



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO



Projeto de um Sistema Emulador de Escoamentos e Vaso de Separação Primária

Plínio Altoé Costa Vieira

Orientador: Prof. Dr. Sc. Francisco das Chagas Mota

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Natal, RN, Setembro de 2009

Projeto de um Sistema Emulador de Padrões de Escoamento e Vaso de Separação Primária

Plínio Altoé Costa Vieira

Dissertação de Mestrado aprovada em 02 de Setembro de 2009 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Francisco das Chagas Mota, D.Sc. (Orientador) DCA/UFRN

Prof^a. Vanja Maria de França Bezerra, D.Sc. (Examinadora Interna)..... DEQ/UFRN

Eng^o Benno Waldemar Assmann, D.Sc. (Examinador Externo).....UN-RNCE/PETROBRÁS

Eng^o Sérgio José Gonçalves e Silva, M.Sc. (Examinador Externo)...UN-RNCE/PETROBRÁS

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Vieira, Plínio Altoé Costa.

Projeto de um sistema emulador de escoamentos e vaso de separação primária / Plínio Altoé Costa Vieira – Natal, RN, 2009.
88 f.

Orientador: Francisco das Chagas Mota.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Emulador (Sistema) – Dissertação. 2. Escoamentos – Dissertação. 3. Picos de pressão – Dissertação. 4. *Plunger lift* – Dissertação. 5. Vaso separador – Dissertação. I. Mota, Francisco das Chagas. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 681.5(043.3)

*Aos meus pais, Garibaldi (in Memoriam) e Myrian.
À minha esposa, Andrezza pela paciência e apoio
durante a realização deste trabalho.
Aos meus irmãos, Indyanara, Felipe e Gustavo.*

Agradecimentos

À Deus pela saúde e inspiração e força de vontade para realizar este trabalho.

Ao Professor Francisco Mota pelo empenho, dedicação e paciência.

Ao amigo Leonardo Campos do Amaral Bezerra pela colaboração e boa vontade.

Aos colegas da UFRN Herick Bulhões, Danielson Xavier, Rodrigo Silva pelo esforço e colaboração durante todo o período de estudos e experiências desse trabalho.

Aos Engenheiro Sérgio José e a Professora Vanja Bezerra pelas críticas e sugestões, além do apoio técnico.

Aos engenheiros Clóvis Costa, Carlos Milfont e Kelyson Resende da empresa ESAI pelo apoio técnico durante a construção e testes na planta.

À Chemtech pela oportunidade concedida. Em especial ao meu gerente Márcio, que foi bastante compreensivo.

A todos os colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela colaboração.

À minha querida família pelo apoio e compreensão.

Resumo

A proposta desse trabalho foi desenvolver uma planta-piloto com o objetivo principal de emular picos de pressão de escoamentos num vaso de separação. Efeito semelhante ao provocado pela produção em forma de golfadas em poços de produção equipados com o método de elevação artificial *plunger lift*. A motivação para o desenvolvimento do mesmo foi a necessidade de se testar, numa planta em escala menor, uma nova técnica desenvolvida para a estimação da vazão de gás em poços produtores equipados com *plunger lift*. Para seu desenvolvimento foram realizados estudos sobre efeitos dos escoamentos multifásicos, funcionamento de métodos de elevação artificial em poços de *plunger lift*, dos elementos de instrumentação industrial, válvulas de controle, dimensionamento de vasos separadores e sistemas de medição. A metodologia utilizada foi a definição dos fluxogramas do processo, seus parâmetros e como seriam gerados os efeitos necessários para o sucesso dos experimentos. Assim, foram definidas as válvulas de controle, o dimensionamento e construção dos vasos e a aquisição dos demais equipamentos utilizados. Um dos vasos funciona como reservatório de ar comprimido que, conectado ao vaso de separação, gera pulsos de gás controlados por uma válvula on/off. Com o sistema emulador pronto, foram realizadas diversas experiências de controle, sendo o controle de pressão com geração de picos e medição de vazão a principal experiência, onde se comprovou a eficiência da utilização da planta no problema que a motivou. Concluiu-se que o sistema é capaz de gerar efeitos de escoamentos com picos de pressão num vaso de separação primária. Estudos como a estimação de vazão de gás na saída do vaso e diversos estudos acadêmicos poderão ser feitos e testados numa escala menor sendo aplicados em seguida nas plantas reais, evitando perda de tempo e dinheiro.

Palavras-chave: Escoamentos, picos de pressão, emulador, *plunger lift*, vaso separador.

Abstract

The purpose of this study was to develop a pilot plant which the main goal is to emulate a flow peak pressure in a separation vessel. Effect similar that is caused by the production in a slug flow in production wells equipped with the artificial lift method plunger lift. The motivation for its development was the need to test in a plant on a smaller scale, a new technique developed to estimate the gas flow in production wells equipped with plunger lift. To develop it, studies about multiphase flow effects, operation methods of artificial lift in plunger lift wells, industrial instrumentation elements, control valves, vessel sizing separators and measurement systems were done. The methodology used was the definition of process flowcharts, its parameters and how the effects needed would be generated for the success of the experiments. Therefore, control valves, the design and construction of vessels and the acquisition of other equipment used were defined. One of the vessels works as a tank of compressed air that is connected to the separation vessel and generates pulses of gas controlled by a on/off valve. With the emulator system ready, several control experiments were made, being the control of peak flow pressure generation and the flow meter the main experiments, this way, it was confirmed the efficiency of the plant usage in the problem that motivated it. It was concluded that the system is capable of generate effects of flow with peak pressure in a primary separation vessel. Studies such as the estimation of gas flow at the exit of the vessel and several academic studies can be done and tested on a smaller scale and then applied in real plants, avoiding waste of time and money.

