÁCS (2003), a aplicação do bombeio mecânico apresenta as seguintes vantagens:

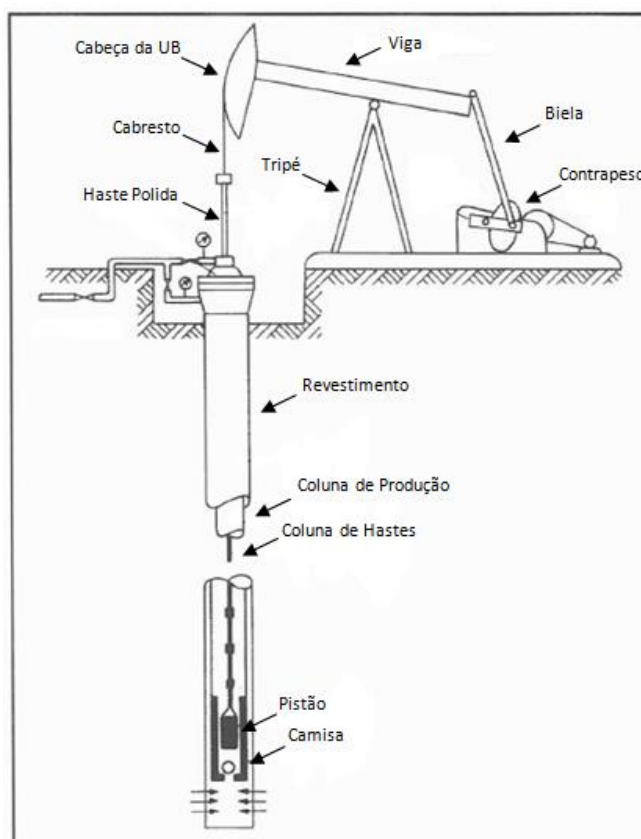
- É um método bastante conhecido pelos funcionários de campo, de simples operação e fácil diagnóstico;
- Projeto de instalação relativamente simples;
- Sob certas condições, pode ser utilizado até o fim da vida de um poço, isto é, até o abandono;
- Sua capacidade de bombeio, dentro dos limites, pode ser facilmente alterada de acordo com as mudanças na produção do poço.
- Utiliza dispositivos de controle viáveis do tipo *pump- off*;
- Apresenta facilidade na reposição dos componentes do sistema e acessórios.

E desvantagens:

- Profundidade de bombeamento limitada, principalmente devido à resistência do material usado na fabricação das hastes;
- A presença de gás livre na sucção da bomba pode reduzir drasticamente a produção de líquido do sistema, podendo provocar um bloqueio de gás;
- Em poços direcionais, o atrito metal-metal, como por exemplo o atrito entre a coluna de hastes e a coluna de produção, pode provocar falhas mecânicas;
- A unidade de bombeio é bastante pesada e requer um grande espaço para suas instalações de superfície.

O funcionamento desse sistema se dá pela operação dos seus componentes específicos, divididos em componentes de superfície e componentes de subsuperfície. Os componentes de superfície correspondem à unidade de bombeio, motor, caixa de redução, haste polida e a cabeça do poço. Já os componentes de subsuperfície são a bomba de fundo, a camisa e a coluna de hastes, conforme pode ser observado na Figura 2.6.

Figura 2.6. Unidade de Bombeio



Fonte: Adaptado de TAKÁCS, 2003.

Na superfície, a unidade de bombeio converte o movimento rotativo de um motor em movimento alternativo da haste polida. É geralmente instalada sobre uma base de concreto ou sob perfis de aço, que permite o alinhamento dos componentes da unidade.

A unidade de bombeio é acionada pelo motor que está conectado ao redutor através de correias e transforma energia elétrica em energia rotacional. Seus esforços são minimizados pelos contrapesos fixos nas manivelas, sendo também responsáveis pelo balanceamento da UB. As manivelas, girando a baixas velocidades, transmitem o movimento para a viga e estão localizadas nos dois lados do contrapeso. O curso da haste polida é definido pela distância do eixo da manivela ao mancal da biela e pode ser modificado em função da posição da biela (Lima, 2014).

A viga principal se movimenta em torno do mancal de sela, que está localizado acima do tripé. O tripé é responsável por suportar a carga imposta pela haste polida e pode ser constituído de três a quatro pernas. Na extremidade da viga principal, encontra-

se a cabeça da UB com curvatura capaz de permitir o movimento requerido pela bomba de fundo que é transmitido pela haste polida através do cabresto.

A coluna de hastes é um elemento bastante importante no sistema, pois é ela quem conecta os equipamentos de superfície aos equipamentos de subsuperfície e é responsável por transmitir energia da superfície para a bomba de fundo. Trabalhando em ambientes abrasivos e corrosivos e sujeitas a cargas cíclicas, a coluna de hastes é considerada a parte vital e crítica do sistema, respondendo pelo maior número de falhas no bombeio mecânico. A haste que se localiza no topo da coluna é a haste polida, que tem por objetivo proporcionar uma melhor vedação na cabeça do poço e sofre a maior tração por sustentar o peso das hastes, força de empuxo, força de aceleração, força de fricção e peso do fluido (Lima, 2014).

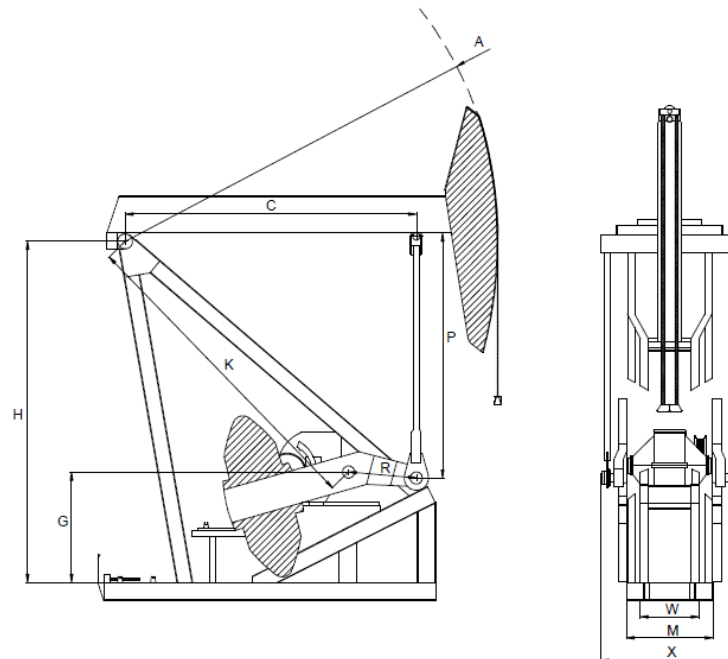
A coluna de hastes é constituída de uma sequência de várias hastes, interconectadas umas às outras através de luvas, de maneira que possam alcançar a profundidade da bomba de fundo. Pode ser do tipo simples, sendo constituída de uma única seção com hastes de mesmo diâmetro, ou combinada, onde há hastes de diâmetros ou até mesmo materiais diferentes, reduzindo, desta forma, o peso e a tensão nas hastes superiores.

Segundo Nascimento (2005), existe vários modelos de unidade de bombeio, as quais possuem os mesmos componentes básicos, diferenciando-se apenas na geometria. São encontradas atualmente na indústria, quatro tipos de unidades de bombeio: o modelo convencional, o balanceado a ar, o Mark II e o contrapeso no balancim.

O modelo convencional (Figura 2.6) é o tipo de unidade de bombeio mais conhecido e de menor custo, apresenta velocidades iguais para o curso ascendente e descendente. Este tipo de unidade funciona com duas manivelas conectadas a biela, que transmite o movimento para a viga.

A unidade do tipo Mark II, diferentemente da convencional, realiza o curso ascendente de forma mais lenta que o curso descendente, além disso, apresenta pico de torque inferior devido à sua geometria. O seu balanceado é feito na manivela e a barra equalizadora está mais próxima da cabeça da unidade de bombeio. A unidade do tipo Mark II é representada na Figura 2.7.

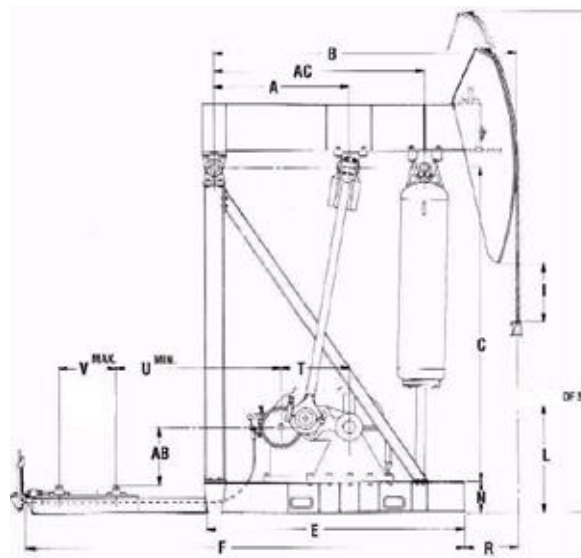
Figura 2.7. Unidade de Bombeio tipo Mark II.



Fonte: COSTA, 2008.

A unidade de bombeio balanceada a ar funciona empregando ar comprimido para balancear as cargas do poço, em vez da utilização de contrapesos e manivelas. Segundo Costa (2008), esse tipo de unidade é geralmente utilizada em poços de alta vazão e alta profundidade. A geometria desse tipo de unidade é similar ao modelo citado anteriormente e pode ser visualizado na Figura 2.8.

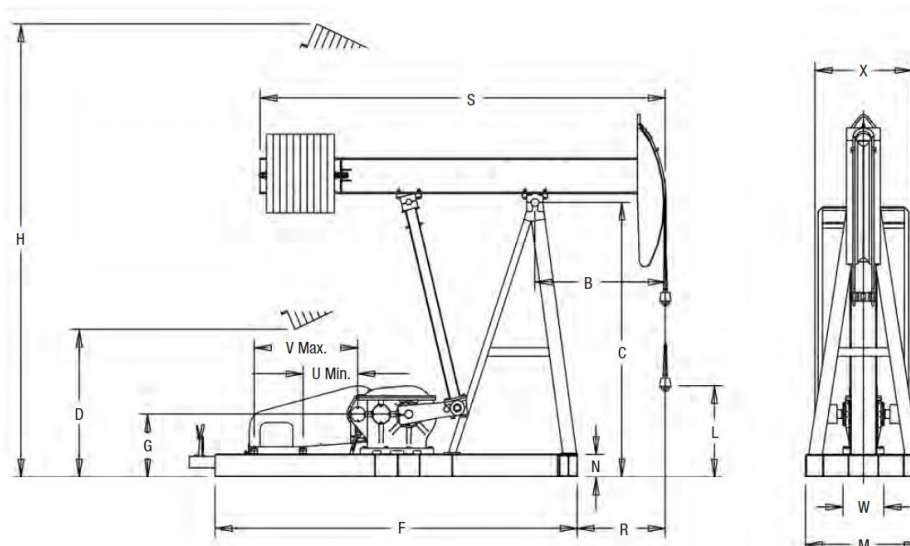
Figura 2.8. Unidade de Bombeio balanceada a ar.



Fonte: COSTA, 2008.

A fim de obter um modelo otimizado e partindo da análise das vantagens e desvantagens das outras unidades, surgiu o tipo contrapesos no balancim (Figura 2.9). Diferentemente do modelo convencional, neste modelo os contrapesos não estão em fase com a manivela (Nascimento, 2005).

Figura 2.9. Unidade de Bombeio contrapesos no balancim.



