**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**CENTRO TECNOLÓGICO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELO KOSMINSKY PROTASIO**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROVADOR DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM LINHA EM ESCALA LABORATORIAL**

**VITÓRIA**

**2010**

**MARCELO KOSMINSKY PROTASIO**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROVADOR DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM LINHA EM ESCALA LABORATORIAL**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

**VITÓRIA**

**2010**

**Agradecimentos**

Agradeço primeiramente ao meu orientador, o Professor Rogério Ramos, pela a oportunidade de participar deste projeto, creditando sua confiança em mim, e pelo apoio e dedicação em todas as etapas do projeto, compartilhando sempre a sua opinião e seus conhecimentos.

Agradeço de maneira muito especial a Luís Fernando de Queiroz Lavezzo, que esteve trabalhando junto comigo nessa jornada que durou por mais de 2 anos.

Agradeço a Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo o incentivo financeiro ao projeto.

Meus agradecimentos também vão ao Engenheiro Leonardo Pereira Bastos, o qual a contribuição foi fundamental ao andamento do projeto.

A banca examinadora que aceitou o convite de avaliar esse projeto.

A meus pais Gilda e Rafael, por todo suporte e incentivo durante todo o curso. Sem este apoio incondicional eu não teria chegado tão longe.

A Bruno Lopes Valentim e Marco Aurélio Bazelatto Zanoni, os quais sempre foram referências externas em dúvidas sobre o projeto e amigos nas horas vagas.

A Betina Marques de Oliveira que dedicou seu tempo e atenção na parte escrita do projeto, revisando e ajudando na formatação.

A todos as pessoas que ajudaram de forma indireta com o projeto, proporcionando momentos incríveis, dando forças para continuar.

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROVADOR DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM LINHA EM ESCALA LABORATORIAL**[[1]](#footnote-1)

Marcelo Kosminsky Protasio[[2]](#footnote-2)

**RESUMO**

O presente trabalho possui como objetivo a construção de um sistema primário de medição de vazão, conhecido como provador em linha (*Pipe Prover*), utilizado para a calibração de medidores de vazão. A principal motivação do projeto partiu do fato de cada vez mais se mostrar necessária a medição de vazão precisa, principalmente nas indústrias que lidam com transferências de substâncias onerosas, como, por exemplo, a indústria do petróleo e gás. O sistema de provação em linha é o mais utilizado por tais indústrias, já que pode realizar a calibração dos medidores utilizados sem se tornar necessária a interrupção da produção, diferente dos demais métodos de calibração. Esse tipo de calibrador é descrito na norma ISO, na qual este projeto foi baseado. A construção do medidor foi realizada com sucesso dentro das faixas de vazão de 1,34 x 10-4 a 3,3 x 10-4 m³/h e de pressão estimado de 0,5 kgf/cm².

Palavras-chave: medidor de vazão, provador em linha (*Pipe Prover*), medição de vazão.

**Project and construction of a Laboratory Scale Pipe Prover [[3]](#footnote-3)**

Marcelo Kosminsky Protasio[[4]](#footnote-4)

**ABSTRACT**

The present project aims the construction of a primary flow meter system known as Pipe Prover which is used to calibrate flow meters in general. The main motivation of this project is the fact that increasingly grows the needs for an accurate flow measurement, mainly in industries that deal with transfer of costly substances, as the oil and gas industries. The Pipe Prover system is the most used in industries, because it can calibrate other flow meter without stopping the production, unlike the other methods of calibration. This kind of prover is described at the ISO standard, in which this work is based on. The Pipe Prover construction was successfully made for a flow range of 1.34 x10-4 to 3,3 x 10-4 and the estimated pressure of 0.5 kgf/cm² .

Key Words: Flow meter, Pipe Prover, Flow measurement.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Sistema de provação tipo tanque 9

Figura 2: Medidor de vazão do tipo turbina 10

Figura 3: Sistema de provação em linha 10

Figura 4: Modelo de um provador em linha convencional unidirecional 11

Figura 5: Diagrama esquemático da turbina 12

Figura 6: Modelo de um provador em linha unidirecional com retorno automático 15

Figura 7: Provador em linha Bidirecional 15

Figura 8: Funcionamento de uma válvula de 4 vias 16

Figura 9: provador em linha de pequeno volume 16

Figura 10: Incerteza referida a contagem de pulsos 19

Figura 11: Método de interpolação de 2 tempos 21

Figura 12: Sistema implantado 23

Figura 13: Microscópio de medição 25

Figura 14: Diâmetros da esfera 1 vs o maior diâmetro do tubo 26

Figura 15: Diâmetros da esfera 2 vs o maior diâmetro do tubo 26

Figura 16: Diâmetros da esfera 3 vs o maior diâmetro do tubo 27

Figura 17: Diâmetros da esfera 4 vs o maior diâmetro do tubo 27

Figura 18: Diâmetros da esfera 5 vs o maior diâmetro do tubo 28

Figura 19: Diâmetros da esfera 6 vs o maior diâmetro do tubo 28

Figura 20: Diâmetros da esfera 7 vs o maior diâmetro do tubo 29

Figura 21: Esquema montado para o levantamento das curvas características 30

Figura 22: Bancada montada para o levantamento da curva característica da bomba 31

Figura 23: Altura de elevação (H(m))x Vazão (Q(m³/s)) 34

Figura 24: *NPSHr(*m) x Vazão (Q(m³/s)) 36

Figura 25: Protótipo Unidirecional com lançador individual 37

Figura 26: Protótipo Unidirecional com lançador tipo T 37

Figura 27: Protótipo Bidirecional com válvulas de reversão individuais 38

Figura 28: Válvula de 4 vias 39

Figura 29: Croquis da montagem e operação do conjunto de válvulas com 4 vias: 40

Figura 30: Foto da válvula de 4 vias montada 41

Figura 31: Representação do cavalete 41

Figura 32: Foto do cavalete montado 42

Figura 33: Corpo do provador 42

Figura 34: Sistema completo do provador 43

Figura 35: Vista superior da parte de descanso e manutenção 43

Figura 36: Vista lateral direita da parte de descanso e manutenção 44

Figura 37: Foto da parte de descanso e manutenção 45

Figura 38: Principio de funcionamento do espaçador 45

Figura 39: Espaçador e sua vista interna 46

Figura 40: Parte transiente do sistema 47

Figura 41: Foto da parte transiente do sistema 47

Figura 42: Parte útil do sistema 48

Figura 43: Conjunto completo do sistema de centralização 48

Figura 44: Conjunto detalhado do sistema de centralização 49

Figura 45: Alinhador dos colares de tomada 50

Figura 46: Variação da energia por trecho para a vazão mínima 59

Figura 47: Variação da energia por trecho para a vazão máxima 59

Figura 48: Curva do NPSHd para as diferentes vazões 61

Figura 49: Curva do *NPSHd* e *NPSHr* 61

Figura 50: Esquema de funcionamento do teste de estanqueidade 62

Figura 51: Foto da bancada montada 63

Figura 52: Suporte construído para a turbina 64

Figura 53: Foto do conjunto construído 65

Figura 54: Método de interpolação de pulsos criado 66

Figura 55: Sub-trechos da parte útil do sistema 67

Figura 56: Dispersão dos resultados entre a turbina e o provador 68

Figura 57: Croqui detalhado do provador 72

Figura 58: Sistema completo do provador em linha 78

Figura 59: sistema Tanque 79

Figura 60: Sistema Turbina 79

Figura 61: Sistema Cavalete 80

Figura 62: Vista superior do Sistema Provador 81

Figura 63: Vista lateral direita do sistema provador 81

Figura 64: Válvula de 4 vias na posição 1 82

Figura 65: Purgas dos ramos 83

Figura 66: Válvula de 4 vias na posição 2 83

Figura 67: Espaçador 84

Figura 68: Ligação da mangueira de purga do sistema 85

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Diâmetro recomendado para as esferas de elastômero 14

Tabela 2: Recomendações para operação do provador em linha 18

Tabela 3: Características da bomba 23

Tabela 4: Dimensões medidas das esferas e do tubo e as suas médias 25

Tabela 5: Porcentagem que cada esfera é maior que a tubulação 29

Tabela 6: Conversão das medidas do Rotâmetro para vazão 31

Tabela 7: Vazões escolhidas em L/h e m³/s 32

Tabela 8: Dados encontrados nas medições para vazão máxima e mínima 32

Tabela 9: Média de todos os dados coletados em cada vazão 33

Tabela 10: Variação das pressões para cada vazão 33

Tabela 11: Valores do *NPSHr* variando com a vazão 35

Tabela 12: Velocidades para em cada tubulação para todas vazões 52

Tabela 13: Rugosidade para todos os materiais 53

Tabela 14: Dados da água 53

Tabela 15: Número de Reynolds para cada vazão 54

Tabela 16: Fator de atrito para cada diâmetro de cada material 54

Tabela 17: Estimativas das perdas de carga em função da vazão aplicada as conexões do sistema de bombeamento 55

Tabela 18: Somatório das perdas de carga a montante e a jusante da bomba 57

Tabela 19: Variações de pressões 57

Tabela 20: Energia fornecida pela bomba 58

Tabela 21: Valores correspondentes para cada vazão 58

Tabela 22: Energia na saída do sistema para cada vazão 59

Tabela 23: Pressão atmosférica e de vapor de água 60

Tabela 24: NPSH disponíveis para cada vazão 61

Tabela 25: Características operacionais do medidor tipo turbina modelo TVT-L da Tecnofluid. 64

Tabela 26: Dados coletados no sentido Anti-Horário no sub-trecho 2-3 70

Tabela 27: Premissas de projeto 73

**LISTA DE SÍMBOLOS**

Fator de medição

Vazão real

Vazão medida pela turbina

Coeficiente de correção da temperatura

Coeficiente de correção da pressão

Incerteza devido somente À contagem de pulsos

Quantidade de pulsos emitidos durante uma calibração

Quantidade de pulsos emitidos durante uma calibração corrigidos

Tempo entre, o Último pulso antes da contagem e o Último pulso contado

Tempoentre o primeiro pulso contado e o primeiro pulso depois do término da contagem

Tempo da contagem

Altura de elevação

Gravidade

Variação de pressão

NPSH disponível

NPSH requerido

Rotação do rotor da bomba

Vazão

Coeficiente de redução da seção de entrada do rotor da bomba

Coeficiente adimensional característico da bomba

Volume entre os sensores de posição 1 e 4

Raio interno da tubulação de 60 mm

Comprimento total dos ramos do provador mais o comprimento da curva

Perda de carga

Fator de atrito

Comprimento equivalente das conexões

Velocidade do escoamento

Diâmetro da tubulação

Rugosidade absoluta

Número de Reynolds

Massa especÍfica da água

Viscosidade da água

Ganho de energia na bomba

Altura do nível da água do tanque

Perda de carga total do sistema

Altura final do líquido

Pressão atmosférica

Pressão de vapor da água

Peso específico

Altura de sucção

Somatório das perdas de carga a montante da bomba

**SUMÁRIO**

1 INTRODUÇÃO 2

1.1 Importância da medição de vazão na indústria de petróleo e gás 2

1.2 Normas regulamentadoras brasileiras 3

1.3 Revisão Bibliográfica 5

1.4 Motivação e objetivo do trabalho 7

2 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZãO E SUAS CARACTERÍSTICAS 8

2.1 Sistema de provação tipo tanque 8

2.2 Medidor mestre 9

2.3 Sistema de provação em linha 10

3 O SISTEMA de provação em linha 11

3.1 Subdivisões dos provadores em linha 13

3.1.1 Provador em linha convencional 13

3.1.2 Provador em linha de pequeno volume (*Piston Prover*) 16

4 REALIZAção dA CALIBRAÇÃO 17

4.1 Incertezas na calibração 19

4.2 A realização da interpolação de pulsos 19

4.2.1 Método de 2 tempos 20

5 concepção do provador 22

5.1 Premissas de Projeto 22

5.1.1 Levantamento dimensional das esferas 24

5.1.2 Levantamento das curvas características da bomba 30

5.2 Definição do modelo do provador a ser utilizado. 36

5.2.1 Parte de descanso e manutenção 43

5.2.2 Parte transiente do sistema 46

5.2.3 Parte útil do sistema 47

5.3 Cálculos de pré-montagem 51

5.3.1 Cálculo da energia do sistema 51

5.3.2 Cálculo do *NPSHd* 60

5.3.3 Levantamento quantitativo de possíveis vazamentos 62

5.4 Montagem da turbina 64

5.4.1 Analise dos Pulsos emitidos pela turbina 65

5.5 realizando a medição 66

6 COMENTÁRIOS FINAIS 71

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 76

|  |
| --- |
| **APÊNDICE 78**  Manual técnico de operação do sistema de provação em linha |

# INTRODUÇÃO

O presente projeto detalha a construção de um protótipo de um sistema de provação em linha (*Pipe Prover*). Este sistema é destinado à calibração de medidores de vazão de líquido devido a sua baixa incerteza, atribuída ao fato do mesmo ser um medidor de vazão primário.

O protótipo é de escala laboratorial e os ensaios foram realizados utilizando-se água. No entanto, este sistema é também amplamente utilizado na indústria de petróleo e gás devido a sua capacidade de realizar a calibração sem a necessidade de interromper a produção.

O presente trabalho será dividido da seguinte maneira:

Neste ***primeiro capítulo*** é realizada uma breve introdução mostrando a importância de medidores corretamente calibrados, juntamente com as motivações e objetivos do trabalho e por último a revisão bibliográfica.

No ***capítulo 2*** são abordados os principais métodos de calibração utilizados, destacando-se as vantagens e desvantagens de cada modelo, além dos seus princípios de funcionamento.

No ***capítulo 3*** é posto em foco o calibrador alvo deste trabalho; o sistema de provação em linha. São relatados os seus modelos existentes, as suas peculiaridades e o seu funcionamento de maneira detalhada.

No ***capítulo 4*** vê-se como é feita a calibração, a teoria da emissão dos pulsos e a interpolação dos mesmos, além de uma comparação das medições realizadas pelo provador e pela turbina.

No ***capítulo 5*** é feita a abordagem metodológica deste projeto; contemplando o caminho percorrido até o seu formato final, além dos problemas encontrados e soluções propostas.