Keywords: Flows, peak pressure, emulator, plunger lift, separation vessel.

Sumário

Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xii
Lista de símbolos e abreviaturas	xiii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Objetivo.....	1
1.2 Motivação.....	2
Capítulo 2	3
Estudo de elementos do processo de elevação artificial por plunger lift	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Método de elevação artificial por Plunger Lift.....	3
2.2.1 Conceito	3
2.2.2 Princípio de funcionamento	4
2.2.3 Principais aplicações.....	6
2.2.4 Tipos de instalações	7
2.2.5 Modos de controle	7
2.3 Medição de gás natural em escoamentos	9
2.3.1 Golfadas – Padrões de escoamento.....	9
2.3.2 Placa de orifício e vazão pulsante.....	12
2.3.3 Vazão pulsante em poços de Plunger Lift.....	13
2.4 Vasos de pressão – Separadores	15
2.4.1 Conceito	15
2.4.2 Projeto	16
2.4.3 Definições de vasos separadores	17
2.5 Válvulas de controle	18
2.5.1 Conceito	18
2.5.2 Tipos de válvulas de controle	18
2.5.3 Aspectos do material de construção das válvulas.....	19
2.5.4 Dimensionamento de uma válvula de controle	20
2.5.5 Atuadores e acessórios de uma válvula de controle	21
2.6 Conclusão	23
Capítulo 3	24
Projeto do emulador de escoamentos	24
3.1 Fluxograma de execução.....	24
3.2 Parâmetros do processo.....	25
3.3 Memorial de projeto da planta.....	26
3.3.1 Descrição.....	26
3.3.2 Legislação	26
3.3.3 Especificações técnicas do material utilizado	26
3.4 Fluxograma de engenharia	26
3.5 Conclusão	27
Capítulo 4	28
Estudo do funcionamento dos equipamentos.....	28
4.1 Introdução.....	28
4.1.1 Segurança e manutenção	28
4.1.2 Alimentação das válvulas.....	30
4.1.3 Vaso pulmão.....	30

4.1.4	Válvulas manuais de controle de gás e válvula solenóide	31
4.1.5	Líquido e medição de nível	33
4.1.6	Gás e medição de pressão	36
4.1.7	Gás e medição de vazão	37
4.1.8	Temperatura e conversores IP	39
4.1.9	Controlador Lógico Programável (CLP).....	40
4.2	Conclusão	42
Capítulo 5		43
Experiências de controle e medição de vazão		43
5.1	Introdução.....	43
5.2	Monitoramento dos sinais	43
5.3	Controle de nível.....	44
5.4	Controle de pressão.....	46
5.5	Medição de Vazão	49
5.6	Supervisório – Análise dos gráficos	52
5.6.1	Análise do gráfico do controle de nível	52
5.6.2	Análise do gráfico do controle de pressão	53
5.6.3	Análise do gráfico da medição de vazão.....	54
5.7	Comparação de sinais de controle e diferencial de pressão	54
5.8	Conclusão	55
Capítulo 6		56
Conclusões gerais e perspectivas		56
6.1	Introdução.....	56
6.2	Conclusões	56
6.3	Perspectivas	57
Referências Bibliográficas		58
Anexo A – Fluxograma de Engenharia		60
Anexo B – Aquisição de Sinais da Experiência		61
Anexo C – Manual de Utilização da Planta.....		64
Anexo D – Descrição dos equipamentos.....		66