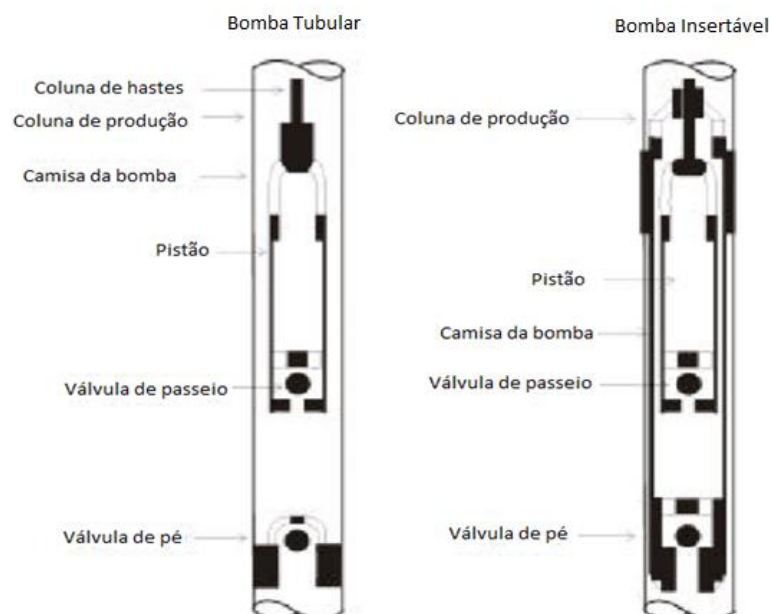
Fonte: Catálogo da LUFKIN.

No Bombeio Mecânico a bomba de fundo tem a função de fornecer para o fluido toda a energia recebida pela coluna de hastes. É composta basicamente de pistão, camisa e válvulas de pé e de passeio, seu funcionamento é do tipo deslocamento positivo, isto é, após um ciclo de seu mecanismo, a bomba desloca um volume fixo de líquido independente da pressão de saída. À medida que o pistão se movimenta as válvulas abrem e fecham, fazendo com que o fluido produzido seja elevado até a superfície. A bomba de fundo pode ser do tipo inservível ou tubular.

As bombas insertáveis possuem a camisa conectada juntamente a coluna de hastes, necessitando apenas de um mecanismo que a prenda a coluna de produção. Esse tipo de bomba apresenta como vantagem a possibilidade de ser completamente substituída apenas com a retirada da coluna de hastes.

Já as bombas tubulares são aquelas em que a camisa é parte integrante da coluna de produção. Este tipo de bomba apresenta capacidade maior de bombeamento para um dado diâmetro de tubulação, porém, caso haja a necessidade de substituição da camisa é necessária à manobra de toda a coluna de produção. A Figura 2.10 representa uma bomba do tipo tubular e uma bomba do tipo insertável.

Figura 2.10. Bomba tubular e bomba insertável.



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO (2005).

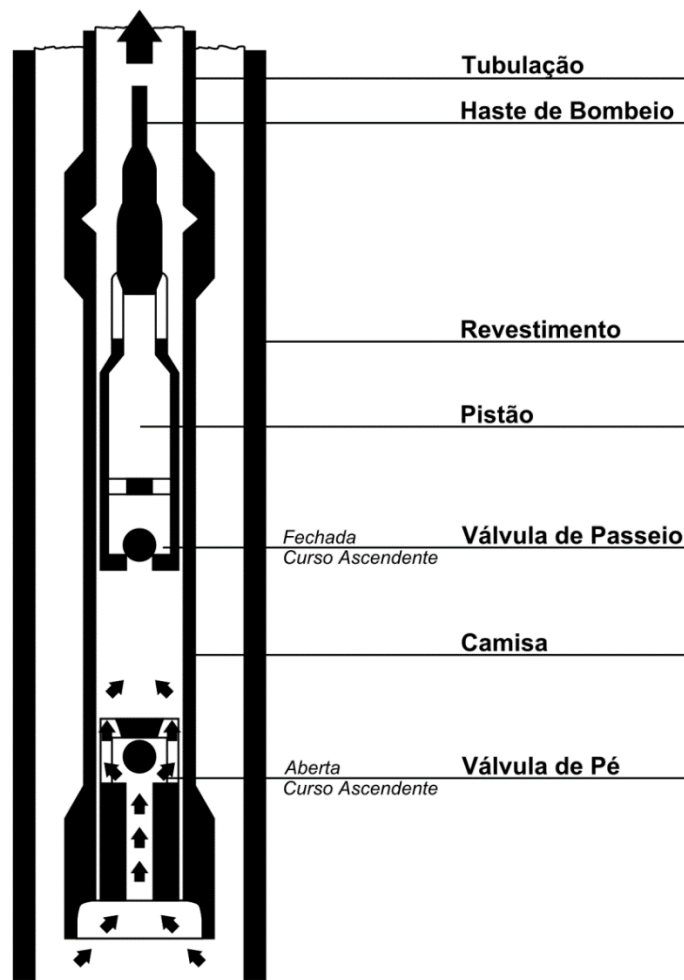
O pistão é a parte móvel da bomba, contém uma válvula de descarga chamada de válvula de passeio e está diretamente conectado à coluna de hastes. Ele se movimenta na coluna de produção alternativamente, enquanto a válvula de passeio sustenta e eleva o fluido no curso ascendente do cliço de bombeio.

Assim como o pistão, a camisa da bomba de fundo consiste de um tubo, onde fixado a ele encontra-se a válvula de pé que funciona como uma válvula de sucção da bomba. O diâmetro externo do pistão é o diâmetro interno da camisa menos uma folga muito pequena, da ordem de milésimos de polegada (Costa, 2008).

As válvulas de pé e de passeio, cada uma delas, são constituídas por um conjunto sede-esfera com a finalidade de proporcionar uma ótima vedação e são consideradas a parte vital da bomba de fundo, já que seu correto funcionamento leva a uma operação de bombeamento eficiente. A válvula trabalha em função da pressão, isto é, sempre que a pressão abaixo da esfera for maior do que acima desta, a válvula abrirá do contrário, a válvula fechará.

O pistão se desloca dentro da coluna de produção em um curso ascendente e descendente, que quando completados formam um ciclo de bombeio. À medida que o pistão ascende, o fluido que se encontra acima da válvula de passeio comprime, desta forma, a pressão hidrostática exercida faz com que a válvula de passeio permaneça fechada até o fim do curso. Ao mesmo tempo, a pressão entre as válvulas cai conforme a distância entre elas aumenta, tornando-se menor do que a pressão de sucção, isto é, a pressão acima da válvula de pé torna-se menor que pressão abaixo da mesma. Quando isso acontece, a válvula de pé abre permitindo que o fluido presente no reservatório escoe para dentro da camisa, acumulando-se abaixo do pistão até que o curso ascendente chegue ao fim, como pode ser observado na Figura 2.11. Durante a elevação do fluido no curso ascendente, o peso do fluido que é transportado pelo pistão e a coluna de hastes provoca o alongamento da coluna de hastes devido a sua elasticidade.

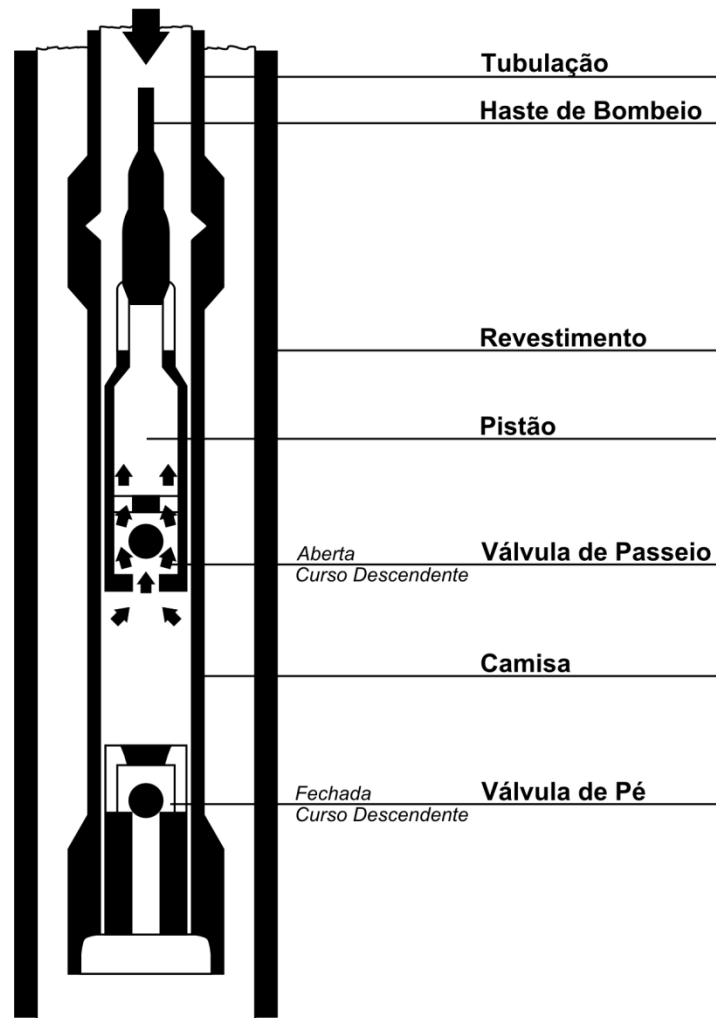
Figura 2.11. Curso ascendente do ciclo de bombeio.



Fonte: Adaptado de Barreto Filho (1993).

No fim do curso ascendente, quando o pistão atinge o topo, a coluna de hastes alongada tende a voltar o equilíbrio iniciando o curso descendente. Conforme o pistão desce o espaço entre as válvulas diminui aumentando a pressão hidrostática exercida pelo fluido presente na coluna, provocando assim a abertura da válvula de passeio e o fechamento da válvula de pé, como mostra a Figura 2.12. Com a válvula de passeio aberta, o pistão vai de encontro ao fluido acumulado na camisa, transferindo todo peso para a válvula de pé e fazendo com que a coluna de produção alongue. Ao atingir o final do curso descendente a válvula de passeio fecha e a de pé abre, o peso do fluido é novamente transferido para o pistão e a coluna de produção tende a voltar ao equilíbrio, dando início a um novo ciclo de bombeio.

Figura 2.12. Curso descendente do ciclo de bombeio.



Fonte: Adaptado de Barreto Filho (1993).

2.2 Parâmetros básicos de projeto

Na elaboração e análise do projeto do sistema de Bombeio Mecânico são observados parâmetros importantes para o seu correto dimensionamento, tais parâmetros são calculados a partir de das equações a seguir.

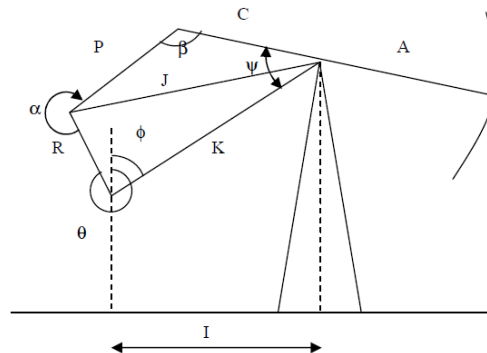
2.2.1. Curso da haste polida/pistão

A estimativa correta de alguns parâmetros é de fundamental importância no estudo do sistema de Bombeio Mecânico. A cinemática da unidade de bombeio é uma

delas, e pode ser obtida através de três diferentes abordagens. A primeira e mais antiga abordagem é o movimento harmônico simples e como o próprio nome já diz, considera o movimento da coluna de hastes como sendo um movimento harmônico simples. Na segunda abordagem, aproximação por série de Fourier, admite-se que o movimento da haste polida pode ser aproximado por uma série de Fourier truncada, com seis termos. A terceira, que foi utilizada neste trabalho, é o modelo trigonométrico da unidade de bombeio convencional, é recomendada para o cálculo e aplicação do fator de torque, que inclui o cálculo do deslocamento da haste polida em função do ângulo da manivela (Costa, 2008).

O modelo trigonométrico da unidade de bombeio convencional é apresentado na norma API 11E, em seu apêndice B, onde são definidas as grandezas geométricas relevantes para o cálculo. Algumas dessas variáveis estão representadas na Figura 2.13.

Figura 2.13. Geometria da UB convencional.



Fonte: COSTA, 2008.