No ***capítulo 6*** são expostas as considerações finais extraídas por meio de um resumo do projeto. Por fim, são efetuadas recomendações para pesquisas futuras.

## 1.1 Importância da medição de vazão na indústria de petróleo e gás

O conhecimento da quantidade de volume de certa substância envolvida em um determinado trabalho é um fator de grande importância nos processos de produção, controle e comercialização de líquidos e gases nas indústrias, e tal fato, torna os medidores de vazão itens indispensáveis durante a produção.

Existe um ditado no ramo da metrologia para indústrias que comercializam líquidos e gases que diz que o medidor de vazão é a “caixa registradora da empresa”. Na indústria do petróleo e gás, por se trabalhar com substâncias de alto valor agregado, tanto nos processos quanto na comercialização, uma medição precisa se torna ainda de maior importância, fazendo-se então necessários medidores de vazão corretamente calibrados.

Um medidor calibrado é aquele o qual se sabe a vazão real com uma faixa de incerteza conhecida. Essa faixa de incerteza pode variar dependendo da situação, por exemplo, para o monitoramento de um processo de baixa importância, não existe a necessidade de medidores de vazão extremamente precisos, pois, para tal, precisa-se de medidores mais caros e que passaram por processos onerosos de calibração, porém, quando se trata com transferência de custódia de uma substância, muitas vezes substâncias onerosas como no caso do petróleo e gás, os medidores devem ser de alta precisão e minuciosamente calibrados para não ocorrer prejuízos a nenhuma das partes.

Para se ter uma idéia da importância da medição da vazão na indústria do Petróleo e Gás, segundo a Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em 2008 foram produzidos 663,275 milhões de barris de petróleo no Brasil[[5]](#footnote-5), considerando o preço médio de US$ 80/Barril[[6]](#footnote-6), se os medidores de vazão possuíssem na época um erro de ±0,5% na medição, seria acarretado um erro de ± 3,316 milhões de barris, podendo então, em casos extremos, ter chegado a 265,303 milhões de dólares o prejuízo total que as empresas produtoras sofreram devido somente a venda da produção, ou, em caso contrário, poderia significar um valor a mais que seria passado aos consumidores.

Os sistemas de medição dos volumes de petróleo e de gás natural são padronizados e devem seguir normas técnicas internacionais, sendo que as principais são (SILVA FILHO, 2010):

* ISO – International Organization for Standardization
* API – American Petroleum Institute
* AGA – American Gas Association
* OIML – Organisation Internationale de Métrologie Légale

No Brasil, para o controle da produção de petróleo e gás natural do país, a ANP, órgão responsável por regular os setores do Petróleo e Gás, criou junto com o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Indústrial) em 19/06/2000 a portaria conjunta ANP/INMETRO n°1 (SILVA FILHO, 2010), que é descrita em maior detalhe no subitem a seguir.

## 1.2 Normas regulamentadoras brasileiras

A ANP é o órgão regulador das atividades que integram a indústria do petróleo e gás natural e biocombustíveis no Brasil. Para a realização da fiscalização da medição de vazão da produção, a ANP possui um setor chamado Núcleo de Fiscalização da Produção, que possui as seguintes funções[[7]](#footnote-7):

* Regulamentar e fiscalizar os sistemas de medição que computam o volume produzido nos campos de petróleo e gás natural do país;
* Acompanhar as ocorrências de falha de medição e as ações tomadas no sentido de corrigir eventuais erros nos volumes medidos;
* Aprovar, no Projeto de Desenvolvimento, o ponto de medição e as principais tecnologias que serão empregadas na medição, para o campo em questão;
* Conferir os volumes informados nos Boletins Mensais de Produção com os dados obtidos em campo, durante as fiscalizações.

A partir da data de início da produção de cada campo, o volume e a qualidade do petróleo e gás natural produzidos são determinados periódica e regularmente nos pontos de medição da produção, com a utilização dos métodos, equipamentos e instrumentos de medição previstos no Plano de Desenvolvimento e de acordo com a Portaria conjunta ANP/INMETRO nº 1 de 19/06/2000, sendo esta portaria uma das principais motivações do presente trabalho[[8]](#footnote-8).

Da portaria, pode-se destacar alguns itens que mostram a relevância do presente trabalho:

5. CRITÉRIOS GERAIS PARA MEDIÇÃO

 5.1 Os equipamentos e sistemas de medição devem ser projetados, instalados, operados, testados e mantidos em condições adequadas de funcionamento para medir, de forma acurada e completa, as produções de petróleo e gás natural para fins fiscais e os volumes para controle operacional da produção, transporte, estocagem, importação e exportação de petróleo e gás natural.

6. MEDIÇÃO DE PETRÓLEO

6.3 Medição de Petróleo em Linha

6.3.1 Os sistemas de medição em linha devem ser constituídos, pelo menos, dos seguintes equipamentos:

b) Um sistema de calibração fixo ou móvel, conforme previsto no subitem 6.4 deste Regulamento, apropriado para a calibração dos medidores de fluidos e aprovado pela ANP;

6.4 Calibração de Medidores em Linha

6.4.1 Os medidores fiscais da produção de petróleo em linha devem ser calibrados com um intervalo de no máximo 60 dias entre calibrações sucessivas. Intervalos maiores podem ser aprovados pela ANP com base no registro histórico das calibrações. Outros medidores devem ser submetidos a verificação e calibração conforme subitens 8.2.1 e 9.3 deste Regulamento.

6.4.2 Para instalações e operação de sistemas de calibração de medidores de petróleo em linha podem ser utilizados provadores, tanques de prova, medidores padrão ou outros sistemas previamente autorizados pela ANP, desde que atendam aos documentos abaixo relacionados ou outros reconhecidos internacionalmente, e aprovados pela ANP:

ISO 7278-1 Liquid Hydrocarbons -- Dynamic Measurement -- Proving Systems for Volumetric Meters -- Part 1: General Principles

ISO 7278-2 Liquid Hydrocarbons -- Dynamic Measurement -- Proving Systems for Volumetric Meters -- Part 2: Pipe Provers

ISO 7278-3 Liquid Hydrocarbons -- Dynamic Measurement -- Proving Systems for Volumetric Meters -- Part 3: Pulse Interpolation Techniques

ISO/DIS 7278-4 Liquid Hydrocarbons -- Dynamic Measurement -- Proving Systems for Volumetric Meters -- Part 4: Guide for Operators of Pipe Provers.

## 1.3 Revisão Bibliográfica

A realização desse trabalho foi baseada principalmente na série de normas ISO 7278, que são divididas em quatro edições.

A primeira (ISO 7278-1) foi lançada em 1987 e retrata sobre os princípios gerais dos métodos de calibração para medidores de vazão. Nesta norma é encontrada informações sobre os três principais métodos de calibração, são eles

* O sistema de provação tipo tanque
* O medidor mestre
* O sistema de provação em linha

Já a ISO 7278-2 foi lançada em 1988 e foca nos sistemas de provação em linha, ela mostra com detalhe o princípio de funcionamento dos provadores em linha existentes, condições básicas de operação e procedimentos pré operação.

A ISO 7278-2:1988 relata como deve ser realizada a calibração do sistema de provação em linha antes da sua operação, a fim de saber o seu volume exato de trabalho, e relata também cálculos iniciais para a determinação de parâmetros básicos para a concepção do projeto.

Na calibração de medidores que funcionam através da emissão de pulsos, exige-se uma quantidade mínima de 10000 pulsos emitidos durante a calibração, caso isso não ocorra, é necessário a interpolação dos pulsos emitidos e a norma ISO 7278-3 lançada em 1998 relata os métodos para a realização dessa interpolação.

A última norma ISO da série (7278-4) foi lançada em 1999 e descreve todos os cuidados e procedimentos a serem tomados durante a operação da calibração, condições padrões a serem respeitadas de maneira que se consiga uma calibração correta.

A ISO 7278-4 (1999) descreve também efeitos em que parâmetros como a viscosidade do fluido, variação da pressão e temperatura, agentes externos, podem influenciar na calibração.

Além das normas ISO, outras fontes foram de importância para a concepção do projeto, em 1987 MACINTYRE lançou a segunda edição do livro Bombas e Instalações de bombeamento, muito útil para o entendimento sobre perdas de cargas na tubulação.

Em 1988 a American Petroleum Institute (API) lançou a primeira edição do quarto capítulo do Manual das condições padrões de medição de petróleo (Manual of Petroleum Measurement Standards). Este manual relata sobre provadores em linha, além de fatores importantes para a concepção e operação do sistema, as vantagens e desvantagens de cada um.

Em 2000, a Instromet lançou o Turbine Gas Meter Handbook, fornecendo informações detalhadas sobre o funcionamento dos medidores tipo turbina.

Ainda em 2000, foi criada a portaria ANP/INMETRO n°1, regulamentando a produção de Petróleo e Gás no Brasil.

Em 2006, Fox;McDonald e Pritchard (2006) lançaram a sexta edição do livro Introdução a Mecânica dos Fluidos, muito utilizada para informações sobre o cálculo de energia do sistema, como a energia fornecida pela bomba e o equacionamento de Bernoulli.

Ainda em 2006, foram lançadas a quarta edição da obra Hidráulica Básica (PORTO, 2006) e o manual técnico da fabricante de bombas SCHNEIDER, que juntos forneceram as informações necessárias sobre cavitação e sobre a altura líquida positiva de sucção, do inglês *Net Positive Suction Head* (*NPSH*).

Em 2010 Silva Filho publicou o artigo onde estudou métodos de como realizar a medição de vazão, relatou a importância dos estudos da incerteza e também das normas técnicas e de regulamentação, além de relatar os principais desafios encontrados na realização da medição de vazão.

Lavezzo, 2010, realizou um estudo sobre os cálculos das incertezas inerentes a construção e operação de um sistema de provação em linha bidirecional.

## 1.4 Motivação e objetivo do trabalho

O presente trabalho possui como o objetivo o projeto, a construção e a análise do sistema de provação em linha, utilizado para colocar em prova – realizar a calibração- medidores de vazão.

O estudo em questão é um tema atual e, como mostrado anteriormente, é referenciado na portaria conjunta ANP/INMETRO nº 1 de 19/06/2000, onde é indicado como um dos 3 métodos padronizados para a realização da calibração dos medidores de vazão utilizados nas plataformas de petróleo.

O estudo, no entanto, vai além de calibração nas plataformas, o provador em linha é largamente utilizado nos laboratórios de calibração de medidores de vazão e em indústrias que necessitam de grande precisão em suas medições.

# MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZãO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Os medidores de vazão podem ser classificados como primários e secundários. Os primários obtém uma medição direta, ou seja, marca-se o tempo que o volume demora a percorrer certa distância, obtendo diretamente a medida.

Os medidores secundários, por sua vez, medem algum outro parâmetro e o transformam para vazão através de relações, por exemplo, a placa de orifício realiza a medição de diferença de pressão, e com essa diferença e com essa diferença é obtida a vazão.

Por medirem a vazão diretamente, os medidores primários são mais confiáveis que os secundários, sendo então os mais utilizados para realizar as calibrações (ISO 7278-1, 1987).

Segundo a ISO 7278-1 (1987) existem 3 métodos de se efetuar a calibração de medidores de vazão muito utilizados, são eles, o sistema de provação tipo tanque, o medidor mestre e o sistema de provação em linha (*“Pipe Prover”*). Estes métodos, como mostrados no item 1.2, são recomendados pela ANP para a calibração dos medidores de vazão utilizados nas plataformas de petróleo.

## 2.1 Sistema de provação tipo tanque

O sistema de provação tipo tanque (Figura 1) consiste em um tanque de dimensões precisamente conhecidas. O líquido, após passar pelo medidor, entra no tanque, onde estão localizados sensores de nível e um cronômetro de alta precisão, marcando-se o tempo que a água demora a preencher certo volume, tem-se a vazão real. Comparando a vazão real encontrada com a vazão dada pelo medidor, é efetuada a calibração (ISO 7278-1, 1987).

Segundo com o *Manual of Petroleum Measurement Standards (*API 1988*),* esse sistema possui como desvantagem o fato de interromper o fluxo do líquido a ser medido para poder realizar a calibração, ou seja, para se calibrar necessita-se de parar a produção, acarretando perdas.

|  |
| --- |
| PROVER TANK |

Figura 1: Sistema de provação tipo tanque

(Fonte: [www.oval.co.jp/english/products\_e/6003\_prover.html](http://www.oval.co.jp/english/products_e/6003_prover.html) capturado em 03/03/2010)

## 2.2 Medidor mestre

Segundo a norma ISO 7278-1 (1987):

* Um medidor é classificado como um medidor mestre quando é calibrado de maneira muito precisa um medidor secundário de vazão com um medidor primário.
* Ao se possuir um medidor com alto nível de precisão, o mesmo pode ser utilizado para calibrar outros medidores secundários. Estes medidores devem ser postos em série e próximos um do outro, assim são feitos as medições e a calibração dos medidores.
* O medidor mestre deve ser um medidor confiável, consistente na sua performance e mantido em condições ideais de operação, para que a sua medição se mantenha precisa por mais tempo. A turbina (Figura 2) é um medidor da vazão muito utilizado como medidor mestre.
* Esse medidor possui como desvantagem o fato de ser um medidor secundário, estando sujeito a perda da sua exatidão com o passar do tempo, portanto não é tão confiável como o sistema de provação tipo tanque e o sistema de provação em linha.

|  |
| --- |
|  |

Figura 2: Medidor de vazão do tipo turbina

(Fonte: [www.tecnofluid.com.br/pt/vazao/55](http://www.tecnofluid.com.br/pt/vazao/55) capturado em 03/03/2010)

## 2.3 Sistema de provação em linha

Os provadores em linha (Figura 3) se utilizam de uma tubulação para realizar a medição, para isso é preciso de uma tubulação isenta de vazamentos e que se tenha todas as características físicas e dimensionais conhecidas (ISO 7278-1, 1987).

Com o sistema montado, é colocado em seu interior um dispositivo que, empurrado pelo líquido, aciona sensores de posição. Sabendo as distâncias entre os sensores, o volume entre eles e o tempo que o fluido demora a percorrer essa distância, se conhece a vazão (ISO 7278-1, 1987).