Lista de figuras

Figura 2.2.1-1 – Instalação de <i>plunger lift</i> convencional.....	4
Figura 2.2.2-1 – 1ª. Etapa do ciclo: crescimento de pressão no anular.....	5
Figura 2.2.2-2 – 2ª. Etapa do ciclo: abertura da válvula de controle na superfície	5
Figura 2.2.2-3 – 3ª. Etapa do ciclo: pistão chega à superfície	6
Figura 2.2.2-4 – 4ª. Etapa do ciclo: válvula fecha e o pistão desce para o fundo.	6
Figura 2.2.5-1 – <i>Plunger lift</i> com packer	8
Figura 2.2.5-2 – <i>Gás lift</i> intermitente com pistão	8
Figura 2.2.5-3 – <i>Plunger lift</i> com controlador eletrônico	9
Figura 2.3.1-1 – Diagramas esquemáticos dos padrões de escoamento para os fluxos vertical e horizontal.....	10
Figura 2.3.1-2 – Ilustração do regime de golfada.	11
Figura 2.3.1-3 – Mecanismos de formação de golfadas: (a) Instabilidade de <i>Kelvin-Helmholtz</i> ; (b) Acumulação de líquido devido à mudança de inclinação.....	11
Figura 2.3.1-4 – Longa golfada de líquido viajando através do <i>riser</i> : golfada severa	12
Figura 2.3.2-1 – Placas de orifício	12
Figura 2.3.2-2 – Trecho de medição tipo placa de orifício	13
Figura 2.3.3-1 – Diagrama esquemático das malhas de controle em um separador.....	14
Figura 2.4.1-1 – Vasos de pressão horizontais	16
Figura 2.4.3-1 – Separador Trifásico	17
Figura 2.5.2-1 – Válvula de controle convencional.....	19
Figura 2.5.3-1 – Válvula com erosão causada por <i>flashing</i>	20
Figura 2.5.5-1 – Posições de segurança por falha em função das diversas combinações entre atuador e obturador	22
Figura 3.1-1 – Fluxograma do processo.....	25
Figura 4.1.1-1 – Painel de ligação do compressor com medidor de temperatura.....	29
Figura 4.1.1-2 – Medidores das pressões internas	29
Figura 4.1.1-3 – Compressor internamente	29
Figura 4.1.2-1 – Derivação da linha de gás para alimentação das válvulas e válvula reguladora	30
Figura 4.1.3-1 – Vaso pulmão do sistema.....	31
Figura 4.1.4-1 – Válvulas manuais de controle de gás e válvula solenóide.....	32
Figura 4.1.4-2 – Válvulas manuais de controle de gás.	32
Figura 4.1.5-1 – Vaso de pressão separador bifásico.....	33
Figura 4.1.5-2 – Medidor de nível no vaso separador – dreno aberto na parte inferior	34
Figura 4.1.5-3 – Sensor medidor de nível por pressão diferencial	34
Figura 4.1.5-4 – Bomba alternativa e válvula controladora de vazão de água.....	35
Figura 4.1.5-5 – Sistema de segurança da bomba – água retorna ao reservatório.....	35
Figura 4.1.6-1 – Sensor medidor de pressão	36
Figura 4.1.6-2 – Válvula de controle de pressão	37
Figura 4.1.7-1 – Medidor de vazão.....	37
Figura 4.1.7-2 – <i>Manifold</i> do medidor de vazão	38
Figura 4.1.7-3 – Placas de orifício de 7,1 e 9,1mm do projeto	39
Figura 4.1.7-4 – Flanges que prendem a placa de orifício. Está ligada ao medidor de vazão.	39
Figura 4.1.8-1 – Sensor de temperatura. Fiação ligada ao CLP que envia sinal de 4-20mA... ..	40
Figura 4.1.8-2 – Conversores IP	40
Figura 4.1.9-1 – Fiação e instalação do CLP	41
Figura 4.1.9-2 – SPDSW – Tela inicial	41

Figura 5.2-1 – Tela de configuração do módulo ZEM400.....	44
Figura 5.3-1 – Medidor visual de nível marcando as porcentagens medidas	45
Figura 5.3-2 – Software de monitoramento de sinais	46
Figura 5.4-1 – Reta obtida na medição de valores de corrente e pressão	47
Figura 5.4-2 – Gráficos de controle de pressão – Ajustes dos parâmetros do controlador PI .	48
Figura 5.4-3 – Zoom do sinal de controle da planta – Controle de pressão	49
Figura 5.5-1 – Controle de pressão e medição de vazão.....	50
Figura 5.6-1 – Supervisório dos sistemas de controle e medição de vazão	53
Figura 5.7-1 – Análise do sinal de controle comparado com o diferencial de pressão	55

Lista de tabelas

Tabela 4.1-1 – Configuração dos Sinais do Sistema no CLP	40
Tabela 5.4-1 – Experiência de valores de corrente medidos para pressões aplicadas	47
Tabela D-1 – Vasos de pressão.....	66
Tabela D-2 – Válvula de esfera tripartida plena 1000 WOG MGA 2”	66
Tabela D-3 – Válvula globo manual 1”	66
Tabela D-4 – Válvula de controle FISHER.....	67
Tabela D-5 – Compressor tipo parafuso	67
Tabela D-6 – Transmissor de vazão SMAR.....	67
Tabela D-7 – Transmissores de pressão ROSEMOUNT	67
Tabela D-8 – Controlador Lógico Programável (CLP) ZAP 500 e módulo de expansão ZEM400	68
Tabela D-9 – Características das placas de orifício	68

Lista de símbolos e abreviaturas

ΔP	Diferencial de pressão
ρ	Densidade – massa específica
γ	Peso específico
β	Razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da linha
π	Constante universal (3,14159)
A	Área
C	Coefficiente de descarga
C_v	Coefficiente de vazão das válvulas
d	Diâmetro do orifício
D	Diâmetro da linha
E/P	Conversão de voltagem para pressão
I/P ou IP	Conversão de corrente para pressão
I/O	Entrada e saída
$f(x)$	Fração da vazão máxima (em função da posição da válvula)
K	Constante da equação de vazão em placas de orifício
g	Gravidade
m	Coefficiente angular da reta
ΔP	Diferencial de pressão
P_{wf}	Pressão de fluxo no fundo do poço
P	Pressão
Q	Vazão
V	Velocidade do escoamento
y	Ponto de ordenada da equação da reta
y_0	Ponto de ordenada inicial da equação da reta
x	Ponto de abscissa da equação da reta
x_0	Ponto de abscissa inicial da equação da reta
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCP	Bombeio por Cavidades Progressivas
BCS	Bombeio Centrífugo Submerso
CLP	Controlador Lógico Programável
FCI	<i>Fluid Components International</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MPMS	<i>Manual of Petroleum Measurement Standards</i>
N	Norma
NBR	Norma Brasileira
NPT	<i>National Pipe Thread</i>
NR	Norma Regulamentadora
NVRAM	<i>Nonvolatile Random Access Memory</i>
PA	Pressão Admissível
PED	<i>Pressure European Directive</i>
PI	Proporcional Integrativo
PID	Proporcional Integrativo Derivativo