A determinação do curso do pistão através do modelo trigonométrico é obtida através da Equação (1).

$$S = A \cdot (\psi_b - \psi_t) \quad (1)$$

Onde, ψ_b é o ângulo que corresponde à posição mais baixa da cabeça, e pode ser expresso conforme a Equação (2). A manivela e a biela devem estar alinhadas.

$$\psi_b = \cos^{-1} \left[\frac{C^2 + K^2 - (P + R)^2}{2CK} \right] \quad (2)$$

E ψ_t é o ângulo que corresponde à posição mais alta da cabeça, e pode ser expresso conforme a Equação (3). A manivela e a biela devem estar alinhadas.

$$\psi_t = \cos^{-1} \left[\frac{C^2 + K^2 - (P - R)^2}{2CK} \right] \quad (3)$$

Onde:

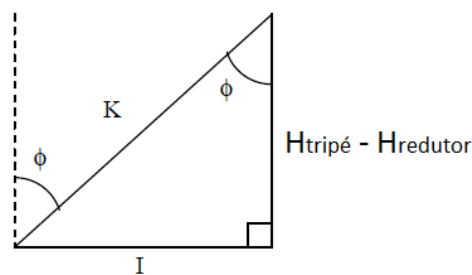
C é o comprimento entre a articulação e a extremidade da viga principal onde fica presa a biela;

P é o comprimento da biela;

R é o comprimento compreendido entre o eixo do redutor e a posição de conexão da biela na manivela;

K é o comprimento compreendido entre a articulação do da viga principal e o eixo do redutor, pode ser obtido utilizando-se a Equação (4) e observando a Figura 2.14.

Figura 2.14. Triângulo retângulo para determinação do comprimento K.



Fonte: Adaptado de COSTA (2008).

$$K^2 = I^2 + H^2 \quad (4)$$

Onde H corresponde a altura do tripé menos a altura do redutor.

2.2.2. Deslocamento volumétrico

Segundo Costa (2008), o deslocamento volumétrico da bomba (PD) é o volume diário deslocado pelo pistão da bomba de fundo e pode ser estimado a partir da Equação (5).

$$PD = 0,01853 \cdot D_p^2 \cdot S_p \cdot N \quad (5)$$

Onde:

PD é o deslocamento volumétrico em m³/dia;

D_p é o diâmetro do pistão em polegadas;

S_p é o curso do pistão em polegadas;

N é a velocidade de bombeio em ciclos por minuto.

2.2.3. Vazão de escorregamento

A vazão de escorregamento corresponde ao fluido bombeado que retorna para sucção da bomba devido a pena folga que existem entre o pistão e a camisa. Essa vazão é descrita conforme a Equação (6) (TAKÁCS, 2003).

$$q_s = 1,006 \cdot 10^6 \cdot \frac{d \cdot \Delta p \cdot \Delta d^3}{\mu \cdot l} \quad (6)$$

Onde:

d é o diâmetro do pistão em polegadas;

Δd é a folga entre camisa e pistão em polegadas;

μ é a viscosidade do fluido usado em cP;

l é o comprimento do pistão em polegadas;

Δp é a diferença de pressão sobre o pistão expressa na Equação (7).

$$\Delta p = p_{desc} - p_{suc} = \rho_w \cdot g \cdot h_{desc} - \rho_w \cdot g \cdot h_{suc} \quad (7)$$

O h_{suc} é a coluna hidrostática de sucção e o h_{desc} é a coluna hidrostática de descarga.

2.2.4. Comportamento dinâmico do sistema

Existem parâmetros importantes na determinação do comportamento dinâmico do sistema de Bombeio Mecânico, tais parâmetros são calculados a partir de diversos métodos dos quais foram definidos em três grupos: método convencional, métodos baseados na rotina API e modelos dinâmicos.

O método API é bastante utilizado na indústria de petróleo e é baseado em correlações oriundas de soluções da equação de onda amortecida através de computadores analógicos. O processo de solução consiste em transformar o problema para a forma adimensional, obter a solução adimensional através de curvas fornecidas, e transformar a solução adimensional em solução dimensional. Suas principais hipóteses são: fluidos de baixa viscosidade, atrito haste/tubo desprezível, inércia de fluidos desprezíveis e bomba de fundo completamente cheia. Os detalhes do procedimento de cálculo podem ser encontrados na norma API RP-11L.

Os modelos dinâmicos são os mais precisos na determinação dos parâmetros operacionais. Este método tem a finalidade de simular o comportamento dinâmico da coluna de hastes com base na resolução de uma equação diferencial, a equação da onda amortecida, permitindo a análise do termo de amortecimento e determinação do seu coeficiente que surgem devido aos atritos que estão presentes no sistema.

Nos anos 30, as contribuições de Marsh, Coberly, Slonneger e Mills deram condições para o surgimento de um processo para estimativa dos parâmetros básicos de projeto, conhecido como Método Convencional (Lekia, 1989 *apud* Costa, 2008).

Neste método a coluna de hastes é considerada um bloco de massa, já que os efeitos dinâmicos e de atrito são desprezados, o que torna simples o desenvolvimento de modelos matemáticos. Esse método será abordado neste trabalho devido apresenta bons resultados para poços de baixa profundidade e onde os efeitos de elasticidade das colunas de produção e de hastes podem ser desprezados, enquadrando-se nos objetivos desse trabalho. Segundo TAKÁCS (2003), os parâmetros são determinados pelas equações apresentadas abaixo.

O peso estático da coluna de hastes no ar pode então ser calculado a partir da Equação (8).

$$W_r = g \sum_{k=1}^n \rho_{rk} \cdot A_{rk} \cdot L_k \quad (8)$$

Onde:

g é a aceleração gravitacional;

ρ_{rk} é a massa específica da haste;

A_{rk} é a área da seção transversal da haste;

L_k é o comprimento da haste.

Seja ainda ρ_f a massa específica do fluido e $V_{deslocado}$ o volume deslocado de fluido devido à descida da haste. Calcula-se então o empuxo conforme a Equação (9).

$$E_f = \rho_f \cdot V_{deslocado} \cdot g \quad (9)$$

O peso estático da coluna de hastes flutuante é a diferença entre o peso estático da coluna de hastes no ar e o empuxo, conforme apresentado na Equação (10).

$$W_{rf} = W_r - E_f \quad (10)$$

O peso da coluna de fluido, ou, peso do fluido é o produto da pressão devido ao nível dinâmico pela área do pistão, segundo descrito na Equação (11).

$$F_o = p_H \cdot A_p \quad (11)$$

O esforço dinâmico é aditivo a carga estática durante o curso ascendente e deve ser subtraído da carga estática durante o curso descendente. É determinado de acordo com a Equação (12).

$$\delta = \pm W_r \cdot \frac{S \cdot N^2}{70500} \quad (12)$$

A carga máxima é calculada adicionando-se o esforço dinâmico à carga estática no curso ascendente, isto é, a soma de todos os esforços presentes no curso ascendente, como mostra a Equação (13).

$$PPRL = F_o + W_r \cdot (1 + \delta) \quad (13)$$

Já a carga mínima é obtida pela subtração do esforço dinâmico da carga estática no curso descendente, descrita conforme a Equação (14).

$$MPRL = W_r (1 - \delta) - E_f \quad (14)$$

O efeito de contrabalanceio (CBE) é a força requerida na haste polida para contrabalancear a unidade de bombeio perfeitamente. Esse efeito é calculado de acordo com a Equação (15).

$$CBE = \frac{PPRL + MPRL}{2} \quad (15)$$

Com posse dos valores de carga máxima e carga mínima é possível a obtenção do torque máximo, através da Equação (16).

$$PT = (PPRL - CBE) \cdot \frac{S}{2} = (PPRL - MPRL) \cdot \frac{S}{4} \quad (16)$$

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento

3. Metodologia e Desenvolvimento

Neste capítulo, é apresentada a metodologia empregada para o projeto do protótipo da unidade de bombeio, assim como o projeto gráfico do sistema, que foi dividido em três partes: componentes de superfície (Unidade de Bombeio), componentes de subsuperfície e componentes elétricos.

3.1 Metodologia para os componentes de superfície (Unidade de Bombeio)

A primeira tarefa para construção do protótipo de unidade de bombeio (UB) foi a especificação da geometria com dimensões reduzidas, baseada em uma unidade de bombeio com dimensões reais. A escolha feita para se obter as dimensões foi a UB pertencente ao Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG), na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), apresentada na Figura 3.1, (Pessoa, 2015).

Figura 3.1. Fotografia da unidade de bombeio, NUPEG/UFRN.



Fonte: Pessoa, 2015.

Com posse das medidas de cada peça da UB escolhida, foi necessário adequá-las para os fins do projeto. Decidiu-se que o protótipo deve possuir uma altura de 50 cm (altura do tripé mais altura da viga principal), de modo a facilitar seu transporte (pois a UB é construída sobre uma mesa com rodas) e não suprimir as peças de medidas menores.

Uma mesma escala de redução foi adotada para as demais peças da UB, calculada com base nas duas medidas já conhecidas: a altura desejada e a altura da UB real, conforme Equação (17). Dessa forma, todas as medidas reais devem ser reduzidas em aproximadamente 1:5 para se obter uma estimativa das medidas do protótipo.

$$\text{Escala de redução} = \frac{\text{Altura desejada}}{\text{Altura real}} = \frac{50\text{cm}}{284\text{cm}} \approx \frac{1}{5} \quad (17)$$

A Tabela 3.1 mostra as dimensões da unidade de bombeio usada como referência e as dimensões do protótipo com emprego da redução.

Tabela 3.1. Medidas da UB de referência e medidas do protótipo.

COMPONENTES		MEDIDAS (cm)	
		Real	Protótipo
Cabeça da UB	Altura	85	17,6
	Largura aproximada	37	7,6
	Comprimento do arco	88	18,2
	Espessura	19	3,9
Viga Principal	Comprimento	192	39,7
	Altura	26	5,4
	Espessura	12	2,5
	Altura do mancal equalizador	19	3,9
Tripé	Largura do mancal equalizador	26	5,4
	Largura das pernas	7,5	1,5
	Comprimento 1 – pernas dianteiras	197	40,7
	Comprimento 2 – pernas traseiras	202	41,7
	Separação inferior - pernas dianteiras	82	16,9
	Separação superior - perna dianteiras	26	5,4
	Separação superior - perna traseiras	30	6,2
	Separação inferior - perna traseiras	93	19,2
	Comprimento total	142	29,3
	Distância entre contrapeso e manivela	65	13,4
Contrapesos	Altura	166	34,3
	Espessura	12,5	2,6
	Altura manivela	29	6
	Distância entre contrapesos	91	18,8
Biela	Comprimento	146	30,2
	Diâmetro	6,5	1,3
	Distância	117	24,2
	Polia pequena	18	3,7
Polias/Redutor	Polia grande	59	12,2
	Distância entre polias	96	19,8

Com posse das medidas apresentadas na Tabela 3.1, foi projetada as peças individualmente em desenhos feitos no software de criação de modelos 3D, *SketchUp*, por ser uma ferramenta simples e disponibilizada gratuitamente.

Com o projeto gráfico foi possível investigar qual o material seria usado para fabricação dos componentes da unidade de bombeio. O orçamento foi obtido em quatro empresas, duas madeireiras e duas metalúrgicas, Tabela 3.2. Apesar da madeira ser o material mais barato, optou-se pelo ferro galvanizado, em função da sua maior vida útil.

Tabela 3.2. Orçamento para escolha do material da UB.