O provador em linha, ao contrário do Tanque, não necessita da interrupção do fluxo para a medição, ele é instalado em paralelo a linha principal e só necessita de um desvio do fluxo, e não de sua interrupção, por isso é o calibrador mais utilizado nas indústrias (API, 1988).

O provador em linha é o medidor alvo deste trabalho e será melhor detalhado no capítulo 3.

|  |
| --- |
| http://metrology.burtini.ca/img/meterprover.gif |

Figura 3: Sistema de provação em linha

(Fonte: <http://metrology.burtini.ca/vol_calibrate.html> capturado em 03/03/2010)

# O SISTEMA de provação em linha

Os provadores em linha, como já mencionado, são os provadores mais utilizados na indústria. O sistema consiste em uma tubulação conectada em paralelo com a tubulação principal e seu desvio é realizado logo após a saída do medidor a ser aferido, como mostrado na Figura 4.

Para o processo de calibração, é efetuada uma manobra de válvulas que desvia o fluxo da tubulação principal para a tubulação do sistema de provação. Nessa tubulação do sistema de provação encontram-se sensores de posição, que são posicionados na entrada e na saída da mesma, tais sensores são conectados a uma central responsável pela aquisição e manipulação de dados.

Com o fluxo desviado, é lançado um dispositivo no sistema que percorre a tubulação principal, ao passar pelo primeiro sensor, a central de aquisição começa então a marcar o tempo, e quando o dispositivo passar pelo sensor na saída a contagem do tempo pára, e então, como sabe-se o volume exato entre os sensores, têm-se a vazão.

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | |  |   Figura 4: Modelo de um provador em linha convencional unidirecional  (Fonte: ISO 7278-2, (1988)) |

Um modelo de provador em linha convencional unidirecional é mostrado na , porém seus detalhes serão melhores explicados no subitem 3.1.

Para medições corretas, deve-se saber a quantidade de líquido exata que passou entre os sensores, e por isso é de suma importância que o dispositivo entre com interferência no sistema, para impedir então a passagem de líquido entre o dispositivo e as paredes da tubulação.

Porém, após percorrer o sistema, a esfera deve sair em uma tubulação de diâmetro maior que o diâmetro da mesma, pois assim pode repousar e permitir que o fluxo do líquido continue.

O sistema provação em linha é utilizado em sua maioria das vezes para calibrar medidores de vazão que se utilizam da emissão de pulsos para realizar a medição. O medidor mais comum desse tipo, que também é o medidor utilizado no presente projeto, é a turbina.

Segundo o manual técnico da Instromet (2000), a turbina é composta basicamente de um condicionador de fluxo, um anel concêntrico com a tubulação e um rotor (Figura 5). O princípio de funcionamento da turbina é o seguinte: o fluido entra na turbina e passa inicialmente pelo condicionador de fluxo, tornando o escoamento mais uniforme, após essa passagem, o fluido se depara com um anel concêntrico com a tubulação que diminui a área de escoamento, aumentando então a sua velocidade.

|  |
| --- |
|  |

Figura 5: Diagrama esquemático da turbina

(Fonte: Instromet (2000))

|  |
| --- |
|  |

Preso ao anel está o rotor da turbina, que é acionado pela quantidade de movimento transferida do escoamento para o rotor, o aumento da velocidade devido a contração do fluido tem como objetivo o aumento desse torque.

O rotor da turbina gira então a uma velocidade proporcional à velocidade do escoamento, tornando cada revolução do rotor equivalente a uma certa quantidade de volume. Essa velocidade de giro é medida por meio de contadores que estão localizados nas pás do rotor, e um sensores de posição. Quando o sensor detecta a esfera, emite um pulso elétrico de maneira proporcional ao escoamento.

Cada turbina possui um fator k característico, esse fator é uma relação dos pulsos que essa turbina emite por certa quantidade de volume (ISO 7278-2, 1988), por exemplo, na turbina utilizada no projeto, de acordo com o manual da TECNOFLUID (2009), ela possui um fator k de 500,39, ou seja, ela emitirá 500,39 pulsos para cada m³ de líquido que atravessá-la. A relação entre os pulsos gerados e a vazão é linear.

## 3.1 Subdivisões dos provadores em linha

Os provadores em linha podem ser subdivididos de acordo com os seus dispositivos, são classificados em provador em linha convencional ou provador em linha de pequeno volume (Piston Prover).

3.1.1 Provador em linha convencional

Segundo a norma ISO 7278-2 (1988):

* No provador em linha convencional o dispositivo que percorre o sistema é uma esfera feita de material elastômero, tal material é utilizado pois como o dispositivo percorre as tubulações com interferência, o mesmo deve ser capaz de se deformar e realizar o trajeto sem provocar danos a si próprio ou a tubulação.
* A esfera deve possuir o seu diâmetro, aproximadamente, 2% maior que o diâmetro interno da tubulação, devendo essa diferença aumentar quando se tratar de tubulações de grandes diâmetros. Porém se o diâmetro for muito maior que o pré-definido, poderia causar muito atrito com a tubulação, acarretando danos na esfera e aumento de incerteza na medição.
* A esfera deve ser preenchida com o mesmo líquido de trabalho, por exemplo, na calibração de um medidor que trabalhe com água, a esfera deve então conter água em seu interior.

A Tabela 1 mostra a relação entre o tamanho das esferas com o tamanho nominal dos tubos de acordo com o site do fabricante de esferas GIRARD[[9]](#footnote-9).

Tabela : Diâmetro recomendado para as esferas de elastômero

|  |  |
| --- | --- |
| Diâmetro nominal do tubo (mm) | Diâmetro aproximado da esfera (mm) |
| 50 | 53 |
| 65 | 65 |
| 80 | 83 |
| 100 | 100 |
| 150 | 154 |
| 200 | 203 |
| 250 | 254 |
| 300 | 307 |

O provador em linha convencional também pode ser subdividido em 2 tipos, o unidirecional e o bidirecional.

O provador em linha convencional unidirecional é aquele cujo fluxo do líquido é sempre no mesmo sentindo, ou seja, a esfera irá percorrer a tubulação partindo sempre de um mesmo ponto fixo e terminando o seu percurso em outro ponto fixo (ISO 7278-2, 1988), conforme mostrado na Figura 6.

Portanto, para o funcionamento de um provador em linha convencional unidirecional, a esfera deve retornar para o ponto inicial por fora do sistema, existindo duas maneiras de ser realizado este retorno, de maneira manual, onde retira-se a esfera completamente do sistema manualmente e insere-se novamente na entrada, e de maneira automática (Figura 6), onde é construído uma ligação entre a saída e entrada, e após o percurso a esfera cai automaticamente na entrada (ISO 7278-4, 1999).

|  |
| --- |
|  |

Figura 6: Modelo de um provador em linha unidirecional com retorno automático.

(Fonte: ISO 7278-4, (1999))

|  |
| --- |
|  |

O provador em linha convencional bidirecional (Figura 7) permite o fluxo do líquido nos dois sentidos do sistema, portanto, a esfera ao terminar o seu percurso, com a reversão do sentido do fluxo, volta pelo mesmo caminho de ida, obtendo novos dados sem a necessidade de retirada da esfera do sistema (ISO 7278-2, 1988).

|  |
| --- |
|  |

Figura 7: Provador em linha Bidirecional.

(Fonte: ISO 7278-2, (1988))

|  |
| --- |
|  |

A reversão de fluxo ocorre graças a uma válvula de 4 vias. Esta é uma válvula especial que possui duas entradas e 2 saídas, e permite com somente uma manobra a reversão do fluxo. Uma válvula de 4 vias pode ser substituída por 4 válvulas simples, se tornando uma opção mais econômica, porém perde-se na praticidade e na velocidade de uma manobra completa (ISO 7278-2, 1988). Seu funcionamento é exemplificado na

|  |
| --- |
|  |

Figura 8: Funcionamento de uma válvula de 4 vias.

(Fonte: ISO 7278-2, (1988))

3.1.2 Provador em linha de pequeno volume (*Piston Prover*)

O provador em linha de pequeno volume (Figura 9), ao invés de utilizar a esfera como dispositivo, se utiliza de um pistão para a realização da medição. Portanto, o líquido entra no sistema e empurra o pistão entre os sensores de posição, realizando então a medição (ISO 7278-2 1988).

|  |
| --- |
|  |

Figura 9: provador em linha de pequeno volume.

(Fonte: Lavezzo (2010))

# REALIZAção dA CALIBRAÇÃO

Até o presente momento o trabalho foi focado no funcionamento dos provadores em linha, cabendo agora mostrar como é realizada a calibração da turbina pelo provador.

A realização da calibração consiste em conectar a saída dos pulsos da turbina na mesma central de aquisição de dados responsável por marcar o tempo e detectar os momentos nos quais a esfera entra e sai do sistema.

A central, quando recebe o primeiro sinal referente aos sensores de posição, começa ao mesmo instante a contagem do tempo e a contagem dos pulsos recebidos pela turbina. Esta contagem para no momento em que o sensor de posição localizado na saída é acionado.

Dessa maneira, a central possui em seu banco de dados o tempo de trajeto do dispositivo, o volume útil do sistema (volume entre sensores) e o número de pulsos emitidos pela turbina, com esses dados é possível obter a vazão fornecida pelo provador em linha (vazão real) e a vazão fornecida pela turbina, para então compará-las.

Dessa comparação é obtido o fator do medidor (*mf*) , dado pelas equações 1 e 2 (ISO 7278-2):

Onde:

*Vreal* – Vazão medida pelo calibrador

*Vturbina* – Vazão medida pela turbina

Porém, nem sempre as condições de calibração são as mesmas que as de operação, por isso, segundo Silva Filho (2010), são utilizados fatores de correção para a diferença de temperatura (*CTL*) e para a diferença de pressão (*CPL*), obtêm-se então a equação 3.

Antes de começar a operar o sistema, é necessário esperar um tempo para que a temperatura e as pressões do sistema passem sua fase transiente e então permaneçam constantes (ISO 7278-2, 1988).

Durante a operação, podem ser encontrados alguns erros, na Tabela 2 são apresentados alguns desses erros e as soluções a serem tomadas.

Tabela : Recomendações para operação do provador em linha

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Causa** | **Efeitos** | **Recomendações** |
| Sujeira na saída do tanque ou na entrada da turbina | Diminuição da vazão do provador | Limpar as conexões |
| Ar na tubulação | Dispersão/ Diminuição da vazão | Apertar as conexões, retirar o ar através das válvulas de alívio |
| Sensores de detecção | Não detecção dos sensores | Ajustar a freqüência dos sensores |
| Reversão do fluxo incorreta | Aceleração da esfera no sistema | Aguardar a esfera chegar ao seu ponto final antes de realizar a manobra de reversão |
| Nível do tanque baixo | Cavitação na bomba | Manter o nível do tanque acima do recomendado |
| Conexões mal apertadas | Vazamento durante a operação | Passar veda rosca na conexão e re-apertar |

## 4.1 Incertezas na calibração

Segundo Silva Filho (2010), a incerteza de uma medição representa a qualidade dos resultados da calibração, e sua determinação é de extrema importância para determinar a confiabilidade nos valores encontrados.

Normalmente, essas incertezas são estabelecidas via regulamentação oficial (ANP, Inmetro) ou via contratos entre as partes envolvidas (SILVA FILHO, 2010).

O foco do presente trabalho é a construção de um sistema de provação em linha. As incertezas envolvidas no mesmo são detalhadas em Lavezzo (2010).

## 4.2 A realização da interpolação de pulsos

A interpolação de pulsos é necessária pelo fato da emissão dos pulsos não ser algo contínuo, ocorrendo à possibilidade da esfera acionar os sensores no intervalo entre pulsos, acarretando uma incerteza (ISO 7278-2, 1988), conforme mostrado na Figura 10.

|  |
| --- |
|  |

Figura 10: Incerteza referida a contagem de pulsos

|  |
| --- |
|  |

Segundo a norma ISO 7278-2 (1988), essa incerteza relacionada aos pulsos emitidos não deve passar de 0,01%, e para isto, o número mínimo de pulsos que deve ser emitidos durante uma provação é de 10000 pulsos, pois a equação que determina esta relação é:

Onde:

*U* é a incerteza devido somente a contagem de pulsos; e

*n* é a quantidade de pulsos emitidos durante uma calibração.

Para a obtenção dessa incerteza, é necessária uma grande quantidade de volume, isso é obtido através de longa distância entre sensores ou uma tubulação de grande diâmetro. Caso essas condições não sejam possíveis de se alcançar, é necessária a realização da interpolação de pulsos (ISO 7278-2, 1988).

Essa interpolação é regida pela norma ISO 7278-3, e existe 3 opções de interpolação, são elas:

* Método de 2 tempos (*Double-timing method*);
* Método de 4 tempos (*Quadruple-timing method*)
* Método do sistema fechado (*Phase-locked-loop method*)

Foram testados 2 métodos de interpolação dos pulsos nos testes, um é o método de 2 tempos apresentado na norma, e o outro foi desenvolvido e será detalhado na sessão 5.4.1.

4.2.1 Método de 2 tempos

Segundo a norma ISO 7278-3 (1999) método de 2 tempos consiste em pegar o número de pulsos somados (*n*), multiplicá-lo pelo tempo da contagem (*T2*) e depois dividi-lo ou pelo tempo entre, ou, do ultimo pulso antes da contagem e o ultimo pulso contado(*T1i*), ou entre o primeiro pulso contado e o primeiro pulso depois do término(*T1ii*), conforme mostra a Figura 11.

|  |
| --- |
|  |

Figura 11: Método de interpolação de 2 tempos

(Fonte: ISO 7278-3, (1998))

|  |
| --- |
|  |

Após a aquisição dos dados de tempo, de acordo com a norma ISO 7278-3 (1998) , procede-se a seguinte operação

Obtendo então os pulsos interpolados.