PMTA	Pressão Máx. de Trabalho Admissível
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RGL	Razão Gás-Líquido
ROM	<i>Read Only Memory</i>

Capítulo 1

Introdução

À medida que a exploração petrolífera aumenta no mundo, vão surgindo novos desafios para o homem. Diversas áreas de petróleo, por vezes, não podem ser exploradas em todo seu potencial por alguma restrição, seja ela ambiental, física ou outra qualquer. Técnicas para solucionar tais problemas são estudadas constantemente e o mais comum para aplicar alguma dessas técnicas seria testá-las no próprio local do problema. Isso, no entanto, muitas vezes não é possível, pois poderiam ocorrer problemas ocasionando acidentes, perda de tempo e dinheiro, caso a solução não funcionasse. Além disso, possivelmente a execução de trabalhos naquela área deveria parar, a fim de que tais testes fossem realizados.

Para evitar esses problemas, estudam-se formas de se reproduzir os efeitos encontrados nas diversas áreas de atuação da indústria petrolífera.

Trabalhos acadêmicos são realizados constantemente com a finalidade de se encontrar soluções para esses problemas. Para a realização dos testes são utilizados protótipos da planta real, as chamadas planta-piloto, que são plantas de processo em escala reduzida. O fim que se busca ao desenhar, construir e operar uma planta piloto é se obter informações sobre um determinado processo para aplicar o que foi estudado num posterior desenho ou construção de uma planta em escala industrial, assim evitando gastos excessivos com experimentos. Em busca dos conhecimentos dos efeitos e estudos em torno de soluções, todos os erros e acertos são estudados e documentados. Quando a pesquisa é concluída, a solução pode ser aplicada na planta real sem perda de similaridade, visto que deve existir uma semelhança geométrica entre o modelo (protótipo) e o projeto real, considerando as dimensões em escala e os mesmos ângulos.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é projetar uma planta piloto capaz de emular picos de pressão e vazão semelhantes aos efeitos produzidos por golfadas provenientes dos poços de petróleo. Um vaso separador bifásico será montado para receber e controlar os fluidos. Na saída desse vaso estará presente uma válvula de controle de pressão. Na entrada do vaso separador haverá ainda uma bomba que enviará água para o sistema e uma válvula fará o controle de nível no vaso. No projeto também constará toda parte de instrumentação das válvulas de controle, válvulas manuais e sensores que terão papel importante no seu desenvolvimento.

Para deixar mais claro, o que se espera do sistema é conseguir reproduzir picos de pressão a serem controlados no vaso separador bifásico.

Embora o objetivo primordial seja a medição e controle da pressão, a planta-piloto será montada numa configuração que permita a entrada de líquido para controle de nível. Poderá ainda ser utilizada em diversos estudos acadêmicos tais como:

- a) Outras alternativas de controle, com a finalidade de melhorar a medição de vazão;
- b) Estudos de escoamentos, com a verificação do padrão que está escoando;
- c) Modificação de equipamentos, para estudos de instrumentação e automação;
- d) Modificação dos fluidos, para estudos relacionados à engenharia química e do petróleo;

1.2 Motivação

A elevação artificial de petróleo consiste no fornecimento de energia externa ao sistema poço-reservatório com o objetivo de transportar os fluidos presentes no fundo do poço até a superfície. Esta energia externa é necessária porque, com o passar do tempo, a pressão original existente no reservatório (rocha) vai reduzindo gradativamente em decorrência da retirada de fluidos do seu interior, fazendo com que a vazão dos poços produtores também seja reduzida por esta redução de pressão. Este efeito é denominado depleção.

A indústria do petróleo tem desenvolvido ao longo do tempo diversos mecanismos de elevação artificial de forma a compensar o efeito natural da depleção, dentre eles podemos citar: o bombeio mecânico, bombeio centrífugo submerso (BCS), bombeio de cavidades progressivas (BCP), o *gás lift* (Elevação por gás), o *plunger lift* (Elevação por pistão), dentre outros.

O *plunger lift* é caracterizado pelo uso de um pistão ou êmbolo que é instalado no interior da coluna de produção e tem a função de criar uma interface entre o fluido que se encontra acima dele e o fluido que fica abaixo do mesmo (normalmente o gás). O pistão permanece se deslocando para cima e para baixo em movimentos cíclicos utilizando, para isto, a energia de expansão do gás que fica acumulado no anular entre o revestimento e a coluna de produção do poço. A produção de um poço com *plunger lift* se dá por meio de golfadas na superfície ocorrida quando o pistão alcança a cabeça do poço, momento em que todo o fluido deverá escoar pela linha de produção com grande velocidade.

Em função desta característica de produção por golfadas, a medição da vazão de gás de poços com *plunger lift* não é uma tarefa trivial o que normalmente tem provocado a ultrapassagem da faixa de medição do equipamento [1].

Em função disso, o trabalho referenciado em [1] estuda a possibilidade de se encontrar uma alternativa para a medição da vazão de gás em poços *offshore*¹ produzido por *plunger lift* durante a realização do teste de produção.

A motivação para este trabalho veio da necessidade de se reproduzir os efeitos dos picos de pressão causados por essas golfadas.

Com o dimensionamento de um sistema de medição que suporte picos de pressão e vazão, poderão ser estudados os diversos efeitos e impactos no controle e medição de vazão sem perda de similaridade.