Orçamento: Material para a Unidade de Bombeio			
Empresas	Dimensão	Material	Preço
Metalúrgica 1	2 x 1 x 2mm	Ferro Galvanizado	R\$ 148,00
	2 x 1,25 x 4mm	Aço inox	R\$1.580,00
Metalúrgica 2	2 x 1 x 2mm	Ferro Galvanizado	R\$173,00
Madeireira 1	2,20 x 1,60 x 15mm	Compensado	R\$ 98,00
	2,20 x 1,60 x 18 mm	Compensado	R\$ 120,00
Madeireira 2	2,20 x 1,60 x 15mm	Compensado	R\$ 88,00

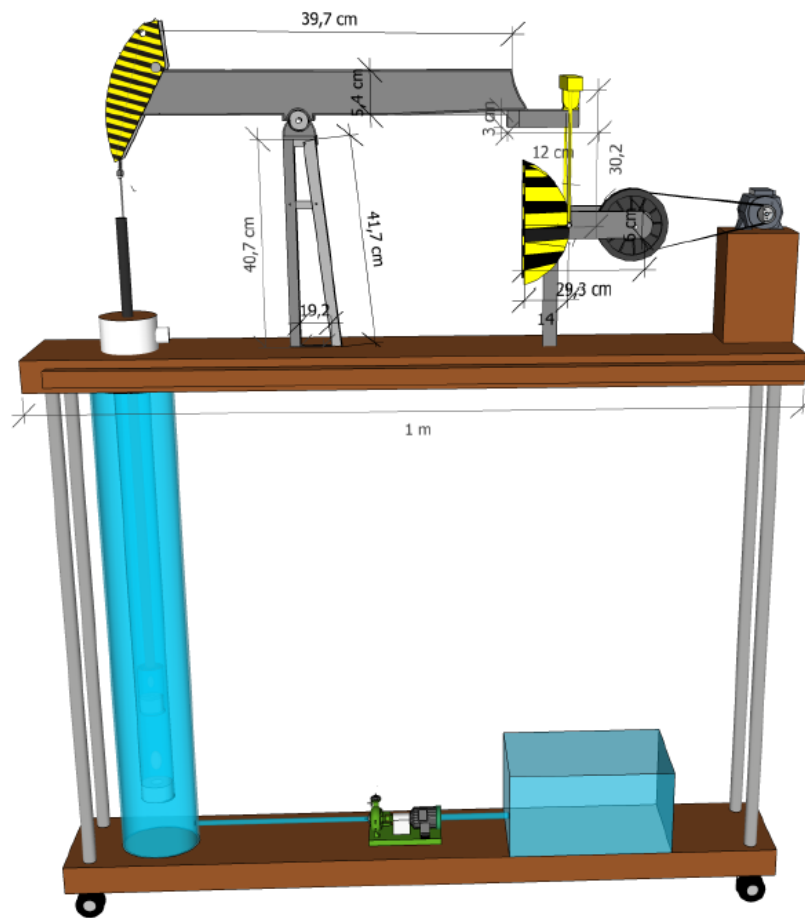
Com a escolha do ferro galvanizado foram necessárias modificações em algumas peças já desenhadas, a fim de evitar formas arredondas, as quais são de mais difícil execução por parte da empresa que produziria as chapas de ferro, além de apresentarem um maior custo.

As peças detalhadas no *SketchUp* (incluídas as cotas), são mostradas e descritas detalhadamente, nos tópicos a seguir.

3.1.1. Protótipo

O esquema geral da unidade de bombeio, juntamente com os seus componentes de subsuperfície e parte elétrica podem ser vistos na Figura 3.2.

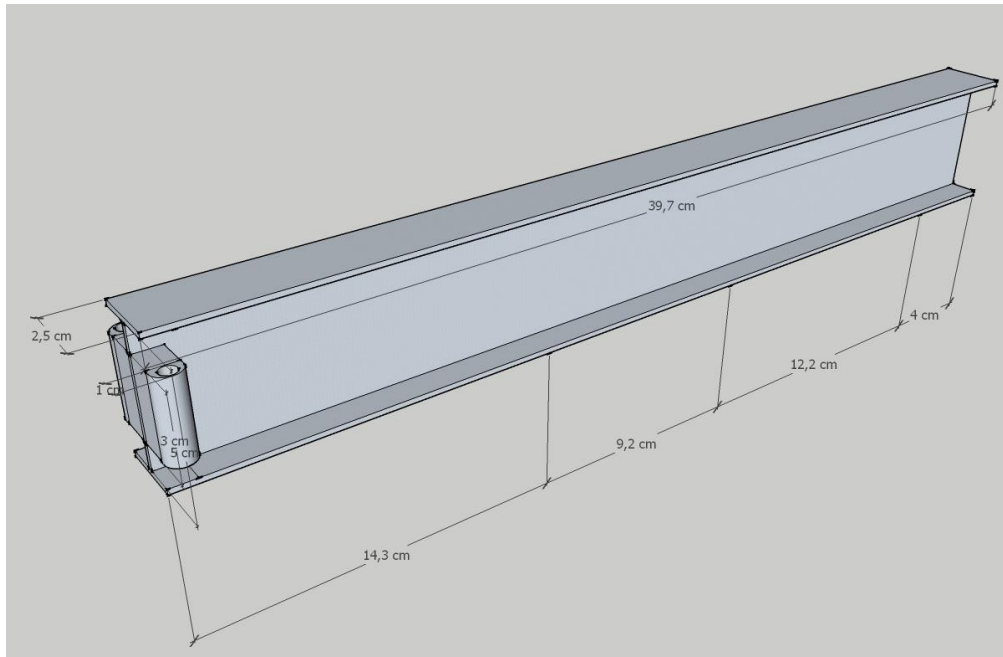
Figura 3.2. Modelo 3D do protótipo de bombeio mecânico.



3.1.2. Viga Principal

A viga principal foi projetada para possuir perfil I, uma vez que este tipo de perfil é comumente empregado em estruturas e possui boa resistência aos esforços aplicados sobre ela. Além da facilidade de adquirir esses perfis pré-moldados, reduzindo, assim, os custos de soldagem e corte, se a mesma peça fosse feita a partir da composição de lâminas de aço. O modelo gráfico da viga é representado na Figura 3.3.

Figura 3.3. Modelo 3D da viga principal.



Em uma das extremidades da viga principal é acoplada a cabeça da unidade de bombeio e na outra extremidade o mancal equalizador que permiti a movimentação do conjunto biela-manivela. Em uma posição intermediária da viga principal é encaixado o mancal central que admti a articulação da unidade de bombeio.

3.1.3. Cabeça da UB

A cabeça da UB é formada por duas chapas paralelas em formato de gota e oca no interior, conforme Figuras 3.4 e 3.5. No topo da cabeça da UB há um amarrilho, onde deve ser preso um cabo de aço que sustenta e transmi o movimento alternativo à haste polida.

Figura 3.4. Modelo 3D com foco nas dimensões frontais da cabeça da UB.

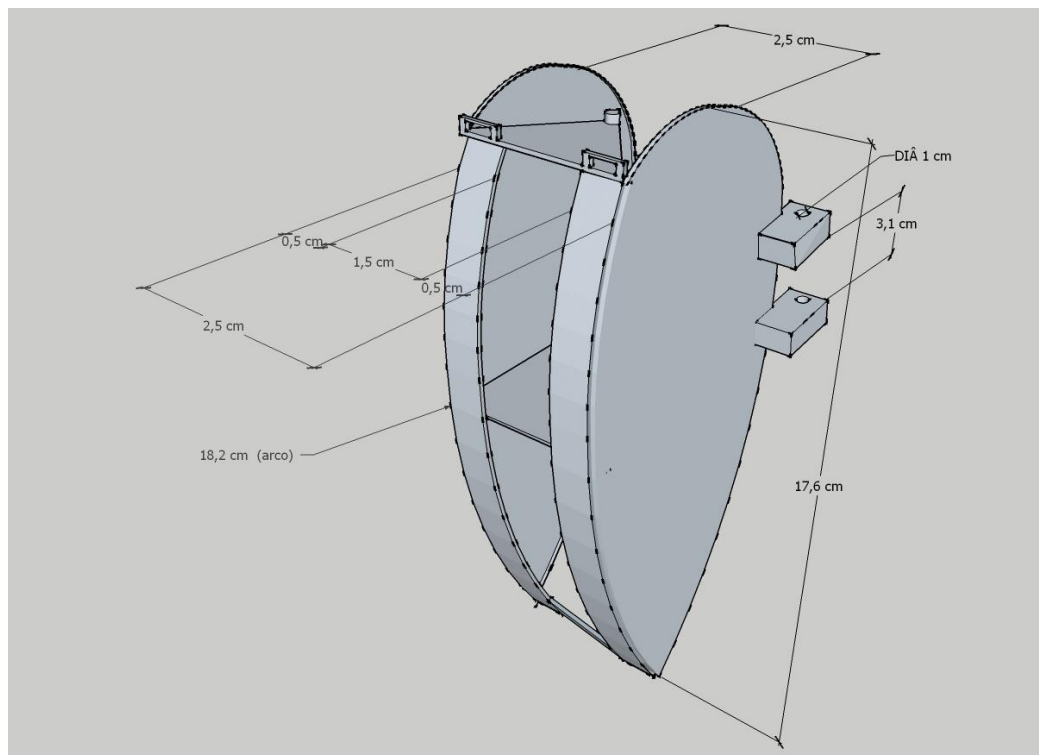
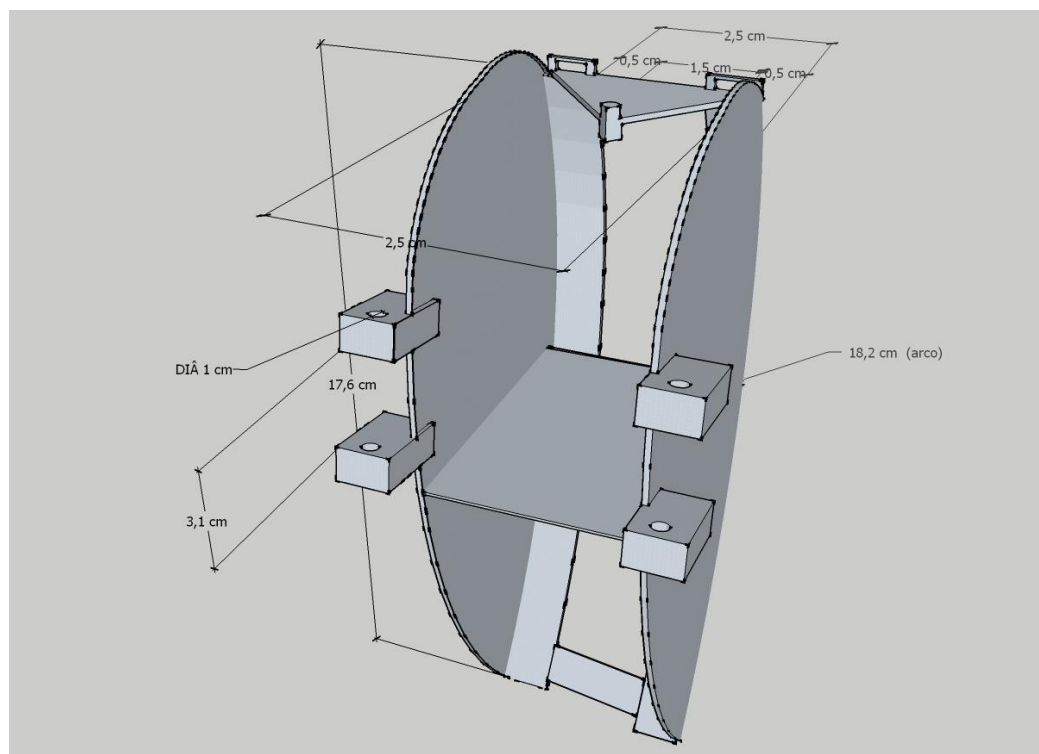


Figura 3.5. Modelo 3D com foco nas dimensões posteriores da cabeça da UB.

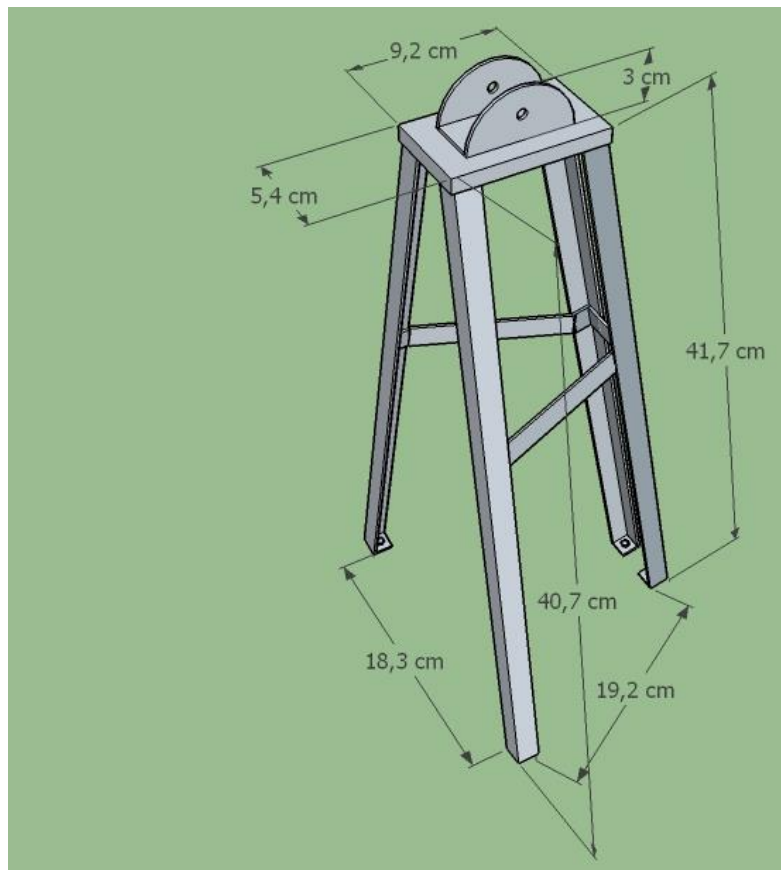


A cabeça da UB é conectada a uma das extremidades da viga principal e na parte superior é atado o cabo de aço que deve sustentar e transmitir o movimento a haste polida.