# concepção do provador

A confecção do sistema foi constituída das seguintes etapas:

* Definição de parâmetros iniciais para cálculo e dimensionamentos, como os diâmetros envolvidos, equipamentos de trabalho, entre outros;
* Definição do modelo do provador a ser utilizado;
* Cálculos e testes iniciais pré-montagem;
* Montagem do equipamento;
* Coleta de dados e análise de resultados

## 5.1 Premissas de Projeto

A primeira definição do projeto foi que o mesmo seria um provador em linha convencional, tendo como um ponto de partida a definição da tubulação a ser utilizada e a esfera que atenderia à norma em relação a essa tubulação. O encontro desse par é um ponto crucial para o dimensionamento, pois a norma impõe uma relação entre os mesmos (esfera de elastômero com diâmetro 2% maior que a tubulação).

A tubulação foi definida que seria de PVC, por sua grande variedade de diâmetros encontrado no mercado e facilidade de trabalho, cabendo então encontrar uma esfera que combinasse com algum dos diâmetros disponíveis (por se trabalhar com produtos disponíveis no mercado, há uma limitação nas opções). O melhor par encontrado foi com a tubulação de PVC soldável de diâmetro nominal de 60 mm, o diâmetro da tubulação a qual a esfera irá repousar será de 75 mm.

Para garantir com exatidão as dimensões das esferas e a sua relação com a tubulação, foram realizadas medições para averiguar as diferenças envolvidas, essas medições serão mais bem detalhadas no subitem 5.1.1.

Definida a tubulação, foi feito um levantamento dos principais equipamentos utilizados, estes seriam:

- Um reservatório

- Uma turbina

- Uma bomba

- O sistema de provação

Posicionados de acordo com a Figura 12:

|  |
| --- |
|  |

Figura 12: Sistema implantado

|  |
| --- |
|  |

As conexões que conectam todo o sistema foram feitas com mangueiras de ¾”.

Para o reservatório foi utilizado um tanque de capacidade aproximada de 710 litros. A bomba é da marca ZIMERMAN e possui as características citadas na Tabela 3.

Tabela : Características da bomba

|  |  |
| --- | --- |
| Potência | 1/4 CV |
| Freqüência | 60 Hz |
| Rotação | 3500 RPM |

Apesar de saber aos dados da bomba, não se teve acesso a mais informações, e como é necessário mais dados para o trabalho, foi montada uma bancada de testes para levantamento das curvas da bomba. O levantamento das curvas da bomba é mostrado com detalhes no subitem 5.1.2.

A turbina foi dimensionada para as pressões e a faixa de vazão do sistema e então comprada. As faixas de pressão e vazão foram dimensionadas no teste realizado com a bomba e portanto são citadas no subitem 5.1.2.

Sobre o Provador sabia-se que seria um provador em linha convencional, porém ainda havia de ser decidido qual modelo (unidirecional ou bidirecional) a ser utilizado. Detalhes sobre a escolha do modelo será melhor detalhada no item 5.2.

5.1.1 Levantamento dimensional das esferas

O levantamento dimensional das esferas foi realizado para verificar se as mesmas possuam todos os pré-requisitos impostos pela norma.

As esferas adquiridas inicialmente eram ocas, porém foram preenchidas com água, que é o fluido de trabalho.

Para a realização dessa operação, foi feito um pequeno furo com uma seringa e retirado o ar do interior das esferas, e a mesma seringa foi utilizada para o preenchimento com água.

Para a vedação do furo, foi utilizado um alfinete aquecido, ao encostar o alfinete na esfera, a mesma derrete a borracha em sua volta, vedando assim o furo realizado.

Após a realização desta operação em várias esferas, foram escolhidas as 6 visualmente melhores e mais uma esfera vazia e realizado então testes dimensionais nas mesmas.

Nesse teste, tomou-se as medidas dos diâmetros tanto das esferas como de uma amostra da tubulação, foram escolhidos 4 planos (A,B,C,D) variando de 45° cada, então realizou-se as medidas.

Para não ocorrer deformação das esferas durante as medidas, o que acarretaria em um erro na medição, foi utilizado um microscópio de medição (Figura 13).

|  |
| --- |
|  |

Figura 13: Microscópio de medição

|  |
| --- |
|  |

Uma amostra da tubulação foi retirada e também foram tomadas 4 medições em planos separados por ângulos de 45°, dessa vez a medição foi feita com um paquímetro.

Depois de tiradas as medidas dos diâmetros (em milímetros) da esfera e da tubulação, foi obtida a Tabela 4.

Tabela : Dimensões medidas das esferas e do tubo e as suas médias

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Plano | Esfera | | | | | | | Tubo |
| 1(vazia) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| A | 54,06 | 53,9 | 53,48 | 53,63 | 53,01 | 53,61 | 53,78 | 53,11 |
| B | 54,17 | 54,02 | 53,71 | 53,35 | 53,31 | 53,35 | 54,37 | 53,08 |
| C | 54,14 | 54,31 | 53,3 | 53,65 | 53,36 | 53,53 | 54,02 | 53,15 |
| D | 54,19 | 54,12 | 53,73 | 53,7 | 53,58 | 53,27 | 53,81 | 53,19 |
| Média | 54,14 | 54,09 | 53,56 | 53,58 | 53,32 | 53,44 | 54,00 | 53,13 |

Após o levantamento das medidas foi analisado se os diâmetros de todos os planos das esferas eram maiores que o maior diâmetro da tubulação, condição essencial para garantir que não ocorra uma passagem de líquido entre a esfera e a tubulação. A diferença entre os diâmetros é mostrada graficamente nas a .

Figura 14: Diâmetros da esfera 1 vs o maior diâmetro do tubo

Figura 15: Diâmetros da esfera 2 vs o maior diâmetro do tubo

Figura 16: Diâmetros da esfera 3 vs o maior diâmetro do tubo

Figura 17: Diâmetros da esfera 4 vs o maior diâmetro do tubo

Figura 18: Diâmetros da esfera 5 vs o maior diâmetro do tubo

Figura 19: Diâmetros da esfera 6 vs o maior diâmetro do tubo

Figura 20: Diâmetros da esfera 7 vs o maior diâmetro do tubo

Percebe-se que a esfera 5 deve ser descartada, pois o diâmetro do plano 1 vale 53,01 mm, e o maior diâmetro da tubulação é de 53,19, ou seja, um dos diâmetros é menor que o maior diâmetro da tubulação, garantindo então, sem outros testes, que ocorrerá vazamento.

Para a escolha das melhores esferas, foi utilizada a médias das medições, assim consegue-se saber as porcentagens que cada esfera é maior que a tubulação, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela : Porcentagem que cada esfera é maior que a tubulação

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Esferas | | | | | | | Tubo |
| 1(vazia) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | -- |
| Média | 54,14 | 54,088 | 53,555 | 53,583 | 53,315 | 53,440 | 53,995 | 53,133 |
| Porcentagem | 1,8962 | 1,797 | 0,795 | 0,847 | 0,344 | 0,579 | 1,623 | -- |

Pela tabela acima, pode se concluir que as esferas 1, 2 e 7 se encontraram mais próximas do ideal, pois as diferenças entre as mesmas e o tubo se aproximam de 2%. Conclui-se também que as esferas 5 e 6 são as menos apropriadas para a medição, sendo que a esfera 5 possui um diâmetro menor que o diâmetro do tubo.

5.1.2 Levantamento das curvas características da bomba

Segundo Porto (2006), determina-se curva característica de uma bomba. A representação gráfica ou em forma de tabela das funções que relacionam os diversos parâmetros envolvidos em seu funcionamento.

Para o levantamento das curvas características da bomba utilizada no projeto, foi montada uma bancada composta de:

* 1 rotâmetro
* 1 reservatório
* 1 manômetro
* 1 tacômetro

Todas as conexões foram feitas com mangueiras, que ligavam o reservatório à bomba, a bomba ao rotâmetro e o rotâmetro de volta ao reservatório. As vazões eram medidas e controladas diretamente no rotâmetro. Os manômetros ficaram localizados na entrada e na saída da bomba, para ser obtido o diferencial de pressão, o tacômetro foi utilizado para a obtenção do número de rotações do rotor da bomba, o esquema é representado na Figura 21.

|  |
| --- |
|  |

Figura 21: Esquema montado para o levantamento das curvas características

|  |
| --- |
| IMG_0177 |

Figura 22: Bancada montada para o levantamento da curva característica da bomba

Para os levantamentos dos dados, foram escolhidas 7 vazões diferentes, de acordo com as marcações do rotâmetro, foram selecionadas as marcações 0, 11, 21, 31, 41, 51, 61, onde 0 é a vazão mínima e 61 a vazão máxima da bomba. A Tabela 6 nos fornece a equivalência das marcações do rotâmetro para vazão.

Tabela : Conversão das medidas do Rotâmetro para vazão

|  |  |
| --- | --- |
| Tabela de conversão | |
| Medida no Rotâmetro | Vazão equivalente (l/h) |
| 0,20 | 60,00 |
| 11,00 | 150,00 |
| 17,00 | 200,00 |
| 22,90 | 250,00 |
| 28,80 | 300,00 |
| 34,60 | 350,00 |
| 40,50 | 400,00 |
| 46,00 | 450,00 |
| 51,50 | 500,00 |
| 57,00 | 550,00 |
| 62,50 | 600,00 |

.

Interpolando nesse intervalo, acha-se então as vazões equivalentes às marcações do rotâmetro, detalhadas na Tabela 7

Tabela : Vazões escolhidas em L/h e m³/s

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Leituras na escala do rotâmetro | Vazão equivalente | |
| l/h | m³/s |
| 0 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | 150,00 | 4,17E-05 |
| 21 | 233,90 | 6,50E-05 |
| 31 | 318,97 | 8,86E-05 |
| 41 | 404,55 | 11,24E-05 |
| 51 | 495,45 | 13,76E-05 |
| 61 | 586,36 | 16,29E-05 |

Com a bancada montada e as vazões escolhidas, foram realizadas 6 coletas para cada vazão, onde em cada, foram medidas as pressões na entrada, na saída e as rotações máximas e mínimas do rotor. Conforme mostrado na Tabela 8

Tabela : Dados encontrados nas medições para vazão máxima e mínima

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Medida(Vazão equivalente(m³/s)) | Ensaio | P1(Kgf/cm²) | P2(Kgf/cm²) | Rotação (rpm) | | |
| Máxima | Mínima | Média |
| 0(0) | 1 | 0,14 | 1,91 | 3458,00 | 3456,00 | 3457,00 |
| 0(0) | 2 | 0,14 | 1,92 | 3457,00 | 3456,00 | 3456,50 |
| 0(0) | 3 | 0,14 | 1,92 | 3457,00 | 3456,00 | 3456,50 |
| 0(0) | 4 | 0,14 | 1,93 | 3453,00 | 3446,00 | 3449,50 |
| 0(0) | 5 | 0,14 | 1,93 | 3453,00 | 3446,00 | 3449,50 |
| 0(0) | 6 | 0,14 | 1,94 | 3451,00 | 3450,00 | 3450,50 |
| 0(0) | Média | 0,14 | 1,93 | 3454,83 | 3451,67 | 3453,25 |
| 61(16,29E-05) | 1 | 0,01 | 1,60 | 3431,00 | 3429,00 | 3430,00 |
| 61(16,29E-05) | 2 | 0,01 | 1,60 | 3429,00 | 3425,00 | 3427,00 |
| 61(16,29E-05) | 3 | 0,01 | 1,60 | 3431,00 | 3429,00 | 3430,00 |
| 61(16,29E-05) | 4 | 0,01 | 1,60 | 3431,00 | 3427,00 | 3429,00 |
| 61(16,29E-05) | 5 | 0,01 | 1,60 | 3425,00 | 3424,00 | 3424,50 |
| 61(16,29E-05) | 6 | 0,01 | 1,60 | 3421,00 | 3420,00 | 3420,50 |
| 61(16,29E-05) | Média | 0,01 | 1,60 | 3428,00 | 3425,67 | 3426,83 |

Na Tabela 8 são mostrados os valores para a maior e menor vazão, onde se encontra os pontos extremos das pressões.

Para o levantamento da curva, foram utilizados os valores médios, mostrados na Tabela 9 para todas as vazões.

Tabela : Média de todos os dados coletados em cada vazão

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Vazão m³/s | Ensaio | P1(Kgf/cm²) | P2(Kgf/cm²) | Rotação (rpm) | | |
| Máxima | Mínima | Média |
| 0 | Média | 0,14 | 1,93 | 3454,80 | 3452,00 | 3453,40 |
| 4,17E-05 | Média | 0,13 | 1,86 | 3449,30 | 3444,20 | 3446,80 |
| 6,50E-05 | Média | 0,12 | 1,80 | 3443,50 | 3438,70 | 3441,10 |
| 8,86E-05 | Média | 0,10 | 1,77 | 3439,50 | 3435,30 | 3437,40 |
| 11,24E-05 | Média | 0,07 | 1,70 | 3435,00 | 3430,80 | 3432,90 |
| 13,76E-05 | Média | 0,05 | 1,66 | 3433,70 | 3430,00 | 3431,80 |
| 16,29E-05 | Média | 0,01 | 1,60 | 3428,00 | 3425,70 | 3426,80 |

Com todos os dados levantados, foi calculada a altura de elevação H(m) fornecida pela bomba para cada vazão por meio da equação 6(FOX,MCDONALD;PRITCHARD, 2006):

Onde

- Variação de pressão em Pascal

- Massa específica da água equivalente a 998,2 Kg/m³

– Gravidade equivalente a 9,81 m/s²

A variação de pressão é mostrada na Tabela 10.

Tabela : Variação das pressões para cada vazão

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Vazão (m³/s) | P1 | P2 | ∆P(Kgf/cm²) | ∆P(KPa) |
| 0 | 0,14 | 1,93 | 1,79 | 175,33 |
| 4,17E-05 | 0,13 | 1,86 | 1,73 | 170,04 |
| 6,50E-05 | 0,12 | 1,80 | 1,69 | 165,24 |
| 8,86E-05 | 0,10 | 1,77 | 1,67 | 163,51 |
| 11,24E-05 | 0,07 | 1,70 | 1,63 | 159,72 |
| 13,76E-05 | 0,05 | 1,66 | 1,62 | 158,54 |
| 16,29E-05 | 0,01 | 1,60 | 1,59 | 156,36 |

Obtemos então a curva que relaciona a altura de elevação e as vazões, conforme a Figura 23.