Os resultados obtidos poderão ser aplicados no desenvolvimento de um melhor modelo para o escoamento na linha de produção de um poço equipado com *plunger lift*.

¹ Poços *Offshore* são poços que não se encontram em terra firme. Como exemplo podem ser citados os poços marítimos.

Capítulo 2

Estudo de elementos do processo de elevação artificial por *plunger lift*

2.1 Introdução

Neste capítulo é realizada uma revisão dos principais aspectos que estão relacionados com o projeto do sistema emulador.

Inicialmente, será apresentado um resumo do método de elevação artificial *plunger lift* destacando suas principais características e aplicações mais usuais, apresentados em [1]. Serão descritos também como e porque ocorrem as golfadas nos transportes de fluidos através das tubulações na indústria do petróleo, suas características e efeitos na medição de vazão e qual sua influência na produção por *plunger lift*.

Em seguida, o projeto de vasos separadores será abordado mostrando alguns tópicos e critérios estabelecidos para sua construção [4], bem como algumas definições de sua estrutura. Serão apresentados os principais elementos que compõem a construção de um vaso e alguns comentários a respeito do desenvolvimento do projeto.

Por fim será exibida uma visão geral de válvulas de controle, falando de seus tipos, aspectos quanto à construção, dimensionamento e alguns acessórios que podem as compor.

2.2 Método de elevação artificial por Plunger Lift

2.2.1 Conceito

O método de elevação artificial por *Plunger Lift* é um método de baixo custo e boa eficiência que permite aumentar e otimizar a produção de poços produtores de óleo e de gás em campos marginais ou com alto grau de exploração. Ele consiste, basicamente, na criação de uma interface mecânica entre os fluidos produzidos e o gás do próprio poço que se torna a fonte de energia necessária para a elevação de um pistão de passeio livre (*plunger*) dentro da coluna, viajando do fundo até a superfície em períodos cíclicos. Esta interface mecânica reduz drasticamente o fenômeno do escorregamento de líquido (*fall-back*) presente em outros métodos de elevação, quando existe uma alta razão gás-líquido (RGL), aumentando assim a eficiência do método. Além disto, o *plunger lift* reduz a pressão de fluxo no fundo do poço (P_{wf}) acarretando um incremento na produtividade do poço.

Este método aplica-se particularmente quando a quantidade de gás no poço é relativamente maior que a de líquido, caso contrário não existiria força suficiente para a elevação do pistão à cabeça de produção.

Poços equipados com pistões metálicos já são usados há mais de 45 anos na produção de óleo e gás. Na Figura 2.2.1-1 é mostrada uma instalação típica de *plunger lift*.

Uma apresentação de como é representado graficamente um poço de petróleo pode ser visualizada na Figura 2.2.2-1. A coluna de produção, representada pela tubulação branca da figura, é o local onde passa o fluido produzido pelo poço. Ela é posicionada na parte central do poço, chegando até o óleo (marrom). As pequenas bolhas representam uma quantidade de

gás que serve apenas para ilustrar, visto que no fundo do poço praticamente não há separação de fases entre os fluidos. O gás está sob alta pressão e misturado ao óleo. À medida que a pressão diminui, o gás vai se desprendendo do óleo formando pequenas partículas que aumentam de tamanho com a diminuição da pressão. Essa ilustração de separação é feita para esclarecer que o método utiliza gás como força para a produção. A parte azul lateral, o anular, é a parte onde o poço é revestido com uma espécie de lama para fixar a coluna de produção ao poço.