3.1.4. Tripé

Seguindo o modelo do tripé da UB usada como referência (Figura 3.1), cada perna deve possuir um perfil cantoneira (perfil em L), uma vez que esse tipo de perfil apresenta boa sustentação e reduz os custos em relação às pernas confeccionadas totalmente sólidas. De acordo com os valores previstos, o tripé possui uma altura de aproximadamente 40 cm e é apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6. Modelo 3D do tripé.



Na parte superior do tripé é posicionado o mancal equalizador, que possibilita a articulação da viga principal durante os cursos ascendentes e descendentes da UB. A parte inferior encontra-se fixa a mesa.

3.1.5. Mancal Central

O mancal central é formado por duas peças semicirculares presas por um pino no centro (eixo de rotação da UB), representadas nas Figuras 3.7 e 3.8. A presença destas peças permite a articulação da UB.

Figura 3.7. Modelo 3D do Mancal Central (Viga principal).

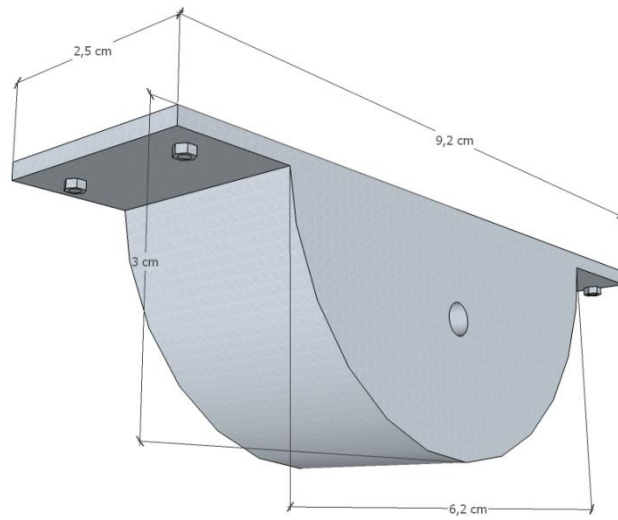
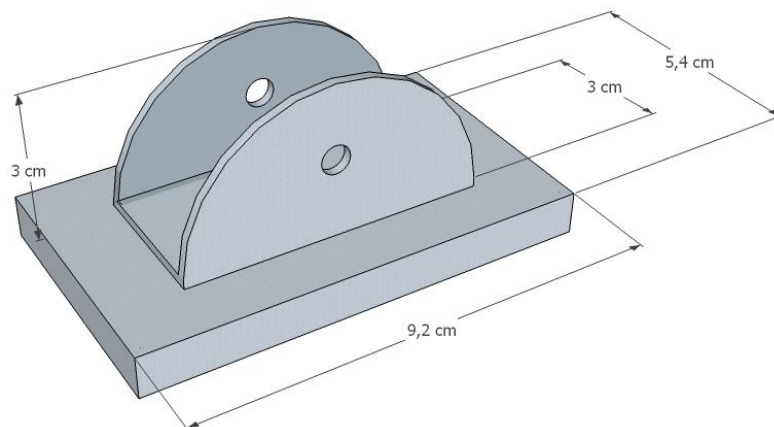


Figura 3.8. Modelo 3D do Mancal Central (Tripé).

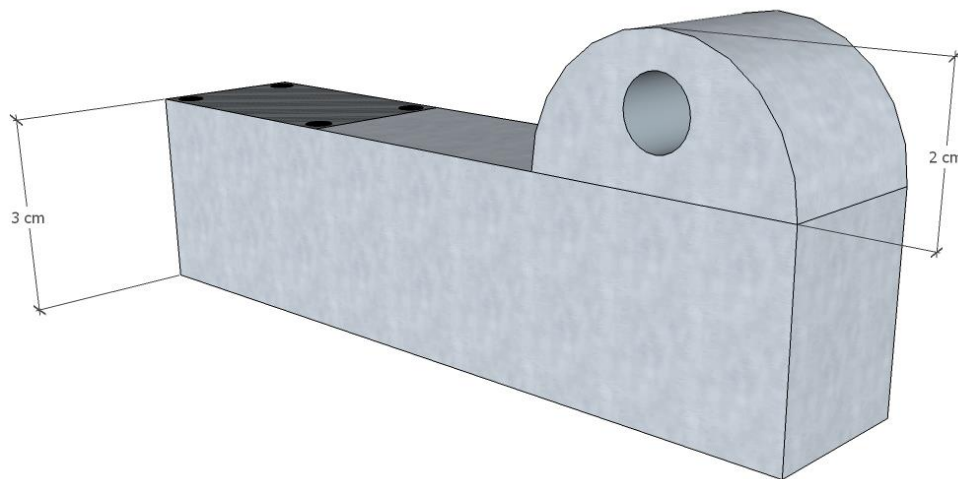


Uma das peças do mancal central, representada na Figura 3.7, é fixada na parte inferior da viga principal, enquanto que a outra peça, representada na Figura 3.8, é acoplada na parte superior do tripé, além disso, são conectadas entre si por um pino que se encontra inserido através dos orifícios presentes nestas peças.

3.1.6. Mancal Equalizador

O mancal equalizador possibilita a movimentação do conjunto biela-manivela. É acoplada em uma das extremidades da viga principal e transmite o movimento proveniente da biela à UB. Também é unida à viga equalizadora. Seu modelo gráfico é apresentado na Figura 3.9.

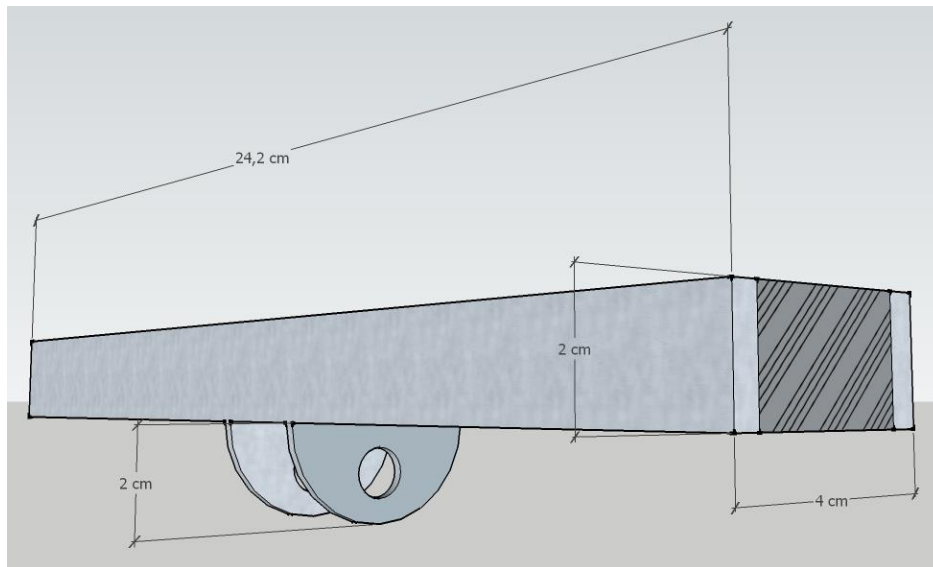
Figura 3.9. Modelo 3D do Mancal Equalizador.



3.1.7. Viga Equalizadora

A viga equalizadora, apresentada na Figura 3.10, é responsável por transmitir o movimento das bielas à viga principal. Suas extremidades são conectadas às bielas e os trechos semicirculares são conectados ao mancal equalizador por um pino que passa pelo centro deles.

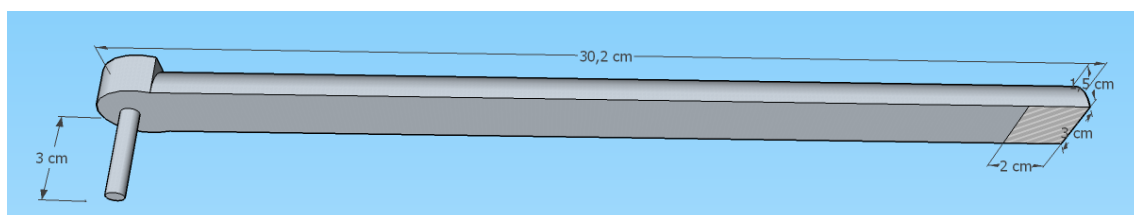
Figura 3.10. Modelo 3D da viga equalizadora.



3.1.8. Biela

A biela é uma barra de aproximadamente 30 cm de comprimento com formato de cilindro cortado na metade, conforme apresentada na figura 3.11. A biela é acoplada à manivela, podendo ser realocada, caso necessário, entre duas posições de encaixe presente nos contrapesos. A extremidade superior encontra-se fixa na viga equalizadora e o pino é conectado nos orifícios presentes na manivela.

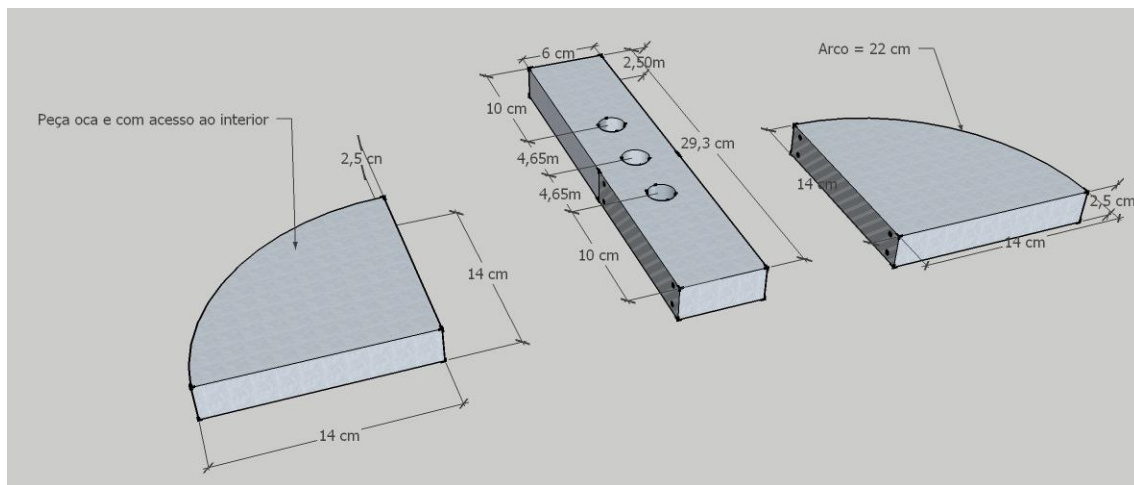
Figura 3.11. Modelo 3D da biela.



3.1.9. Contrapesos e manivelas

São usados dois contrapesos com formato de $\frac{1}{4}$ de círculo, ocos e com acesso ao seu interior para regulagem de massa, visto que é necessário contrabalancear os esforços presente na UB. As manivelas são barras com presença de orifícios para conexão da biela e do eixo do redutor. Além do orifício extra para possibilitar a melhor posição para encaixe da biela, os contrapesos e a manivela são representados na Figura 3.12. Cada contrapeso é fixado de um lado da manivela. Os orifícios presentes na manivela são para encaixe da biela e do eixo do redutor.