Figura 23: Altura de elevação (H(m))x Vazão (Q(m³/s)).

Outra curva característica da bomba importante para o projeto é a altura líquida positiva de sucção que vem do inglês *Net Positive Suction Head* (*NPSH*). Temos no sistema o NPSH disponível (*NPSHd*) e o NPSH requerido (*NPSHr*).

O *NPSHd* é uma característica da instalação, definida como a energia que o líquido possui em um ponto imediatamente antes do flange de sucção da bomba (PORTO, 2006). O *NPSHd* é calculado mais para frente, pois necessita-se de todas as características do sistema.

O *NPSHr* é uma característica da bomba que representa a energia requerida pelo líquido para chegar, a partir do flange de sucção e vencendo as perdas de carga dentro da bomba, ao ponto onde ganhará energia e será recalcado (PORTO, 2006).

Um *NPSHd* maior que o *NPSHr* é essencial para uma boa performance da bomba, e principalmente garante que o sistema seja livre de cavitação.

Segundo o manual técnico da SCHNEIDER (2006) os NPSH tem que satisfazer a seguinte condição:

Segundo Macintyre (1987), o *NPSHr* pode ser fornecido segundo a seguinte equação:

Onde:

*NPSHr* – é dado em metros

*N* – é a rotação do rotor em RPM

*Q* – é a vazão em m³/s

*K* – Coeficiente adimensional, para bombas radiais vale 2,6.

*k* – é o coeficiente de redução da seção de entrada do rotor, varia entre 0,6 e 0,9

Para os cálculos do *NPSHr*, foi adotado um k de 0,6.

São obtidos então os seguintes valores para o *NPSHr*.

Tabela : Valores do *NPSHr* variando com a vazão

| Vazão m³/s | NPSHr |
| --- | --- |
| 0 | 0 |
| 4,17E-05 | 0,003077 |
| 6,50E-05 | 0,005961 |
| 8,86E-05 | 0,009463 |
| 11,24E-05 | 0,013464 |
| 13,76E-05 | 0,01823 |
| 16,29E-05 | 0,023369 |

Com esses valores é construída a Figura 24

Figura 24: *NPSHr(*m) x Vazão (Q(m³/s))

Do teste da bomba, além de serem obtidas curvas que serão importantes nas próximas etapas do processo, também se consegue dados importantes para o dimensionamento da turbina, da Tabela 9 tem-se que a faixa de pressão de trabalho é de 0,01 até 1,94 Kgf/cm² e a faixa de vazão de trabalho é de 0 até 16,29 x 10-5 m³/s.

## 5.2 Definição do modelo do provador a ser utilizado.

Após a definição inicial da tubulação, o levantamento das características das esferas e da bomba, coube então a definição de qual modelo de provador em linha seria utilizado (unidirecional ou bidirecional).

Inicialmente, pensou-se que a construção de um provador em linha unidirecional com retorno manual seria o sistema mais viável, porém, o mesmo foi descartado por ter que sempre retirar a esfera do sistema, tornando a sua operação lenta.

Um esquema do funcionamento desse primeiro sistema foi detalhado na Figura 25

|  |
| --- |
|  |

Figura 25: Protótipo Unidirecional com lançador individual

Descartado esse protótipo, foi pensado então no protótipo ainda unidirecional, porém com retorno automático, conforme mostrado na Figura 26.

|  |
| --- |
|  |

Figura 26: Protótipo Unidirecional com lançador tipo T

Esse protótipo teve que ser descartado por estar se trabalhando com peças padronizadas encontradas no mercado e o espaço entre a parte superior e inferior do provador não foi suficiente para construir uma válvula conforme indicado na

O modelo escolhido como mais viável, foi então o convencional bidirecional, pois além da construção ser mais fácil (a esfera não sai do sistema e retorna pela própria tubulação, não precisando então de uma gaveta intermediária), fornece resultados mais completos (pode se analisar tendências do sistema operando em diferentes direções) e seus testes são realizados de maneira rápida e fácil.

O esquema inicial do sistema a ser montado é representado na Figura 27

|  |
| --- |
|  |

Figura 27: Protótipo Bidirecional com válvulas de reversão individuais

A dificuldade encontrada para esse protótipo foi na obtenção da válvula de 4 vias. Por ser uma válvula muito cara, foi optado por se utilizar 4 válvulas simples de esfera feitas de PV. Essas válvulas foram dispostas em paralelo e ligadas por uma alavanca, onde uma manobra sincroniza as 4 válvulas (Figura 28).

A entrada dessa válvula está ligada à linha que vem do tanque e é enviada para um dos lados do provador, definidos como ramo direito e ramo esquerdo (essas divisões serão explicadas com maior detalhe nas sessões 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3) o fluxo, ao percorrer o provador, sai pelo ramo oposto e retorna à válvula, que envia o líquido de volta para o tanque.

A válvula é posta logo após a bomba e é representada de acordo com a Figura 28.

|  |
| --- |
|  |

Figura 28: Válvula de 4 vias

As válvulas de esferas são postas de modo que quando uma saída esta aberta, a outra encontra-se fechada e o retorno acontece da mesma maneira só que para o ramo contrário, se a saída do ramo direito está aberta, o retorno do ramo direito estará fechado, as posições são representadas na Figura 29.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
|  | |

Figura 29: Croquis da montagem e operação do conjunto de válvulas com 4 vias:

(a) Posição de alimentação do ramo 1 e retorno no ramo 2;

(b) Posição de alimentação do ramo 2 e retorno no ramo 1

(Fonte: Lavezzo (2010))

|  |
| --- |
| DSC03117DSC03116 |

Figura 30: Foto da válvula de 4 vias montada

Para ser o centro de operação, foi projetado um cavalete onde está instalada a válvula de 4 vias, uma válvula gaveta para controle de vazão, a bomba, um computador que indica a vazão do sistema registrada pela turbina, e uma purga para retirada do ar do sistema, conforme mostrado na Figura 31.

|  |
| --- |
| montagem_cavalete3 |

Figura 31: Representação do cavalete

|  |
| --- |
| DSC03120 |

Figura 32: Foto do cavalete montado

Com o cavalete pronto, foi então projetado o sistema do provador, conforme mostra a Figura 33.

|  |
| --- |
|  |

Figura 33: Corpo do provador

O provador foi subdividido em 3 partes:

- Parte de descanso e manutenção

- Parte transiente

- Parte útil do sistema

Nos itens a seguir essas partes serão melhores detalhadas.

|  |
| --- |
| completo |

Figura 34: Sistema completo do provador

5.2.1 Parte de descanso e manutenção

A parte de descanso e manutenção é onde estão ligadas as linhas de saída e retorno da válvula de 4 vias. Elas estão ligadas a um conjunto de reduções que fazem as ligações das conexões de ¾” para a tubulação de 75 mm, onde a esfera permanece até a reversão do fluxo.

Os seus detalhes são mostrados nas Figura 35e Figura 36.

|  |
| --- |
|  |

Figura 35: Vista superior da parte de descanso e manutenção

|  |
| --- |
|  |

Figura 36: Vista lateral direita da parte de descanso e manutenção

Tem-se que nas representações acima, as conexões pretas são as saídas da válvula de 4 vias, e as vermelhas são os respectivos retornos. A válvula de esfera 1 é a válvula por onde a esfera é inserida no sistema, as válvulas de esfera 2 servem para manutenção, o fechamento das mesmas evita que o provador seja esvaziado sempre que for realizar alguma mudança.

Para a instalação do termopar, foi utilizado um colar de tomada, que é uma peça que encaixa na tubulação e possui uma saída para o exterior.

As uniões auxiliam na montagem e desmontagem do sistema, pois criam uma independência entre os ramos e as outras partes.

|  |
| --- |
| DSC03107 |

Figura 37: Foto da parte de descanso e manutenção

Um fator que se deve evitar é a possibilidade de, após uma corrida, a esfera ser empurrada para a região depois das reduções, caso isso aconteça, a esfera permanecerá alojada depois da entrada de água e mesmo com a reversão de fluxo não seria lançada no sistema.

Para evitar tal possibilidade, foi construído um espaçador (Figura 39) visando criar um impedimento que não permita que a esfera ultrapasse as reduções. Seu funcionamento é esquematizado na Figura 38.

|  |
| --- |
|  |

Figura 38: Principio de funcionamento do espaçador

No ramo esquerdo ele permanece preso ao cap, e no ramo direito ele é solto e inserido no sistema logo após a esfera.

|  |
| --- |
| espaçador1espaçador2 |

Figura 39: Espaçador e sua vista interna.

Como o espaçador fica no interior do provador, pode ocorrer de o mesmo atrapalhar o escoamento do líquido de trabalho, para evitar tal problema, foram feitos furos no espaçador, assim, o líquido pode escoar livremente.

É importante ressaltar que o seu diâmetro é intermediário entre o diâmetro da parte de descanso e manutenção e o resto do sistema, impedindo assim que o espaçador transite entre as partes.

5.2.2 Parte transiente do sistema

A parte transiente (Figura 40) é aquela parte que antecede o primeiro sensor, sendo responsável por permitir a aceleração da esfera até a mesma atingir a velocidade do escoamento, sua tubulação já é de 60 mm e seu comprimento em cada ramo é de 1,19 metros.

|  |
| --- |
| transiente |

Figura 40: Parte transiente do sistema

|  |
| --- |
| DSC03145 |

Figura 41: Foto da parte transiente do sistema

5.2.3 Parte útil do sistema

A parte útil do sistema é aquela a qual a medição é realizada e começa a partir dos sensores de posição. A parte útil do sistema é representada na Figura 42

|  |
| --- |
|  |

Figura 42: Parte útil do sistema

A distância entre cada par de sensor é de 3 metros, conforme mostrado na figura acima. Essa distância igual é importante para que os trechos possam ser avaliados e comparados de maneira igual, e por isso as distâncias foram medidas a partir de uma trena a laser.

A utilização de 4 sensores foi optada para poder avaliar tendências envolvidas no processo, como, por exemplo, qual a influência da curva no processo, e as diferenças encontradas quando a esfera percorre o sistema nas 2 direções.

Os sensores de posição utilizados são sensores óticos. Eles enviam um sinal que é captado por um receptor localizado em sua frente. Para conseguir tal feito, foi montado um sistema de centralização que garantiu o alinhamento dos sensores conforme mostrado na Figura 43.

|  |
| --- |
| C:\Users\Marcelo\Desktop\colartomadacompleto2.jpg |

Figura 43: Conjunto completo do sistema de centralização

|  |
| --- |
|  |

Figura 44: **Conjunto detalhado do sistema de centralização**

O sistema de centralização é formado por:

* 2 metades unidas de um colar de tomada, que garante que os dois sensores estarão na mesma direção
* O-ring para a vedação
* Vidro que pressiona o O-ring, e além de vedar, permite que as luzes o atravessem e se encontrem
* Um centralizador que possui um furo de diâmetro igual ao diâmetro do sensor (6 mm) e é responsável por dar um alinhamento exato aos sensores.
* Redutor que pressiona o conjunto todo e ajusta ainda mais o alinhamento do sensor
* Prensa cabo para fixar o sensor
* Sensor

Além da centralização do emissor e receptor de sinal dos sensores, também houve a necessidade de garantir que os sensores 1 e 4, tanto quanto os sensores 2 e 3 também estivessem alinhados.

Para isso, foi utilizado um pedaço de tubo de PVC roscável ligando os pares de sensores, conforme mostrado na Figura 45

|  |
| --- |
| C:\Users\Marcelo\Desktop\Nova Pasta (2)\5-Fotos dos Experimentos\Ball Prover\attachments_05_03_2010\IMG_0012.JPGC:\Users\Marcelo\Desktop\Nova Pasta (2)\5-Fotos dos Experimentos\Ball Prover\attachments_05_03_2010\IMG_0013.JPG |

Figura 45: Alinhador dos colares de tomada

Após o alinhamento, cortou-se o tubo, o retirou do colar de tomada e então foi instalado o sistema de centralização de cada sensor.

Um importante fator a ser conhecido deste trecho, é o seu volume (*Vu*). Esse volume denominado de útil, é o volume que será utilizado para a calibração. Devido ao tamanho da tubulação, o volume pode ser aproximado pela equação

Sendo:

*r*- o raio interno da tubulação de 60 mm, que segundo o catalogo Tigre (2008) vale 0,02655 m; e

*Lu* - o comprimento total dos ramos do provador mais o comprimento da curva.

Segundo a equação 10, o volume útilserá de 0,0199 m³

## 5.3 Cálculos de pré-montagem

Após o desenho de todo o projeto, foram realizados cálculos para saber mais detalhes sobre o sistema. Os cálculos são para saber se o sistema possui energia suficiente para realizar a operação com a eficiência necessária e o *NPSHd.*

5.3.1 Cálculo da energia do sistema

Esse cálculo foi realizado para garantir que a energia fornecida no sistema é maior que a energia perdida por meio das perdas de carga e foi baseada em cima das 6 vazões de referência tomadas no momento que foi levantada a curva da bomba.

Inicialmente, foram listadas no laboratório todas as conexões e divididas em 4 sistemas:

* Sistema Tanque
* Sistema Bomba
* Sistema Cavalete
* Sistema de provação

As divisões acima são feitas para o cálculo da perda de carga. Como não se tem informações sobre a turbina, foi considerado que a mesma possui uma perda de carga igual ao cavalete, que, como será visto mais a frente, possui a maior perda de carga do sistema, e então incorporado na perda de carga do tanque. Na conclusão dos cálculos será explicado o motivo que torna isso possível.

Após listada todas as conexões, foram calculadas as perdas de carga em cada uma delas utilizando a equação 11 (FOX,MCDONALD;PRITCHARD, 2006):

Onde :

*h* é a perda de carga em m²/s²

*D* é o diâmetro da tubulação ou conexão em metros

*Le* é o comprimento equivalente das conexões, é fornecido em metros. Para as conexões, foram utilizados os comprimentos equivalentes retirados dos manuais da Tigre (2008), no caso das válvulas de esfera, foi utilizado uma tabela do livro do Fox na qual diz que para estas Le/D = 3 e para algumas conexões não tabeladas como os nipels, foram estimados valores.