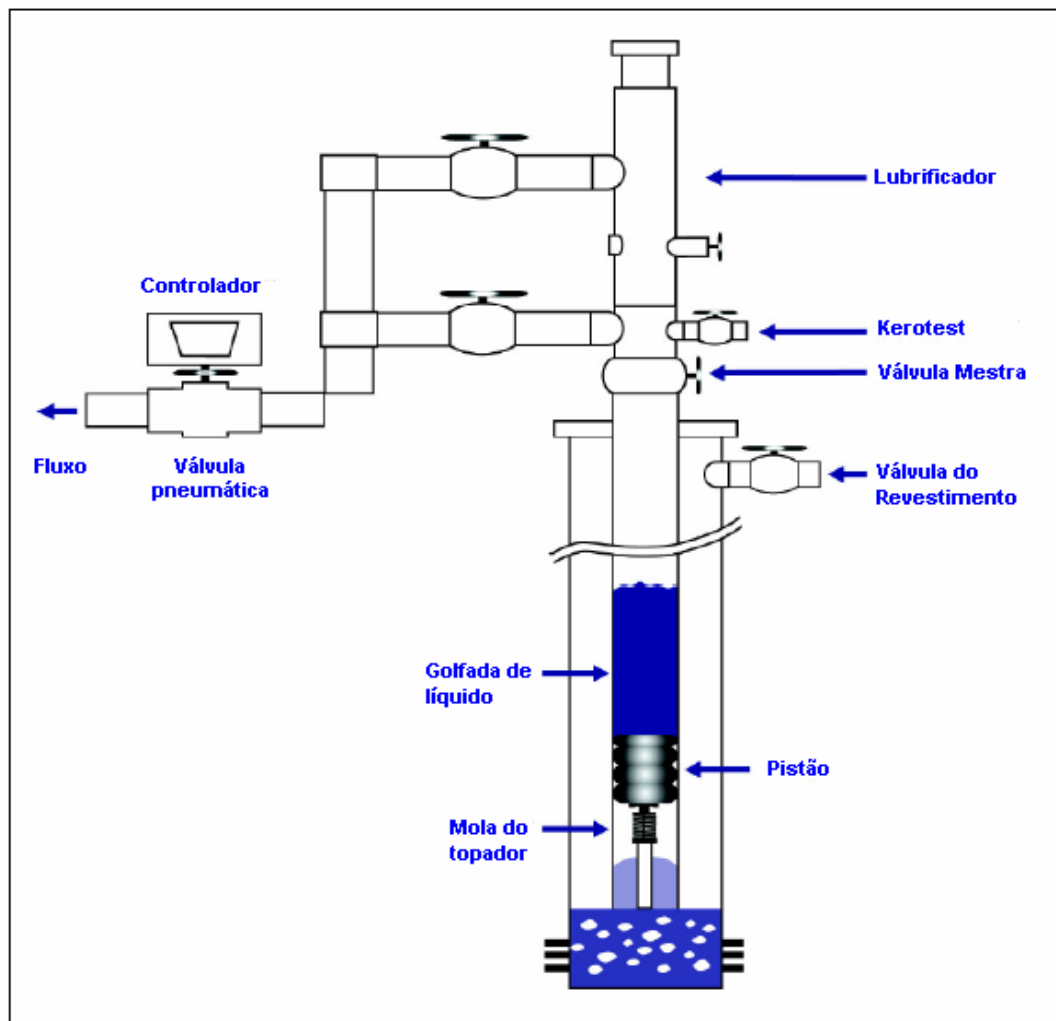


Figura 2.2.1-1 – Instalação de *plunger lift* convencional

2.2.2 Princípio de funcionamento

O *plunger lift* é um método cíclico, ou seja, é constituído de etapas que se sucedem em intervalos de tempo regulares até que a última seja atingida, quando o controlador volta a repetir tudo outra vez. Em função desta característica, ele consegue ter uma grande flexibilidade para se ajustar a cada tipo de poço indicado para este método através dos controles dos tempos de cada fase do ciclo.

A seguir, será detalhado um ciclo completo do *plunger lift*.

1ª Etapa: O gás se acumula no anular (azul) e pressão (Figura 2.2.2-1) começa a subir devido ao fechamento da válvula de controle na superfície. O pistão encontra-se no fundo da coluna com uma mistura de gás-óleo acima dele, com mais líquido do que gás. Mais acima, uma mistura bifásica com mais gás do que líquido.

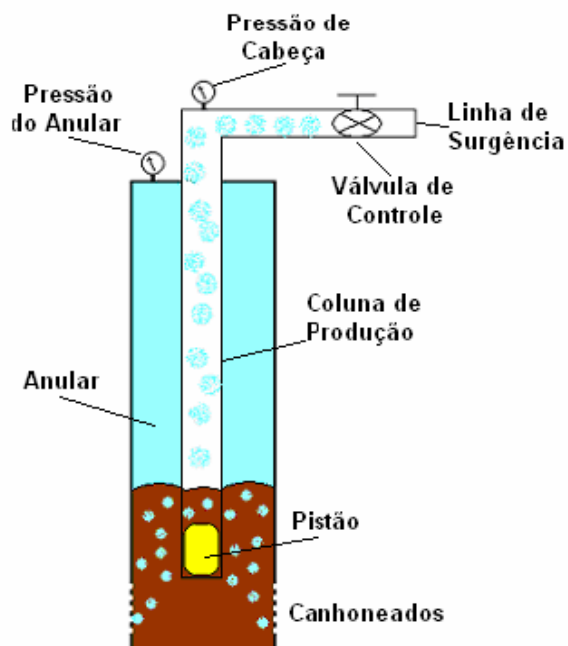


Figura 2.2.2-1 – 1ª. Etapa do ciclo: crescimento de pressão no anular

2ª Etapa: Quando a pressão no anular atinge um valor pré-determinado (Figura 2.2.2-2), a válvula de controle abre provocando um diferencial de pressão sobre o pistão fazendo-o subir no interior da coluna de produção elevando o fluido acima dele.

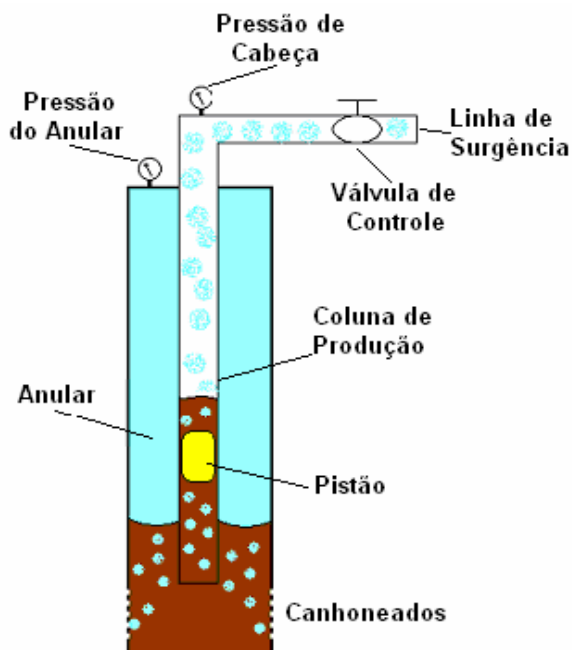


Figura 2.2.2-2 – 2ª. Etapa do ciclo: abertura da válvula de controle na superfície

3ª Etapa: O pistão atinge a superfície (Figura 2.2.2-3) depois de percorrer toda a coluna fazendo com que o fluido que se encontra acima dele seja produzido pela linha de surgência do poço. Neste instante, a pressão no anular cai até um valor mínimo facilitando, portanto, a entrada de novos fluidos do reservatório para dentro do poço.