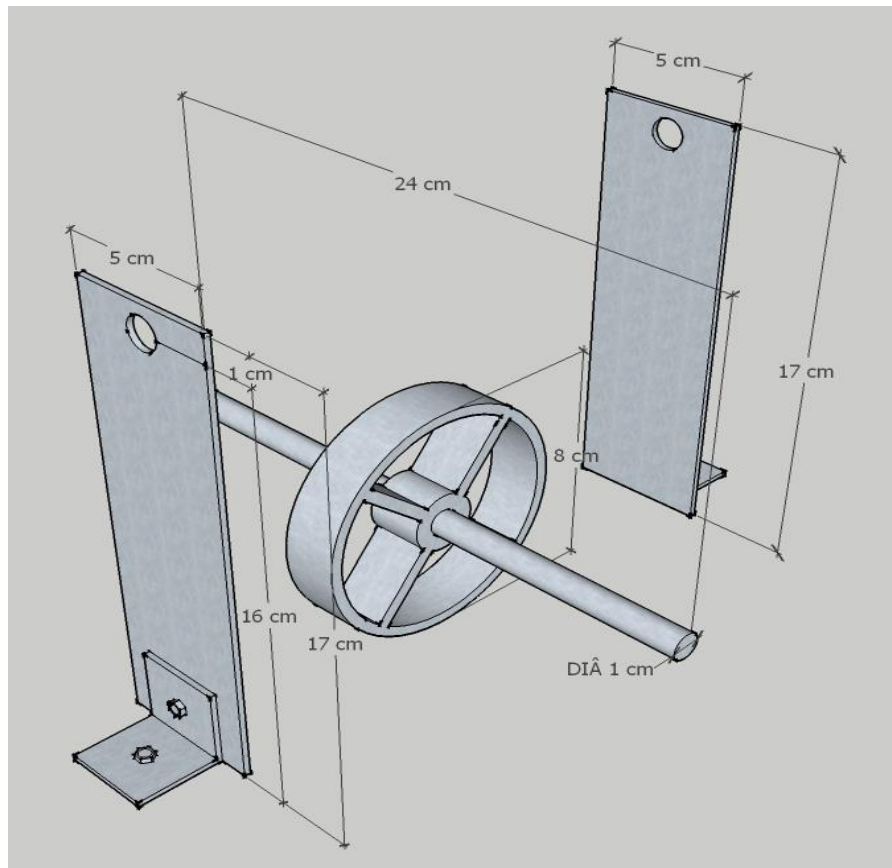
Figura 3.12. Modelo 3D dos contrapesos e da manivela.



3.1.10. Redutor

Com objetivo de simplificar o projeto, o redutor de velocidade utilizado é uma polia com diâmetro 4 vezes maior ao diâmetro da polia que será acoplada a saída do motor, baseado nas dimensões da unidade de bombeio referencial (Figura 3.1), conforme é apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13. Modelo 3D do redutor.

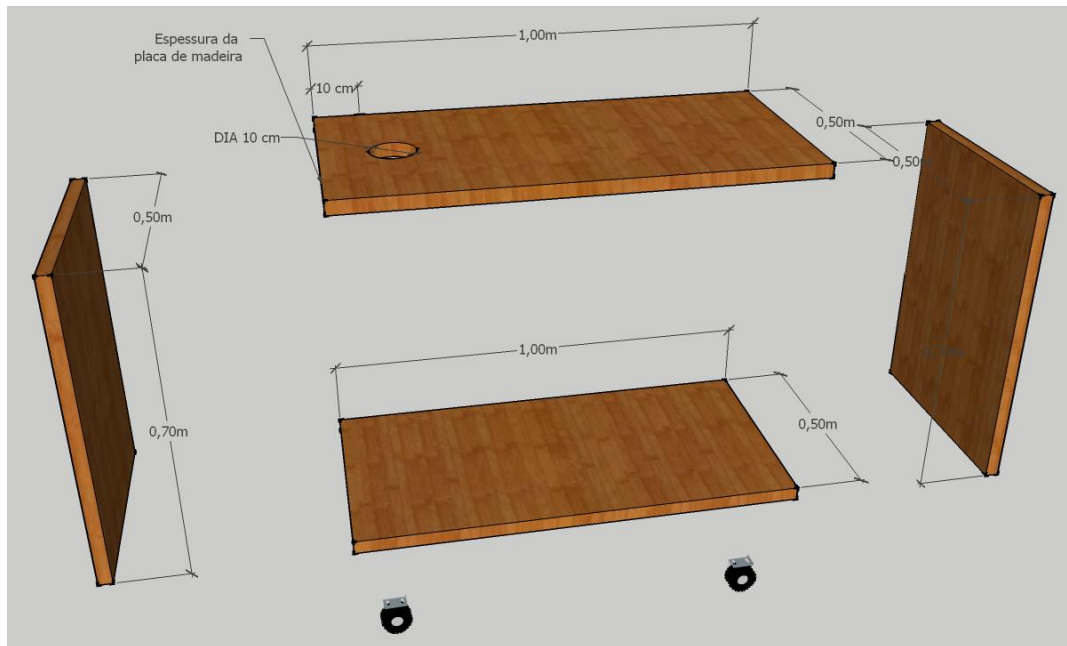


Quando acionado, o motor transmite o movimento ao redutor, através de uma correia que liga as duas polias. O redutor possui um eixo suportado por barras metálicas que não impedem seu movimento. Dessa maneira o movimento do redutor é compartilhado com o eixo que também está conectada as manivelas, que por sua vez transmitem o movimento as bielas e por fim toda a UB adquire movimento.

3.1.11. Base

A base é um plano no qual tanto os componentes de superfície como os componentes de subsuperfície são instalados. No caso deste projeto é utilizada uma mesa como base. Na parte superior da base é posto a unidade de bombeio e na parte inferior são alocados os componentes de subsuperfície. O plano superior da mesa contém um orifício onde é instalada a cabeça do poço, como pode ser observado na Figura 3.14.

Figura 3.14. Modelo 3D da base (Mesa).



3.2 Metodologia para os componentes de subsuperfície

Os componentes de subsuperfície são de grande importância para o projeto, pois o movimento alternativo do pistão, que é transmitido pela haste de bombeio, juntamente com a operação das válvulas da bomba, possibilitam a transmissão de energia mecânica para o fluido sob forma de pressão, fazendo com que este seja elevado.

Esses componentes estão localizados na parte inferior da mesa e foram construídos em acrílico transparente com objetivo de melhorar a visualização do funcionamento interno da bomba. Suas medidas são delimitadas pelo tamanho da mesa e podem ser observadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Dimensões dos componentes de subsuperfície.

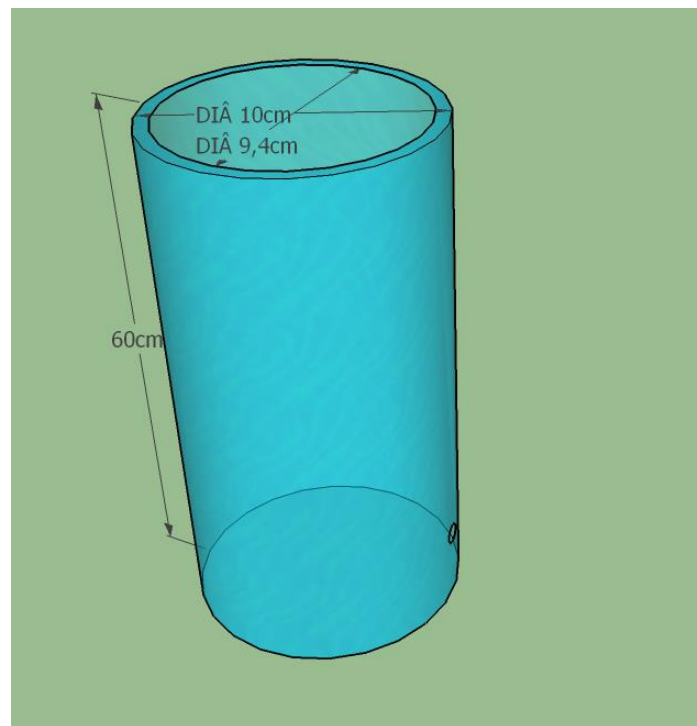
Dimensões			
Revestimento		Sede da válvula de pé	
Diâmetro externo	10 cm	Diâmetro externo	4,4 cm
Diâmetro interno	9,4 cm	Diâmetro interno	1,5 cm
Espessura	0,3 cm	Altura	1 cm
Altura	60 cm	Detalhe	45° e 1 cm
Coluna de Produção		Sede da válvula de passeio	
Diâmetro externo	5 cm	Diâmetro externo	3,6 cm
Diâmetro interno	4,4 cm	Diâmetro interno	1,5 cm
Espessura	0,3 cm	Altura	1 cm
Altura	50 cm	Detalhe	45° e 1 cm
		Espaço morto	5 cm
Pistão		Haste	
Diâmetro externo	4,2 cm	Diâmetro	1 cm
Diâmetro interno	3,6 cm	Altura	50 cm
Espessura	0,3 cm		
Altura	10 cm	Esfera	
Furo central de diâmetro	1 cm	Diâmetro	2 cm
Furos de diâmetro	0,4 cm	Massa	31,66 g

Com posse das medidas detalhadas, os componentes de subsuperfície foram também projetados individualmente em desenhos de modelos 3D desenvolvidos no software *SketchUp*. As peças detalhadas no *SketchUp* (incluídas as cotas) são mostradas a seguir.

3.2.1. Revestimento

O revestimento é um tubo acrílico transparente com extremidade superior aberta e extremidade inferior fechada, onde em seu interior encontra-se posicionada a coluna de produção. Este componente recebe o fluido bombeado do reservatório, que permanece em seu interior até ser succionado pela bomba de fundo. Seu modelo gráfico é apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15. Modelo 3D do Revestimento.



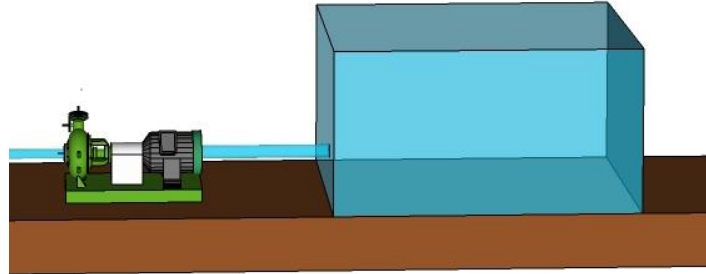
A extremidade superior e inferior do revestimento é fixada na mesa. Em sua parte inferior, apresenta-se um orifício onde é anexado um tubo que liga o revestimento a bomba contida no reservatório.

3.2.2. Reservatório

Como reservatório é utilizado um aquário de vidro com dimensões 40x20x25 cm de onde o fluido é bombeado para o revestimento. Após a chegada do fluido a cabeça de produção, este retorna através das linhas de produção para o reservatório.

O reservatório está ligado a uma bomba de aquário que bombeia o fluido para o interior do revestimento, como pode ser observado na Figura 3.16. Imerso no reservatório está a linha de produção por onde o fluido retorna.

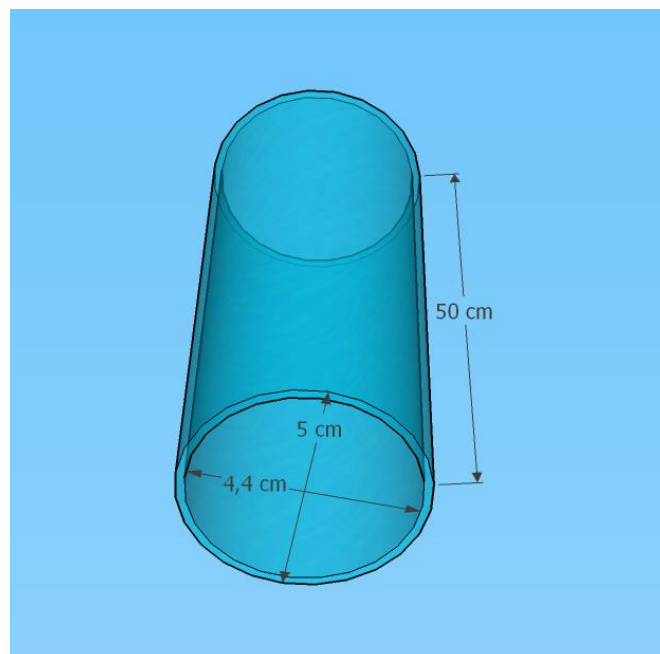
Figura 3.16. Modelo 3D do Reservatório.