*V* é a velocidade do escoamento, elas foram calculadas para cada diâmetro encontrado no sistema e para cada vazão, conforme mostra a Tabela 12

Tabela : Velocidades para em cada tubulação para todas vazões

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Vazão(m³/s) | Velcidade nas tubulações | | | | Velocidade na mangueira |
|
| 1/2"(17,4 mm) | 3/4"(22,1 mm) | 2"(53,1 mm) | 2 1/2"(65,3 mm) | 3/4"(20,2 mm) |
| 4,17E-05 | 1,75E-01 | 1,09E-01 | 1,88E-02 | 1,24E-02 | 1,30E-01 |
| 6,50E-05 | 2,73E-01 | 1,69E-01 | 2,93E-02 | 1,94E-02 | 2,03E-01 |
| 8,86E-05 | 3,73E-01 | 2,31E-01 | 4,00E-02 | 2,65E-02 | 2,76E-01 |
| 1,12E-04 | 4,73E-01 | 2,93E-01 | 5,07E-02 | 3,36E-02 | 3,51E-01 |
| 1,38E-04 | 5,79E-01 | 3,59E-01 | 6,21E-02 | 4,11E-02 | 4,29E-01 |
| 1,63E-04 | 6,85E-01 | 4,25E-01 | 7,36E-02 | 4,86E-02 | 5,08E-01 |

As velocidades acima são fornecidas em m/s, e as diferenças entre as velocidades da mangueira de ¾” e a tubulação de ¾”, é que na tabela está sendo referenciado o diâmetro nominal, mas o diâmetro interno é diferente e é representado entre parênteses.

*f* é o fator de atrito, ele pode ser calculado por meio de iterações realizadas na equação 12. (FOX,MCDONALD;PRITCHARD, 2006)

Porém foi utilizada a equação 13, essa equação foi desenvolvida por Sousa-Cunha-Marques (1999) e possui um erro de 0,123% (CAMARGO, 2001), evitando assim o uso de iterações.

Onde:

*e* é a rugosidade absoluta, dada na Tabela 13

Tabela : Rugosidade para todos os materiais

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Rugosidade Absoluta (e) | | |
| PVC (mm) | Metal | Borracha |
| 0,06 | 0,26 | 0,12 |

*D* é o diâmetro da tubulação

*Re* é o número de Reynolds

Para o cálculo do Número de Reynolds foi utilizada a equação 14. (FOX,MCDONALD;PRITCHARD, 2006)

Onde:

*ρ* é a massa especifica do fluido em kg/m³

*D* é o diâmetro da tubulação

*V* é a velocidade do escoamento

*µ* é a viscosidade da água em Kg/m\*s

Tem-se os seguintes dados da água:

Tabela : Dados da água

|  |  |
| --- | --- |
| Dados da água | |
| *ρ* (Kg/m³) | *µ* (Kg/m\*s) |
| 998,2 | 0,001002 |

Foram então encontrados os seguintes números de Reynolds:

Tabela : Número de Reynolds para cada vazão

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Vazão(m³/s) | Reynolds (ρxVxD/µ) | | | | |
| Tubulações | | | | Mangueira |
| 1/2" | 3/4" | 2" | 2 1/2" | 3/4" |
| 4,17E-05 | 3,04E+03 | 2,39E+03 | 9,95E+02 | 8,09E+02 | 2,62E+03 |
| 6,50E-05 | 4,74E+03 | 3,73E+03 | 1,55E+03 | 1,26E+03 | 4,08E+03 |
| 8,86E-05 | 6,46E+03 | 5,09E+03 | 2,12E+03 | 1,72E+03 | 5,56E+03 |
| 1,12E-04 | 8,19E+03 | 6,45E+03 | 2,68E+03 | 2,18E+03 | 7,06E+03 |
| 1,38E-04 | 1,00E+04 | 7,90E+03 | 3,29E+03 | 2,67E+03 | 8,64E+03 |
| 1,63E-04 | 1,19E+04 | 9,35E+03 | 3,89E+03 | 3,16E+03 | 1,02E+04 |

Obtendo então os respectivos resultados para o fator de atrito:

Tabela : Fator de atrito para cada diâmetro de cada material

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | |  | Rugosidade Relativa PVC | | | | Rugosidade Relativa do metal | Rugosidade Releativa da borracha | |  | | Diâmetro | 17,4 | 22,1 | 53,1 | 65,3 | 22,1 | 20,2 | | e/D | 0,0034 | 0,0027 | 0,0011 | 0,0009 | 0,0118 | 0,0059 | | f | 0,0463 | 0,0488 | 0,0628 | 0,0673 | 0,0556 | 0,0502 | | 0,0416 | 0,0433 | 0,0543 | 0,0579 | 0,0511 | 0,0453 | | 0,0388 | 0,0401 | 0,0493 | 0,0524 | 0,0487 | 0,0426 | | 0,0371 | 0,0380 | 0,0459 | 0,0486 | 0,0471 | 0,0409 | | 0,0357 | 0,0364 | 0,0433 | 0,0458 | 0,0460 | 0,0396 | | 0,0347 | 0,0352 | 0,0413 | 0,0436 | 0,0452 | 0,0386 | |

Com todos os fatores de atrito calculados, as velocidades, os comprimentos e os diâmetros conhecidos, foi obtida então a seguinte tabela de perda de carga.

Tabela : Estimativas das perdas de carga em função da vazão aplicada às conexões do sistema de bombeamento

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | Perda de carga | | | | | |
| Sistema | ITENS | L | Qtd | 4,17 E-05 | 6,50 E-05 | 8,86 E-05 | 1,12 E-04 | 1,38 E-04 | 1,63 E-04 |
| Tanque | joelho 3/4 metal | M | 2 | 0,0104 | 0,0232 | 0,0411 | 0,0641 | 0,0938 | 0,1291 |
| Tubo 3/4 31 cm metal | M | 1 | 0,0046 | 0,0103 | 0,0182 | 0,0284 | 0,0415 | 0,0572 |
| Válvula de esfera de metal ¾ | M | 2 | 0,0010 | 0,0022 | 0,0039 | 0,0061 | 0,0089 | 0,0122 |
| Tubo 3/4 12 cm metal | M | 1 | 0,0018 | 0,0040 | 0,0071 | 0,0110 | 0,0161 | 0,0221 |
| Tê de 3/4 metal | M | 1 | 0,0153 | 0,0342 | 0,0605 | 0,0943 | 0,1380 | 0,1900 |
| Nipel 3/4 metal | M | 1 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0026 | 0,0041 | 0,0060 | 0,0083 |
| Mangueira | M | 1 | 0,0128 | 0,2628 | 0,4418 | 0,6683 | 0,9613 | 1,3038 |
| Bomba | joelho 3/4 metal | M | 1 | 0,0104 | 0,0232 | 0,0411 | 0,0641 | 0,0938 | 0,1291 |
| Nipel 3/4 metal | M | 1 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0026 | 0,0041 | 0,0060 | 0,0083 |
| Nipel 3/4 | J | 2 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0026 | 0,0041 | 0,0060 | 0,0083 |
| joelho ¾ | J | 1 | 0,0104 | 0,0232 | 0,0411 | 0,0641 | 0,0938 | 0,1291 |
| Tê de 3/4 metal | J | 1 | 0,0119 | 0,0265 | 0,0470 | 0,0732 | 0,1072 | 0,1475 |
| Mangueira | J | 1 | 0,0028 | 0,0582 | 0,0978 | 0,1479 | 0,2128 | 0,2886 |
| Cavalete | Válvula de Gaveta 3/4 | J | 1 | 0,0015 | 0,0033 | 0,0059 | 0,0092 | 0,0134 | 0,0184 |
| Nipel 3/4 PVC | J | 3 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0022 | 0,0033 | 0,0048 | 0,0065 |
| joelho 3/4 PVC | J | 2 | 0,0156 | 0,0337 | 0,0581 | 0,0886 | 0,1273 | 0,1724 |
| Tê de 3/4 PVC | J | 2 | 0,0312 | 0,0674 | 0,1163 | 0,1772 | 0,2546 | 0,3449 |
| Redução 3/4 x 1/2" PVC | J | 2 | 0,0031 | 0,0067 | 0,0116 | 0,0177 | 0,0255 | 0,0345 |
| Nipel 1/2 PVC | J | 8 | 0,0017 | 0,0037 | 0,0064 | 0,0098 | 0,0141 | 0,0192 |
| Tê de 1/2 PVC | J | 2 | 0,0940 | 0,2050 | 0,3564 | 0,5470 | 0,7907 | 1,0764 |
| joelho 1/2 PVC | J | 2 | 0,0449 | 0,0981 | 0,1705 | 0,2616 | 0,3781 | 0,5148 |
| Válvula de esfera de PVC ½ | J | 2 | 0,0021 | 0,0047 | 0,0081 | 0,0124 | 0,0179 | 0,0244 |
| Joelho 1/2 x 3/4 PVC | J | 2 | 0,0077 | 0,0166 | 0,0286 | 0,0436 | 0,0626 | 0,0848 |
| Mangueira Lado direiro | J | 1 | 0,0052 | 0,1077 | 0,1810 | 0,2738 | 0,3939 | 0,5342 |
| Mangueira Lado esquerdo | J | 1 | 0,0043 | 0,2628 | 0,4418 | 0,6683 | 0,9613 | 1,3038 |
| Mangueira retorno para o tanque | J | 1 | 0,0159 | 0,3266 | 0,5490 | 0,8305 | 1,1947 | 1,6202 |

Tabela 17: continuação

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | Perda de carga | | | | | |
| Sistema | ITENS | L | Qtd | 4,17 E-05 | 6,50 E-05 | 8,86 E-05 | 1,12 E-04 | 1,38 E-04 | 1,63 E-04 |
| Provador | Cruzeta 3/4 PVC | J | 2 | 0,0131 | 0,0284 | 0,0489 | 0,0746 | 0,1072 | 0,1451 |
| Nipel 3/4 PVC | J | 2 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0022 | 0,0033 | 0,0048 | 0,0065 |
| Redução 3/4 x 1/2" PVC | J | 1 | 0,0031 | 0,0067 | 0,0116 | 0,0177 | 0,0255 | 0,0345 |
| Redução 1" x 1/2" | J | 1 | 0,0031 | 0,0067 | 0,0116 | 0,0177 | 0,0255 | 0,0345 |
| Redução 2 1/2" x 1" | J | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0002 |
| Tê 2 1/2" | J | 2 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0022 | 0,0033 | 0,0046 | 0,0062 |
| Tubo D 75 mm C 8,5 cm | J | 1 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 |
| Válvula de esfera de 2 1/2" | J | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 |
| Tubo D 75mm C 18,2 cm | J | 1 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Adaptador S - R 2 1/2" x 75 mm | J | 4 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,0005 | 0,0007 |
| União 75 mm PVC | J | 2 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0003 | 0,0004 | 0,0006 | 0,0008 |
| Redução 75 x 60 | J | 2 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0003 |
| Tubo D 60mm 5,4332 | J | 2 | 0,0011 | 0,0024 | 0,0040 | 0,0060 | 0,0086 | 0,0114 |
| Curva 60 mm | J | 2 | 0,0003 | 0,0006 | 0,0010 | 0,0014 | 0,0020 | 0,0027 |
| Tubo D 60mm 0,00625 | J | 1 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Tubo D 75mm C 18,5 mm | J | 1 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Tubo D 75mm C 15,5 mm | J | 1 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Redução 1" x 3/4" | J | 1 | 0,0031 | 0,0067 | 0,0116 | 0,0177 | 0,0255 | 0,0345 |
| Mangueira Lado direiro | J | 1 | 0,0037 | 0,0760 | 0,1278 | 0,1934 | 0,2781 | 0,3772 |
| Mangueira Lado esquerdo | J | 1 | 0,0045 | 0,0929 | 0,1561 | 0,2362 | 0,3397 | 0,4607 |

Onde:

M é a montante da bomba

J é a jusante da bomba

Somando as perdas de carga em cada trecho, obtém-se:

Tabela : Somatório das perdas de carga a montante e a jusante da bomba

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Perda de carga Montante | | | | | | |
| Vazões | 4,17E-05 | 6,50E-05 | 8,86E-05 | 1,12E-04 | 1,38E-04 | 1,63E-04 |
| Tanque | 0,4931 | 1,6987 | 2,9127 | 4,4440 | 6,4110 | 8,7142 |
| Bomba | 0,0111 | 0,0247 | 0,0438 | 0,0682 | 0,0998 | 0,1374 |
| Somatório | 0,5042 | 1,7234 | 2,9565 | 4,5122 | 6,5108 | 8,8516 |
| Perda de carga Jusantes | | | | | | |
| Bomba | 0,0264 | 0,1109 | 0,1912 | 0,2935 | 0,4259 | 0,5818 |
| Cavalete | 0,4352 | 1,3351 | 2,2924 | 3,4977 | 5,0426 | 6,8503 |
| Provador | 0,0460 | 0,1822 | 0,3098 | 0,4700 | 0,6750 | 0,9142 |
| Somatório | 0,5077 | 1,6283 | 2,7934 | 4,2611 | 6,1435 | 8,3463 |

Para calcular o ganho na bomba, foi utilizada a equação 15 (FOX,MCDONALD;PRITCHARD, 2006)

As variações das pressões (*∆P*) para cada vazão foram retiradas do levantamento da curva da bomba, e estão mostradas na tabela abaixo.