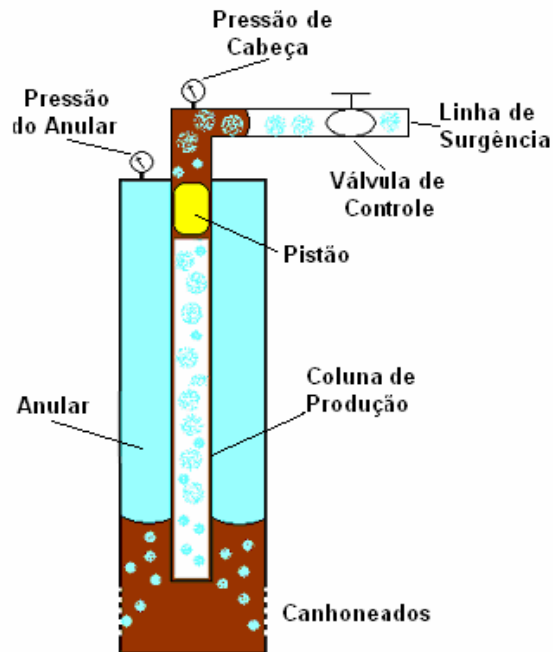


Figura 2.2.2-3 – 3ª. Etapa do ciclo: pistão chega à superfície

4ª. Etapa: Quando todo o fluido carregado pelo pistão é produzido na superfície (Figura 2.2.2-4), a válvula de controle fecha a linha de surgência e o pistão cai para o fundo da coluna de produção para dar início a um novo ciclo.

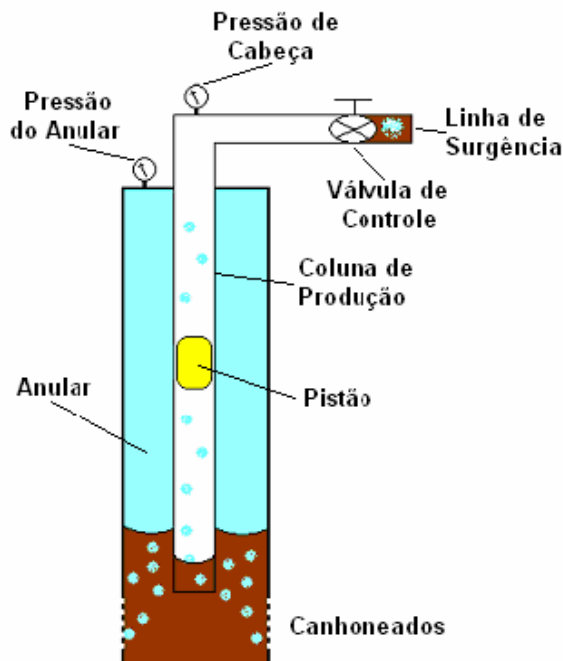


Figura 2.2.2-4 – 4ª. Etapa do ciclo: válvula fecha e o pistão desce para o fundo.

2.2.3 Principais aplicações

Há quatro aplicações básicas para o *plunger lift*, contudo, as possibilidades de desdobramentos destas aplicações tem se expandido muito rapidamente nos últimos anos com o advento dos controladores digitais.

- Eliminar a formação de líquido em poços de gás – com a redução da vazão de poços produtores de gás ocorre uma correspondente redução no poder de carregamento de

líquido até a superfície, o que acaba provocando seu acúmulo no fundo do poço até chegar a amortecê-lo completamente. O uso do *plunger lift* nestes casos é indicado para remover, continuamente, qualquer líquido que se acumule no fundo do poço permitindo, desta forma, um incremento na produção do poço devido à redução da pressão de fundo (P_{wf});

- b) Aumentar a vida útil de poços com alta RGL – poços com alta razão gás-líquido (RGL) tendem a reduzir sua produção de óleo mais rapidamente do que outros com RGL menor devido ao efeito do escorregamento (*fall-back*) de líquido para o fundo do poço. Com o desenvolvimento de pistões de duplo selo, o efeito do escorregamento ficou bastante reduzido maximizando a eficiência deste método de elevação;
- c) Evitar a formação de incrustação de parafina ou hidratos na coluna – esta é com certeza a aplicação mais simples do *plunger lift*. Em virtude de se ter um pistão viajando diversas vezes por dia dentro da coluna de produção, o acúmulo de qualquer depósito de parafina ou outro produto incrustante se torna improvável de ocorrer;
- d) Aumentar a eficiência de poços de *gas lift* intermitente – poços de *gas lift* intermitente podem ser candidatos ideais para o *plunger lift*. O pistão vai funcionar como uma interface mecânica entre a coluna de líquido e o gás injetado na coluna através de uma válvula de *gas lift* fazendo com que o efeito do escorregamento (*fall-back*) seja minimizado.