3.2.3. Coluna de produção

A coluna de produção é um tubo de acrílico transparente com extremidades vazadas que está localizado no interior do revestimento, conforme a Figura 3.17. É no interior da coluna de produção que o pistão se movimenta permitindo e auxiliando a trajetória do fluxo de fluido desde a sucção até a descarga da bomba.

Figura 3.17. Modelo 3D da coluna de produção.



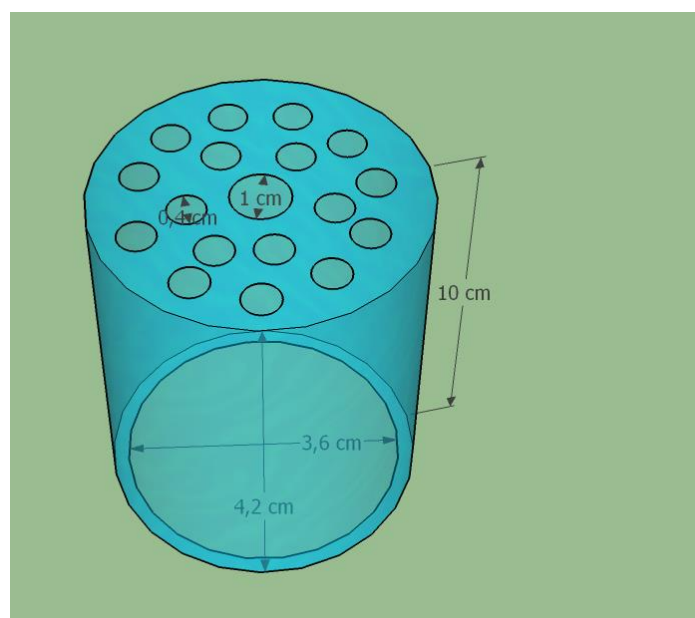
Na extremidade inferior da coluna é instalada a válvula de pé, enquanto a extremidade superior é ancorada a base e encontra-se unida a cabeça de produção.

3.2.4. Pistão

O pistão é um tubo de acrílico transparente de 10 cm de altura e com diâmetro muito próximo da coluna de produção, tem sua extremidade inferior vazada para instalação da válvula de passeio e a sua extremidade superior fechada e com orifícios que permitem a instalação da haste e a passagem do fluido durante o processo.

Como pode ser observado na Figura 3.18, o pistão apresenta em sua extremidade superior um orifício central de 1 cm de diâmetro, este orifício permite a instalação da haste que responde pelo movimento do pistão durante o ciclo de bombeio. Na extremidade inferior é instalada a válvula de passeio.

Figura 3.18. Modelo 3D do pistão.



3.2.5. Válvula de pé e válvula de passeio

A válvula de pé e a válvula de passeio são formadas pelo conjunto sede-esfera com o objetivo de proporcionar a melhor vedação possível, pois são considerados os componentes mais importantes para se obter uma operação de bombeio eficiente. Seus modelos gráficos são representados nas Figuras 3.19 e 3.20.

Figura 3.19. Modelo 3D da válvula de passeio.

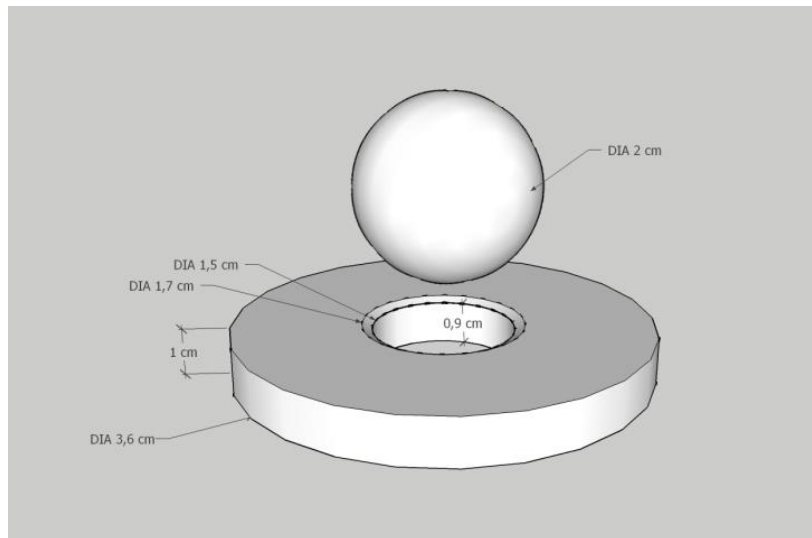
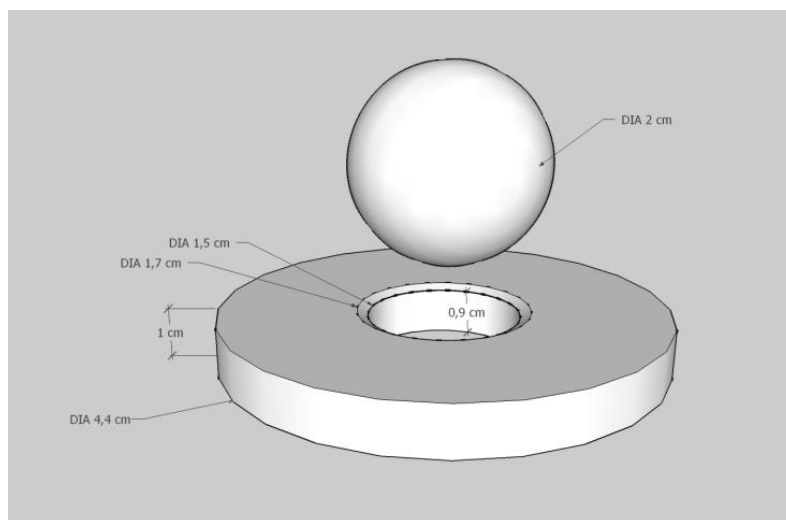


Figura 3.20. Modelo 3D da válvula de pé.



A válvula de passeio é instalada na extremidade inferior do pistão, enquanto a válvula de pé na extremidade inferior da coluna de produção. As sedes são feitas em acrílico transparente e como esfera é utilizado uma esfera de mouse em função do seu peso e tamanho.

No movimento ascendente o pistão sobe comprimindo o fluido acima da válvula de passeio, ao mesmo tempo, a distância entre as válvulas aumenta. A pressão maior acima da válvula de passeio do que abaixo desta faz com que ela feche. A pressão entre as válvulas continua a cair até que a pressão acima da válvula de pé seja menor do que abaixo desta fazendo com que ela abra e permaneça aberta até o final do curso ascendente. Já no curso descendente o pistão desce acarretando o aumento da pressão na

região entre as válvulas, causando o fechamento da válvula de pé e a abertura da válvula de passeio.

3.2.6. Haste

A haste conecta a unidade de bombeio, que está na parte superior da base, a bomba de fundo na parte inferior da base. Sua extremidade superior é instalada no cabresto e a sua extremidade inferior conectada ao pistão. Como haste é utilizada uma barra roscada em função do seu peso e facilidade de instalação no pistão.

3.2.7. Cabeça de produção

Como cabeça de produção é utilizado uma conexão de tubo em “T” de PVC com 50 mm de diâmetro conectado a um tampão de PVC (*cap*) com orifício central de 1 cm de diâmetro para permitir a passagem da haste. Anéis de borracha e outros materiais são utilizados para vedação do material. A cabeça de produção está ligada a coluna de produção através do orifício presente na base. Na abertura lateral da conexão é instalada a linha de produção.

3.2.8. Linha de produção

A linha de produção é uma mangueira plástica transparente e flexível, que permite ao fluido que chega a cabeça de produção retornar para o reservatório, isto é, o fluido utilizado no processo (água) estará circulando em um circuito fechado. Este componente liga a abertura lateral da cabeça de produção a bomba de aquário imersa no reservatório.

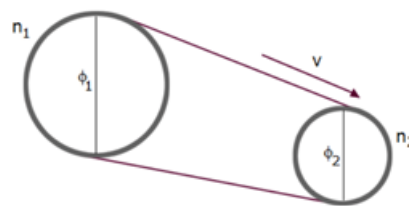
3.3 Metodologia para os componentes elétricos

Segundo Costa (2008), “os motores utilizados para acionar as unidades de bombeio geralmente são do tipo a diesel ou elétrico, sendo este último o tipo mais comum, devido a grandes vantagens como menor custo operacional, menor ruído, maior eficiência energética, maior durabilidade, controle mais fácil, etc.”.

A partir da série de vantagens apresentadas acima na utilização do motor elétrico foram, então, iniciadas as buscas por um motor elétrico adequado às necessidades do projeto. Observou-se que as polias da unidade de bombeio real (Figura 3.1) possui uma relação de diâmetros de 1:4 e que a faixa de frequência de bombeio mais apropriada para o projeto é de 15 rpm a 30 rpm.

Desse modo, utilizando a relação entre polias expressa na Figura 3.21, tem-se que a frequência exigida para o motor é de 60 rpm.

Figura 3.21. Relação entre polias.



$$\phi_1 n_1 = \phi_2 n_2 \quad (18)$$

Assim, o motor elétrico trifásico utilizado é o modelo W22 plus, que apresenta em suas configurações uma potência de 1 HP e frequência de 60 Hz, permite aplicações com velocidades variáveis através da utilização de inversores de frequência, neste caso, o inversor de frequência usado é o modelo CFW100 para controle de velocidade e torque do motor. Além disso, o motor apresenta como características, redução dos níveis de ruído e vibração, aumento dos níveis de eficiência energética e térmica, facilidade de manutenção, flexibilidade e modularidade.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

Tão importante quanto desenvolver o projeto do protótipo de uma unidade de bombeio é garantir a construção do mesmo atendendo aos requisitos para a qual foi projetado. Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões sobre a construção do protótipo.

4.1 Construção do protótipo

Com posse dos desenhos técnicos e de todos os requisitos necessários para elaboração do projeto, foi colocada em prática a fabricação de todas as partes que o compõem. Tanto a unidade mecânica, como alguns componentes de subsuperfície foram produzidos em fornecedores especializados, outros elementos como conexões em PVC, mangueiras e outros objetos foram obtidos no mercado. O protótipo constituído de uma unidade mecânica, juntamente com os componentes de subsuperfície e componentes elétricos é apresentado na Figura 4.1.

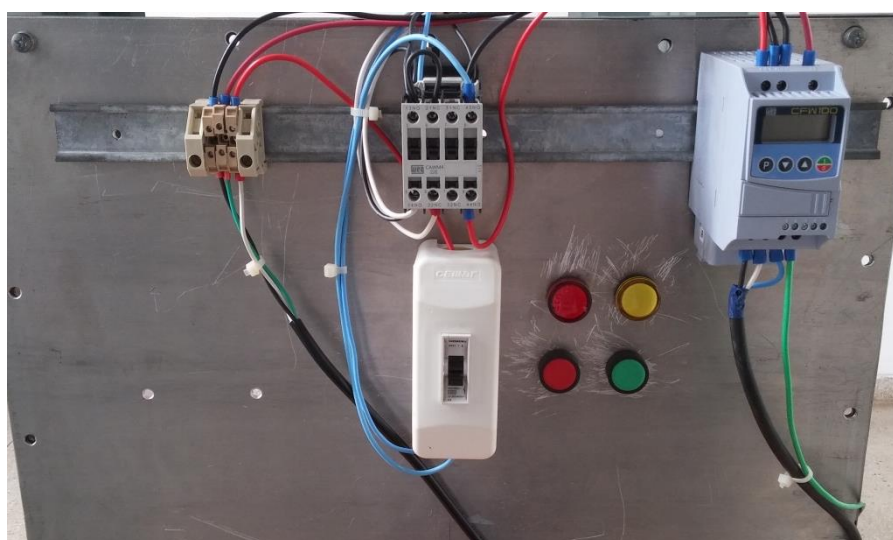
Figura 4.1. Protótipo de uma unidade de bombeio.



Como pode ser observado, foi utilizada como base uma mesa que foi adaptada através da criação de um anexo para instalação dos componentes elétricos, desenvolvimento de um orifício para fixação da cabeça do poço e coluna de produção, e um suporte inferior para disposição dos componentes de subsuperfície.