Tabela : Variações de pressões

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Vazão(m³/s) | P1(Kgf/cm²) | P2(Kgf/cm²) | ∆P(N/m²) |
| 4,167E-05 | 1,261E-01 | 1,860E+00 | 1,700E+05 |
| 6,497E-05 | 1,150E-01 | 1,800E+00 | 1,652E+05 |
| 8,860E-05 | 9,767E-02 | 1,765E+00 | 1,635E+05 |
| 1,124E-04 | 7,467E-02 | 1,703E+00 | 1,597E+05 |
| 1,376E-04 | 4,667E-02 | 1,663E+00 | 1,585E+05 |
| 1,629E-04 | 5,583E-03 | 1,600E+00 | 1,564E+05 |

Logo, a energia fornecida pela bomba para cada vazão é:

Tabela : Energia fornecida pela bomba

|  |  |
| --- | --- |
| Vazão(m³/s) | ∆hbomba (m²/s²) |
| 4,167E-05 | 1,703E+02 |
| 6,497E-05 | 1,655E+02 |
| 8,860E-05 | 1,638E+02 |
| 1,124E-04 | 1,600E+02 |
| 1,376E-04 | 1,588E+02 |
| 1,629E-04 | 1,566E+02 |

Para não ocorrer problemas devido à perda de carga, deve-se obedecer à seguinte condição(FOX,MCDONALD;PRITCHARD, 2006):

Onde:

*Z1* é a altura do nível da água do tanque

*ht* é a perda de carga total do sistema

*Z2* é a altura final do líquido, que será a altura máxima do tanque

Como o tanque mede 1,49 m e considerando que a água está em um nível de 1 m, obtêm-se a Tabela 21

Tabela : Valores correspondentes para cada vazão

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Vazões | 4,17E-05 | 6,50E-05 | 8,86E-05 | 1,12E-04 | 1,38E-04 | 1,63E-04 |
| gz1 | 9,810 | 9,810 | 9,810 | 9,810 | 9,810 | 9,810 |
| ∆hbomba | 170,346 | 165,540 | 163,804 | 160,006 | 158,827 | 156,641 |
| hlt | 0,577 | 2,017 | 3,457 | 5,276 | 7,612 | 10,348 |
| gz2 | 14,617 | 14,617 | 14,617 | 14,617 | 14,617 | 14,617 |

Fazendo os cálculos, tem-se a Tabela 22

Tabela : Energia na saída do sistema para cada vazão

|  |  |
| --- | --- |
| Vazões | Energia na saida (m²/s²) |
| 4,17E-05 | 164,527 |
| 6,50E-05 | 157,381 |
| 8,86E-05 | 153,248 |
| 1,12E-04 | 146,425 |
| 1,38E-04 | 141,366 |
| 1,63E-04 | 134,636 |

Portanto não existe problema devido à perda de carga, conforme mostrado também graficamente para a maior e menor vazão:

Figura 46: Variação da energia por trecho para a vazão mínima

Figura 47: Variação da energia por trecho para a vazão máxima

Conclui-se então que o sistema é satisfatório, pois se tem muito mais energia no final que inicialmente. E por isso, pode-se fazer a aproximação da perda de carga da turbina com a perda de carga do cavalete, já que a mesma não seria responsável por causar uma perda de carga suficientemente grande para afetar o sistema.

5.3.2 Cálculo do *NPSHd*

O cálculo do *NPSHd* nos servirá para dizer se as vazões de trabalho são adequadas para que não ocorra cavitação.

O NPSH disponível foi encontrado por meio da equação 17 (PORTO, 2006):

Onde

*γ=ρxg* é fornecido em Kg/m²xs²

*Pa* é a pressão atmosférica em N/m²

*Pv* é a pressão de vapor da água em N/m²

*Z* é a altura de sucção, neste caso é positiva pois o eixo da bomba encontra-se abaixo do reservatório em metros

é o somatório das perdas de carga à montante da bomba em metros é igual a */g*

Do catálogo da Schneider (2006) tem-se a Tabela 23

Tabela : Pressão atmosférica e de vapor de água

|  |  |
| --- | --- |
| Pa (mca) | 10,33 |
| Pv (mca) | 0,062 |
| ∆P (mca) | 10,268 |
| ∆P (Pa) | 100694,7 |

Logo, são obtidos os NSPH disponíveis.

Tabela : NPSH disponíveis para cada vazão

|  |  |
| --- | --- |
| Vazões | NPSHd |
| 4,17E-05 | 1,12E+01 |
| 6,50E-05 | 1,11E+01 |
| 8,86E-05 | 1,10E+01 |
| 1,12E-04 | 1,08E+01 |
| 1,38E-04 | 1,06E+01 |
| 1,63E-04 | 1,04E+01 |

Figura 48: Curva do NPSHd para as diferentes vazões

Figura 49: Curva do *NPSHd* e *NPSHr*

Inserindo os dados encontrados na equação 4, percebe-se que todos os valores satisfazem a condição e portanto não ocorrerá problemas na operação.

5.3.3 Levantamento quantitativo de possíveis vazamentos

Durante o processo, realizou-se um teste com o objetivo de quantificar possíveis vazamentos entre a esfera e a tubulação na situação de estanqueidade, além de encontrar a pressão mínima que deve ser fornecida à esfera para que a mesma percorra o sistema.

Esse teste está melhor exemplificado em Lavezzo (2010). Neste trabalho será apresentado o método de execução e os resultados do experimento.

O teste consiste na utilização dos seguintes itens.

[1] Polia elevatória

[2] Reservatório elevável

[3] Válvula de esfera

[4] Conexões de PVC

[5] Béquer

|  |
| --- |
|  |

Figura 50: Esquema de funcionamento do teste de estanqueidade

(Fonte: Lavezzo (2010))

|  |
| --- |
| DSC02390 |

Figura 51: Foto da bancada montada

À medida na qual o reservatório é elevado, a pressão de coluna d’água aumenta sobre a esfera que esta alojada dentro da curva. Todos os vazamentos são quantificados dentro do Becker e depois pesados para saber-se a quantidade exata.

A conclusão importante para o projeto, é que a esfera 2, apontada como a melhor das cheias na análise dimensional, é a que promoveu menores vazamentos. A esfera 1 (vazia), apesar de ser a melhor na análise dimensional, foi a que obteve piores resultados, sendo que seu vazamento foi em torno de 60% maior que o vazamento da esfera 2.

Esses resultados mostraram que a esfera 2 é a mais apropriada para testes, e a sua pressão para início de movimento é de 14,27 KPa

## 5.4 Montagem da turbina

A turbina utilizada para comparação foi o modelo TVT-L do fabricante Tecnofluid, diâmetro ¾” e com as características descritas na Tabela 25.

Tabela : Características operacionais do medidor tipo turbina modelo TVT-L da Tecnofluid.

|  |  |
| --- | --- |
| Vazão máxima | 6,8 m³/h |
| Vazão mínima | 0,67 m³/h |
| Temperatura máxima de operação | 120°C |
| Pressão máxima de operação | 20 kgf/cm² |
| Viscosidade máxima | 60 cSt |
| Fator K | 500,39 |
| Linearidade para líquidos | ± 0,5 para vazões de 10% a 100% do range com viscosidade menor que 5 cSt |
| Repetibilidade para líquidos | ± 0,05% da leitura |

Segundo o fabricante, deve-se ter um trecho reto de tubulação de 10 vezes o diâmetro nominal antes da turbina e 5 vezes o diâmetro nominal depois da turbina, para tanto, foi construída uma base para fixar a turbina que fornecida 2 vezes a maior distância necessária, ou seja, como o diâmetro nominal é de ¾”, que equivale uma tubulação de 25 mm, foi fornecido um espaçamento de 500 mm, conforme mostrado na Figura 52.

|  |
| --- |
|  |

Figura 52: Suporte construído para a turbina

|  |
| --- |
|  |

Figura 53: Foto do conjunto construído

5.4.1 Analise dos Pulsos emitidos pela turbina

Segundo a norma ISO 7278-2 (1988), a equação que determina o fator k mínimo que deve ter uma turbina para que ela alcance os 10000 pulsos é

Como a incerteza para atingir o objetivo é de 0,01% e o volume útil já calculado é de 0,0199 m³, o fator k seria igual a 502512,562 pulsos/m³, porém, como já detalhado, a turbina possui um fator k de 500,39 pulsos/m³, ou seja aproximadamente 1000 vezes menor do que deveria ser, mostrando então a importância da interpolação dos pulsos.

Para análise dos pulsos emitidos pela turbina, foi necessária a interpolação dos mesmos, já que não foi possível alcançar a quantidade de pulsos exigidos por norma.

O método de interpolação dos pulsos utilizados foi uma aproximação realizada com o auxílio da empresa responsável pela instalação da parte de instrumentação do sistema.

Foi criado um sistema capaz de captar com uma maior precisão o momento do pulso em que a esfera passa por um sensor. Isso é possível com a ajuda de um *clock* que possui uma freqüência muito maior que a freqüência de emissão de pulsos pela turbina.

Com a ajuda deste *clock*, tem-se como estimar em que porcentagem do tempo entre pulsos estava quando a esfera tocou o primeiro sensor, como mostrado na Figura 54

|  |
| --- |
|  |

Figura 54: Método de interpolação de pulsos criado

(Fonte : Lavezzo (2010))

Número estimado de pulsos = (75% + 100% + 100% + 100% + 100% + 50%) / 200% = 2, 625 pulsos

Os 200%, mostrado no denominador, corresponde à representação de um pulso inteiro. Neste algoritmo, considera-se que os pulsos possuem o mesmo tamanho.

O sistema, além de fornecer os pulsos interpolados, também fornecia os pulsos em seu estado bruto e os tempos separadamente, dando condições de realizar uma interpolação segundo o método de 2 tempos.

## 5.5 realizando a medição

Neste tópico, serão mostradas as etapas básicas realizadas para a obtenção dos resultados e uma conclusão dos mesmos, porém, para ver uma análise com detalhes deve-se levar em consideração o trabalho Lavezzo(2010).

Todas as etapas de operação detalhadas são encontradas no apêndice anexo, onde se encontra um manual de operação do provador com um passo a passo detalhado.

Para se realizar a medição, coloca-se primeiramente a esfera no ramo direito e depois o espaçador. Liga-se o sistema com a válvula de 4 vias circulando a água no sentido a empurrar a esfera contra o espaçador, para a mesma não entrar no sistema.

Esta operação tem como objetivo de estabilizar a temperatura e a pressão antes de ser realizada a primeira medição. Com a temperatura e a pressão estabilizadas, é acionada então a alavanca da válvula e a esfera é lançada para dentro do sistema, percorrendo os sensores 1,2,3,4. Após a passagem pelo sensor 4, é aguardado a esfera atingir a tubulação de 75mm e então é acionada novamente a alavanca, fazendo a esfera retornar pelo sentindo contrário.

É medido o número dos pulsos emitidos e o tempo do percurso para todos os sub-trechos (1-2,2-3,3-4,4-3,3-2 e 2-1) e para o sistema todo (1-4 e 4-1), dessa maneira, pode-se analisar o sistema em todos os trechos e detectar tendências e a interferência da curva no sistema.

|  |
| --- |
|  |

Figura 55: Sub-trechos da parte útil do sistema

Para todos os trechos foram realizadas 12 medições em 3 vazões diferentes, que foram a máxima (3,30 x 10-4 m³/s), intermediária (2,28 x 10-4 m³/s) e mínima (1,34 x 10-4 m³/s). Para cada vazão e para cada trecho foi obtido uma tabela fornecendo todos os dados necessários para a realização da calibração, como exemplo está a Tabela 26

Como a vazão do sistema é muito pequena, mesmo com variações na mesma, a pressão se manteve estimadamente a 0,5 kgf/cm².

Após a aquisição de todos os dados (8 trechos e 3 vazões resultam em 24 tabelas) foi realizada uma análise que resultou na Figura 56, onde encontra-se a dispersão dos resultados obtidos da turbina quando comparados com o vazão fornecida pelo provador.

|  |
| --- |
|  |

Figura 56: Dispersão dos resultados entre a turbina e o provador

(Fonte: Lavezzo (2010))

Para a menor vazão, a comparação dos resultados do provador com a turbina se torna mais duvidosa. Isso ocorre devido ao fato da vazão se torna tão pequena, que faz com que a velocidade da esfera diminua a ponto de se aproxime cada vez mais da velocidade mínima necessária para colocar a esfera em movimento. O que pode levar a esfera a se movimentar de maneira não contínua dentro da tubulação. (LAVEZZO 2010).

Da vazão mínima, concluiu-se então que nem os resultados apresentados pelo provador, e os dados apresentados pela turbina são indicadores confiáveis de vazão, no caso da turbina pelo fato de esta vazão ser menor que a vazão mínima de operação indicada pelo fabricante.

Sobre as vazões intermediária e máxima, segundo Lavezzo (2010), chegou-se a conclusão que quando comparado a calibração com a turbina na vazão máxima, os erros encontrados são em torno de 0,27% e 0,79%, e para a vazão intermediária, a variação gira em torno de 0,003% e 0,36%. O melhor resultado na vazão intermediária ocorre devido ao fato de que em tais vazões, existe uma maior quantidade de pulsos emitidos, diminuindo então as incertezas.

Concluiu-se também, que os resultados obtidos nos sub-trechos 2-3 e 3-2, foram os que mais tenderam aos resultados obtidos ao trecho completo (1-4 e 4-1), tendo então que a curva não tem influencia no sistema.



Tabela : Dados coletados no sentido Anti-Horário no sub-trecho 2-3

# COMENTÁRIOS FINAIS

Pode-se concluir que o projeto foi realizado com sucesso, tanto na parte da construção como eu seu funcionamento.

Na parte da construção, obteve-se um provador em linha bidirecional que respeita as premissas básicas exigidas pela série da norma ISO 7278, como, por exemplo, o provador ser isento de vazamentos, não ter ar no sistema, a esfera se de material elastômero e entrar com interferência, após a medição a esfera repousar em uma tubulação de maior diâmetro entre outras.

A parte que não foi baseada na norma, foi a interpolação dos pulsos, porém, a maneira encontrada é considerada mais eficaz que as interpolações sugeridas.

Na parte dos resultados conclui-se que também foi bem sucedido, já que, de acordo com Lavezzo (2010), as incertezas encontradas no processo, estão dentro dos valores esperados.

Na Figura 57 e na Tabela 27, encontram-se todas as premissas do projeto reunidas.

É sugerido para pesquisas futuras a análise da influência da pressão nos resultados, além da realização dos testes com as demais esferas.

|  |
| --- |
|  |

Figura 57: Croqui detalhado do provador

|  |  |
| --- | --- |
| N° | Item |
| 1 | União roscável 2. 1/2" |
| 2 | Tubo soldável 60 mm |
| 3 | Curva soldável 90° 60 mm |
| 4 | Redução Soldável 75 x 60 mm |
| 5 | Adaptador Soldável curto 2. 1/2" x 75 mm |
| 6 | Tubo roscável 75 mm |
| 7 | Válvula de esfera soldável 75 mm |
| 8 | Tê roscável 2. 1/2" |
| 9 | Redução roscável 2. 1/2" x 2" |
| 10 | Redução roscável 2" x 1" |
| 11 | Redução roscável 1" x 1/2" |
| 12 | Adaptador Soldável curto 1/2" x 20 mm |

Legendas

Tabela : Premissas de projeto

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **PREMISSAS DE PROJETO** | | | | | |
| **Elementos Geométricos** | **Fórmula** | **Simbolo** |  | **Dimensão** | **Referencia** |
| **Dimensões básicas** | | | | | |
| Diâmetro interno do tubo 60 mm |  | Di6 | 0,0531 | M | Catalogo Tigre |
| Diâmetro interno do tubo 75 mm |  | Di7 | 0,0653 | M | Catalogo Tigre |
| Diâmetro das mangueiras de alimentação |  | Dalimtb | 0,0202 | M | Catalgo Gates |
| Diâmetro do Tanque |  | DT | 0,98 | M | - |
| Altura do Tanque |  | HT | 1,49 | M | - |
| Altura do Tanque até o chão |  | Htchão | 1,69 | M | - |
| Raio de curvatura da curva do provador |  | R | 0,1358 | M | Catalogo Tigre |
| Comprimento da parte de manutenção do ramo esquerdo |  | L1 | 1,18 | M | - |
| Comprimento da parte transiente do ramo |  | L2=L7 | 1,19 | M | - |
| Comprimento entre os trechos (1-2) e (3-4) |  | L3=L6 | 3 | M | - |
| Comprimento dos sensores 2 e 3 até o inicio da curva |  | L4=L5 | 1,2432 | M | - |
| Comprimento da parte de manutenção do ramo direito |  | L8 | 1,143 | M | - |
| Comprimento da mangueira de |  | Lalimtb | 5,15 | M | - |
| Alimentação no trecho Tanque - Bomba |
| Comprimento da mangueira alimentação no trecho Bomba - Cavalete |  | Lalimbc | 1,14 | M | - |
| Comprimento da mangueira de alimentação no trecho Cavalete - Prover lado Direito |  | Lalimcpd | 2,11 | M | - |

Tabela 27: Continuação

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **PREMISSAS DE PROJETO** | | | | | |
| **Elementos Geométricos** | **Fórmula** | **Simbolo** |  | **Dimensão** | **Referencia** |
| **Dimensões básicas** | | | | | |
| Comprimento da mangueira de alimentação no trecho Cavalete - Prover lado Esquerdo |  | Lalimcpe | 1,745 | M |  |
| Comprimento da mangueira de alimentação no trecho Prover - cavalete Direiro |  | Lretpcd | 1,49 | M |  |
| Comprimento da mangueira de alimentação no trecho Prover - Cavalete Esquerdo |  | Lretpce | 1,82 | M |  |
| Comprimento da mangueira de alimentação no trecho Cavalete -Tanque |  | Lretct | 6,4 | M |  |
| Comprimento total de alimentação |  | Lalim | 19,855 | M |  |
| **Cálulos Geométricos** | | | | |  |
| Comprimento da curva | LC | LC | 0,5137 | M |  |
| Comprimento total do ramo esquerdo | Lte = L1+L2+L3+L4+1/2LC | Lte | 6,87 | M |  |
| Comprimento total do ramo direito | Ltd = L5+L6+L7+L8+1/2LC | Ltd | 6,833 | M |  |
| Comprimento util de cada ramo | Lu = L3+L4+1/2LC | Lu | 4,5 | M |  |
| Area seção reta do tubo 60 mm | Asr6 = Pi\*Di6^2/4 | Asr6 | 0,0022 | m² |  |
| Area seção reta do tubo 75 mm | Asr7 = Pi\*Di7^2/4 | Asr7 | 0,0033 | m² |  |
| Area seção reta da alimentação | Asralim = Pi\*Dalim^2/4 | Asralim | 0,0003 | m² |  |

Tabela 27: Continuação

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **PREMISSAS DE PROJETO** | | | | | |
| **Elementos Geométricos** | **Fórmula** | **Simbolo** |  | **Dimensão** | **Referencia** |
| **Cálulos Geométricos** | | | | |  |
| Area seção reta do tanque | Asrt = Pi\*DT^2/4 | Asrt | 0,7543 | m² |  |
| Volume de liquido circulante | Vlc =((Lte-L1)+(Ltd-L8)) \*Asr6 +(L1+L8)\*Asr7 +(Lalimt)\*Asralim | Vlc | 0,0393 | m³ |  |
| Volume util do sistema | Vu = 2\*Lu\*Asr6 | Vu | 0,0199 | m³ |  |
| **Dados requeridos** | | | | |  |
| Grau de incerteza desejado para o medidor |  | In | 0,01 | ±% | ISO 7278-2 |
| Incerteza estimada da resposta dos sensores |  | Re | 1 | ±mm | ISO 7278-2 |
| Vazão máxima |  | Vz | 0,6 | m³/h | - |
| Temperatura |  | T | 300 | K | - |
| Viscosidade |  | μ | 0,000855 | N\*s/m² | - |
| Volume específico |  | ٧ | 0,001003 | m³/Kg | - |
| **Cálculos básicos** | | | | |  |
| Fator K requerido pelo medidor para se obter a incerteza mínima sem a necessidade de interpolação dos pulsos | K= 100/Vu\*In | K | 501739,82 | pulsos/m³ | ISO 7278-2 |
| Grau de repitibilidade durante a calibração | Gr= 400\*Re/2\*Lu | Gr | 0,0444 | % | ISO 7278-2 |
| Velocidade máxima da esfera | v =Vz/( Asr6\*3600) | v | 0,0753 | m/s | ISO 7278-2 |
| Reynolds | Rey = ρ\*v\*Di/μ | Rey | 87761,246 |  | Incropera |
| Tempo estimado do trajeto | t= 2\*Lu/v | t | 119,58389 | S | - |
| Velocidade máxima na alimentação de 3/4" | Valim=Vz/(Asralim\*3600) | Valim | 0,5200632 | m/s | - |

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, INMENTRO. **Portaria conjunta nº 1**, de 19/06/2000 - DOU 20/06/2000

ANP. **Dados Estatísticos.** Disponível em: <www.anp.gov.br>. Acesso em: 21 abr. 2010.

API, Manual of Petroleum Measurement Standard - Chapter 04 – **Conventional Pipe Prover**. 1988

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J.. Introdução à Mecânica dos FLuidos. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2006.

GLOBO (Ed.). **Indicadores Financeiros.** Disponível em: <http://g1.globo.com/economia-e-negocios/indicadores-financeiros.html>. Acesso em: 21 abr. 2010.

INSTROMET. **Turbine Gas Meter Handbook.** Belgica, 2000.

ISO 7278-1, Liquid hydrocarbons - Dynamic measurement - **Proving systems for volumetric meters - Part 1: General pinciples**.1 ed.1987

ISO 7278-2, Liquid hydrocarbons - Dynamic measurement - **Proving systems for volumetric meters - Part 2: Pipe provers**.1 ed.1988

ISO 7278-3, Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - **Pulse interpolation techniques**. 1 ed. 1998

ISO 7278-4, Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - **Guide operators of pipe provers**. 1 ed. 1999

LAVEZZO, Luís Fernando De Queiroz. ANÁLISE EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS EM MEDIÇÃO DE LÍQUIDOS COM REFERÊNCIA TIPO BALL PROVER. 2010. 134 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espirito Santo, Vitória, 2010

MACINTYRE, Archibalb Joseph. **Bombas e instalacoes de bombeamento**. 2. ed. - Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.

PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Basica. 4. ed. São Carlos: Eesc Usp, 2006.

SCHNEIDER. **NPSH e Cavitação.** Joinville, 2006.

SILVA FILHO, José Alberto Pinheiro da. Principais desafios na medição de vazão de petróleo e gás natural nos campos do pré-sal e de óleos pesados. **Intech**: Fluindo pela medição de vazão, São Paulo, n. , p.32-39, 14 jun. 2010.

TIGRE. **Catalogo técnico predial água fria.** São Paulo, 2008.

**APÊNDICE**

**MANUAL TÉCNICO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE PROVAÇÃO EM LINHA**

OBJETIVO:

Este manual possui como objetivo indicar todos os passos necessários para realizar a correta operação do sistema de provação.

DETALHES DO SISTEMA:

Para uma visualização mais detalhada de cada parte, o sistema completo foi dividido em 4 partes, como mostrado na Figura 58.

|  |
| --- |
|  |

Figura 58: Sistema completo do provador em linha

Onde os subsistemas são:

1 – Tanque

|  |
| --- |
|  |

Figura 59: Sistema Tanque

2 – Turbina

|  |
| --- |
| turbina |

Figura 60: Sistema Turbina

3 – Cavalete

|  |
| --- |
|  |

Figura 61: Sistema Cavalete

4 – Provador

|  |
| --- |
|  |

Figura 62: Vista superior do sistema provador

|  |
| --- |
|  |

Figura 63: Vista lateral direita do sistema provador

Operações:

1. Antes de realizar a primeira operação, deve ser certificado que o sistema está vazio e que todas as válvulas se encontram na posição fechada e todas as purgas se encontrem abertas (OBS: É recomendável verificar a condição da turbina, pois se a mesma já foi utilizada em outras operações, pode ter resíduos em seu interior, devendo, então, ser limpa).
2. Abra totalmente V1, V2 e a purga encontrada na admissão da V3 (Figura 64). Espere que o sistema seja preenchido naturalmente, pois assim ocorre uma melhor desaeração do sistema. A V3 deve se encontrar na posição 1 demonstrada na Figura 64

|  |
| --- |
|  |

Figura 64: Válvula de 4 vias na posição 1

1. Quando começar a sair água pela purga de admissão da válvula, espere que saia todo o ar e então feche a purga. Isso significa que o fluido já preencheu toda a tubulação até aquele ponto.
2. Abra a válvula V5 e V6, e espere todo o volume do provador ser preenchido, isso ocorrerá quando começar a sair água das purgas do ramo direito e esquerdo do provador (na Figura 63 só vê-se a purga do ramo direito, porém, existe uma simétrica no ramo esquerdo)

|  |
| --- |
|  |

Figura 65: Purgas dos ramos

1. Feche as purgas dos ramos e aguarde a saída da água pela purga do retorno da válvula (Figura 64), quando começar a sair apenas água pela purga do retorno da válvula, feche a mesma e ligue a bomba.
2. Com a bomba ligada, abra novamente as purgas da válvula e veja se está saindo apenas água. Caso saia também ar, espere que o mesmo saia todo antes de fechar as purgas.
3. Mude a V3 para a posição 2 (Figura 66) e aguarde. Todo o ar que se encontra nas mangueiras até então vazias, irá sair pela mangueira que leva ao Tanque.

|  |
| --- |
| DSC03117 |

Figura 66: Válvula de 4 vias na posição 2

1. Este é um bom momento para encontrar vazamentos, caso algum seja notado, deve-se então parar o sistema e concertar o vazamento.
2. Com tudo ocorrendo dentro do normal, desligue a bomba e feche a V2 e a V5. Após essas operações a V4 deve ser aberta. Mantenha a V3 na posição 2.
3. Após a saída da água de toda a água desse trecho do sistema, insira a esfera e logo atrás o espaçador e então feche a V4.

|  |
| --- |
| espaçador1 |

Figura 67: Espaçador

1. Abra novamente V2 e V5 e então ligue a bomba. Espera a temperatura se estabilizar.
2. Agora, para realizar a primeira medição, passe a V3 para a posição 1, a água irá empurrar a esfera para o sistema, que irá acionar os sensores de posição realizando a aquisição de dados.
3. Após a esfera passar pelo sensor 4, deve ser esperado um tempo para que a esfera atinja a tubulação maior antes de realizar a manobra de volta. Esse tempo depende da vazão do sistema, e deve ser igual ao tempo de trânsito entre dois sensores.
4. Voltando a válvula para a posição 2, fará com que a esfera retorne para a posição inicial, realizando nova medição.
5. Ao término das medições, realize novamente a operação 9 e então retire do sistema o espaçador e a esfera.
6. Então, por segurança, feche todas as válvulas do sistema.
7. Se o sistema for ficar pouco tempo parado (1 dia no máximo), a esfera não precisa de ser retirada do sistema, mais que isso, não é aconselhado, pois a mesma sofrerá ação da pressão do fluido constantemente e pode deformar.
8. Fique sempre atento a vazamentos, e garanta que todo o ar do sistema tenha saído antes de começar as medições.
9. Caso queira esvaziar o sistema, o ramo esquerdo possui um engate rápido para mangueiras (Figura 68), engate uma mangueira de ¾” e deixe todas as válvulas abertas, com exceção da V1.

|  |
| --- |
|  |

Figura 68: Ligação da mangueira de purga do sistema

1. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro mecânico. [↑](#footnote-ref-1)
2. Graduando do curso de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo . Email: marcelokos@hotmail.com [↑](#footnote-ref-2)
3. Final Undergraduate Project presented to the Mechanical Engineering Departament of the Technology Center of the Federal University of Espírito Santo, as a partial requirement for obtaining the Mechanic Engineer degree. [↑](#footnote-ref-3)
4. Undergraduate of the Mechanical Engineering course of the Technology Center of the Federal University of Espírito Santo. Email: marcelokos@hotmail.com [↑](#footnote-ref-4)
5. [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br), capturado em 21/04/2010 [↑](#footnote-ref-5)
6. <http://g1.globo.com/economia-e-negocios/indicadores-financeiros.html>, capturado em 21/04/2010 [↑](#footnote-ref-6)
7. [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br), capturado em 21/04/2010 [↑](#footnote-ref-7)
8. [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br), capturado em 21/04/2010 [↑](#footnote-ref-8)
9. <http://www.girardind.com/products.cfm?cat=7> capturado em 03/06/2010 [↑](#footnote-ref-9)