Também foi construído um painel de controle, onde encontram-se instalados um botão para acionamento e outro para desligamento, sinalizadores, um inversor de velocidade e um disjuntor para proteger a instalação elétrica contra possíveis danos relacionados a sobrecargas elétricas e curtos-circuitos. O painel de controle juntamente com os seus componentes elétricos podem ser observados na Figura 4.2.

Figura 4.2. Painel de controle.



Todo o funcionamento do protótipo parte do acionamento no painel de controle, seus componentes juntamente com as outras partes elétricas contidas no protótipo serão discutidos detalhadamente no trabalho de Gonçalves (2015). Depois de ligado, o motor começa a girar a uma frequência de bombeio de aproximadamente 25 rpm transformando a energia elétrica em energia rotacional. Essa energia rotacional é transmitida aos contrapesos que minimizam os esforços no motor e juntamente com as manivelas transmitem energia, transformando o movimento rotacional em movimento alternativo da viga principal.

Na extremidade da viga principal encontra-se a cabeça da UB, que está conectada a barra roscada, utilizada como haste, através de um cabo de aço. A barra recebe o movimento alternativo, fazendo com que o pistão preso a ela se desloque dentro da coluna de produção em um curso ascendente e descendente.

No movimento ascendente, o fluido bombeado do aquário para o interior do revestimento, escoar para dentro da coluna de produção através da abertura da válvula de pé. Ao mesmo tempo, a válvula de passeio permanece fechada, permitindo que o fluido presente no pistão seja elevado até a cabeça do poço.

No movimento descendente, a válvula de pé fecha e a de passeio abre, admitindo que o fluido acumulado na coluna de produção escoe para o pistão. A abertura e fechamento das válvulas de pé e de passeio acontecem devido ao diferencial de pressão presente, exercida pela pressão hidrostática do fluido.

Os componentes de subsuperfície construídos em acrílico transparente e a utilização da água como fluido bombeado permitem a visualização de toda operação descrita. Tanto o funcionamento da unidade mecânica, quanto dos componentes de subsuperfície e elétricos, simulam uma operação de bombeio por uma unidade de bombeio mecânica real, atendendo aos requisitos deste trabalho.

Os dados de entrada e os parâmetros operacionais do protótipo obtidos através das equações expressas no capítulo dois estão apresentados na Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

Tabela 4.1. Dados de entrada.

Dados de entrada	
Diâmetro do pistão	0,36 m
Ciclos de bombeio	25 cpm
Massa específica da água	1000 kg/m ³
Massa específica do aço	7860 kg/m ³
Aceleração gravitacional	9,81 m/s
Altura da coluna hidrostática na sucção	0,4 m
Altura da coluna hidrostática na descarga	0,5 m
Folga do pistão	1 mm
Viscosidade da água	1 cp
Comprimento do pistão	0,1 m
Diâmetro da haste	0,01 m
Comprimento da haste	0,54 m

Tabela 4.2. Parâmetros operacionais do protótipo.

Parâmetros Operacionais	
Curso do pistão	8,84 cm
Deslocamento volumétrico	1,98 m ³ /d
Vazão de escorregamento	0,50 m ³ /d
Peso da coluna no ar	3,270 N
Empuxo	0,31 N
Peso da coluna imersa no fluido	2,96 N
Carga do fluido	5,012 N
Esforço dinâmico	0,0375 N
Carga máxima	8,01 N
Carga mínima	2,92 N
Efeito de contrabalanceio	5,47 N
Peak torque	0,112 N.m

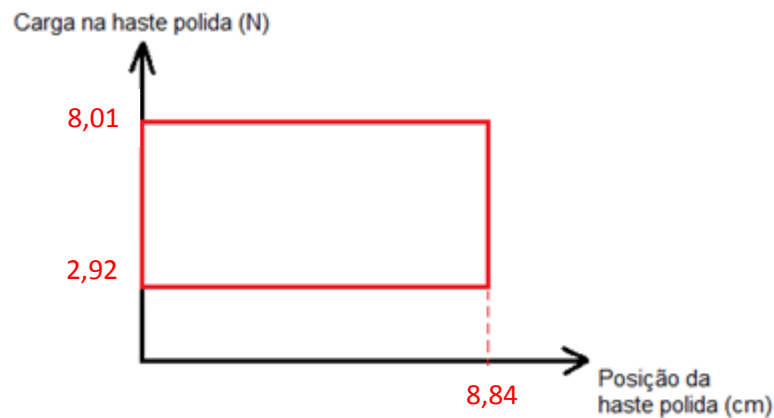
A altura da coluna hidrostática de sucção foi obtida a partir das especificações da bomba de aquário, modelo NS 160, utilizada no projeto. A altura da coluna hidrostática de descarga corresponde à coluna de produção inteira.

Para determinação do curso do pistão foi usado os dados coletados já aplicada à redução de escala. O valor obtido é utilizado tanto para denotar o curso da haste polida quanto para o curso do pistão, haja em vista que a diferença entre ambos seja os fatores de alongamento/encurtamento da coluna de hastes, *tubing* etc. e no caso em estudo podem ser negligenciados, pois a coluna de hastes é muito curta.

A vazão de escorregamento de 0,5 cm³/d corresponde a aproximadamente 25% do volume deslocado (PD). Assim de forma aproximada pode-se afirmar que temos uma eficiência volumétrica em torno de 75%.

Com os valores de carga máxima, carga mínima e curso do pistão, pode-se idealizar uma carta dinamométrica, conforme apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3. Carta dinamométrica idealizada.

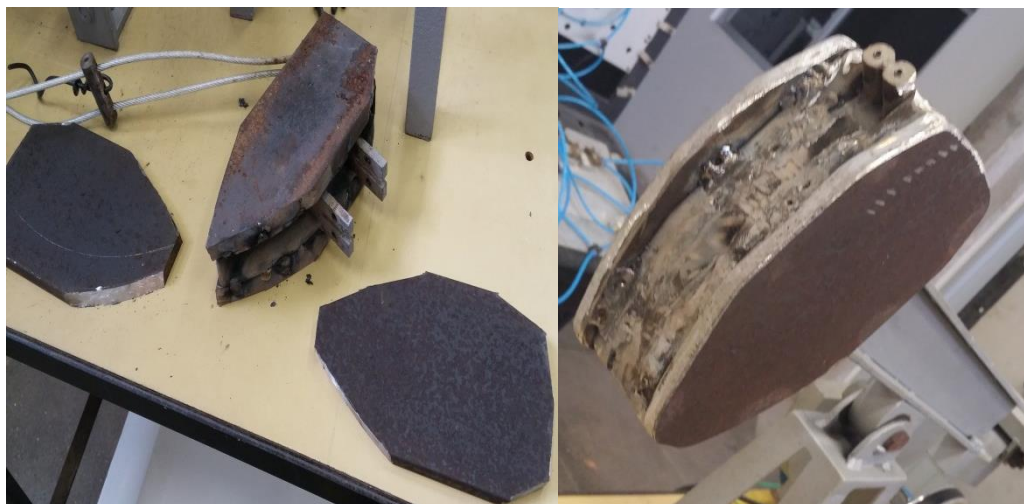


4.2 Dificuldades encontradas

Durante a execução do projeto alguns problemas surgiram, dificultando seu desempenho e finalização. Uma das maiores dificuldades encontradas foi o balanceamento da unidade mecânica, pois os contrapesos juntamente com as manivelas somavam um peso muito maior que o peso da cabeça, fazendo com que o motor tivesse problema em operar na frequência correta. Este fato ocorreu devido as manivelas terem sido fabricas maciças e devido a cabeça da UB ter sido entregue pelo fabricante com pesos e medidas fora dos padrões solicitados.

O problema foi resolvido adicionando-se aproximadamente 6 kg a cabeça da UB, através da soldagem de peças de ferro e chumbo. Além disso, foram adicionadas vinte ruelas de 15g da barra roscada para dar estabilidade à haste durante toda operação. O reajuste feito na cabeça da UB pode ser observado na Figura 4.4.

Figura 4.4. Cabeça da UB reajustada.



Outra dificuldade encontrada foi a instalação do suporte inferior da mesa utilizada como base. A espessura da peça de madeira usada foi desconsiderada e o espaço entre o suporte superior e inferior tornou-se menor que a altura do revestimento. Diante disso, foi necessário a abertura de um orifício no suporte inferior para inserção do revestimento. Tubulações em PVC foram utilizadas a fim de obter-se fixo e ancorado o tubo de acrílico usado como revestimento. A adaptação realizada pode ser observada na Figura 4.5.

Figura 4.5. Adaptação realizada para inserção do revestimento a base.



Também surgiram problemas na colagem das peças de acrílico, mais especificamente na colagem das sedes das válvulas, sendo necessário leva-las a um fornecedor que resolveu o problema utilizando uma cola específica. Lá pôde ser observado que a sede colada no pistão diferia no diâmetro, dificultando uma perfeita vedação. Isso ocorreu devido ao fato do tubo ser produzido a partir de uma chapa de

acrílico, o que causa uma não uniformização do diâmetro durante toda a sua extensão. Como solução para o problema foi fabricada uma nova sede.

Capítulo 5

Conclusão e Recomendações

5. Conclusão e Recomendações

Neste trabalho foi discutido a construção de um protótipo funcional de uma unidade de bombeio, capaz de reproduzir um sistema de Bombeio Mecânico em ambiente industrial numa escala reduzida e totalmente executável em ambiente acadêmico.

A metodologia empregada através da elaboração de um projeto gráfico na ferramenta computacional *SketchUp*, a partir da redução de escala aplicada nas medidas obtidas de uma unidade de bombeio real, foi de fundamental importância para fabricação dos componentes específicos.

O protótipo de uma unidade de bombeio é um sistema completo e transportável, com 1,30 de altura, construído em uma mesa adaptada com rodas, e com todos os seus componentes visíveis e distintos. Os componentes de subsuperfície são de material transparente, o que torna possível a visualização da operação das válvulas de pé e de passeio, e do movimento do pistão, transformando-os em uma ferramenta acadêmica interessante.

Como recomendação para trabalhos futuros recomenda-se a automação da unidade de bombeio, através da instalação de sensores de carga e de posição para a obtenção da carta dinamométrica de superfície, e, assim, utilizando a ferramenta computacional desenvolvida por Pessoa (2015), gerar a carta de fundo.

Ainda como sugestão para trabalhos futuros, é de interesse a realização de uma avaliação acadêmica, através da apresentação do protótipo automatizado aos alunos do curso de engenharia de petróleo da UFRN, com a finalidade de avaliar a importância do projeto desenvolvido nesse trabalho, juntamente com a ferramenta computacional na formação acadêmica dos alunos.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 11E**: Specification for Pumping Units Recommended. 18 ed. Washington, Estados Unidos: API Publishing Services, 2008.

ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Pereira de. **Cálculo da carta dinamométrica de fundo para poços direcionais**. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

BARRETO FILHO, Manuel de Almeida. **Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico de bombeio mecânico em poços de petróleo**. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1993.

COSTA, R. O. **Curso de Bombeio Mecânico**. Petrobras, 2008.

LIMA, Fábio Soares de. **Deteção e Classificação de Modos de Operação do Bombeio Mecânico Via Cartas Dinamométricas**. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

LUFKIN OILFIELD PRODUCTS GROUP. **Pumping Unit**. 2011.

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

MANÇÚ, Jeanderson de Souza. **Aplicação de Ferramenta e Método de Análise de Falha na Instalação dos Equipamentos do Sistema de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)**. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, Salvador, 2005.

NASCIMENTO, João Maria Araújo do. **Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico**. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PESSOA, Camila da Nóbrega. **Ferramenta Computacional para Cálculo da Carta Dinamométrica de Fundo em Poços Verticais**. 73 f. Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SOUSA, L. H. A.; Rodrigues, M. L.; Sousa, M. G.; Barros, Y. B.; Araújo, P. J. P.; Leite, M. S. **Aplicação do Bombeio Mecânico com hastes na elevação do petróleo**. Cadernos de Graduação – ciências Exatas e Tecnológicas, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 25-40, 2013.

TAKÁCS, Gabor. **Sucker-Rod Pumping Manual**. Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos: Pennwell Corporation, 2003.

VIDAL, Francisco José Targino. **Desenvolvimento de um Simulador de Bombeio por Cavidades Progressivas**. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.