2.2.4 Tipos de instalações

Na prática encontram-se, basicamente, três tipos de instalações de *plunger lift*:

- a) *Plunger lift* convencional – é o tipo mais comum de instalação (Figura 2.2.1-1). É utilizada na produção de poços com alta razão gás-líquido (RGL) e na remoção de líquido acumulado no fundo de poços de gás. Todo gás necessário para a operação é suprido pelo próprio poço;
- b) *Plunger lift* com *packer* – tipo pouco freqüente de instalação (Figura 2.2.5-1). Seu uso é geralmente limitado a poços de gás para remoção de líquido acumulado no fundo do poço;
- c) *Gas lift* intermitente com pistão – Todo gás necessário para a elevação é suprido ao anular por uma fonte externa (Figura 2.2.5-2). Uma válvula com abertura controlada pelas pressões do anular e da coluna é instalada logo abaixo do batente do pistão. A linha de produção é mantida sempre aberta. A principal utilidade do pistão é a redução do *fall-back*, diminuindo a contrapressão na formação, aumentando a produção de líquido e permitindo uma melhor utilização da energia do gás.

2.2.5 Modos de controle

A baixa utilização do *plunger lift* na indústria do petróleo ao longo dos anos ocorreu, basicamente, em função das dificuldades encontradas pelos operadores em manipular os controladores pneumáticos existentes na época e em ajustar os tempos corretos para a otimização da produção do poço.

No controle clássico utiliza-se um sensor de pressão no anular na superfície, um sensor de proximidade do pistão na cabeça do poço, um controlador e uma válvula pneumática (*motor valve*) na linha de produção (Figura 2.2.1-1).

A operação é iniciada com o fechamento da linha de produção pela válvula pneumática o que faz com que a pressão no anular coluna-revestimento cresça até um determinado valor de pressão pré-definido.

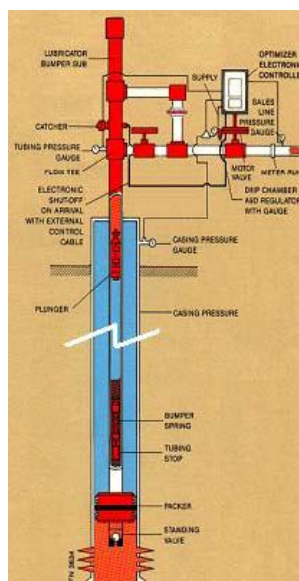


Figura 2.2.5-1 – Plunger lift com packer

Neste instante, o controlador envia um sinal para abertura da válvula pneumática fazendo com que o diferencial de pressão anular-coluna aumente provocando o deslocamento para cima do pistão e do fluido que se encontra acima dele. Depois que o pistão atinge a superfície e a golfada de líquido é produzida pela linha de produção, a pressão do revestimento cai para um valor mínimo, o controlador fecha a válvula pneumática e o pistão desce em queda livre até a extremidade da coluna.

À medida que o fluido do reservatório alimenta o fundo do poço, uma nova golfada de líquido se forma acima do pistão e mais gás migra para o anular coluna-revestimento pressurizando-o. Um novo ciclo é iniciado assim que se atinja novamente um valor máximo de pressão suficiente para elevar o pistão e todo o fluido que esteja acima do mesmo ou que o contador do controlador acione a válvula pneumática abrindo a linha de produção e iniciando nova subida do pistão.

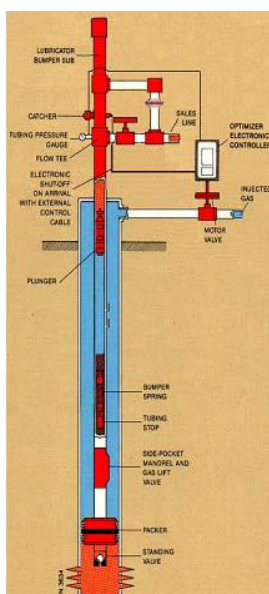


Figura 2.2.5-2 – Gás lift intermitente com pistão

Um novo modo de controle tem sido usado nos últimos anos (Figura 2.2.5-3). Utiliza-se um sensor de proximidade do pistão na cabeça do poço, um controlador com microprocessador eletrônico e uma válvula pneumática na linha de produção. Em função de valores pré-fixados para as velocidades média, mínima e máxima de subida do pistão, o controlador ajusta o tempo em que a linha de produção fica fechada e o tempo em que a mesma permanece aberta após a chegada do pistão à superfície (ou tempo de *afterflow*²). As principais vantagens do controlador eletrônico são o contínuo monitoramento da chegada do pistão à superfície, o ajuste automático da operação e uma menor demanda de supervisão (por exemplo: se ocorrer um aumento da resistência à subida do pistão – depósito de parafina, a menor velocidade de subida do pistão será compensada com uma maior pressão no anular graças ao aumento do tempo em que o poço permanece fechado ou a um menor tempo de *afterflow*).

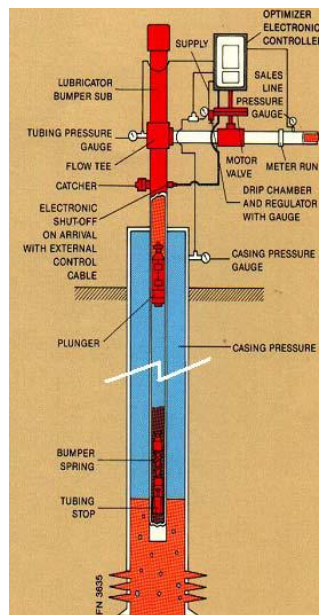


Figura 2.2.5-3 – *Plunger lift* com controlador eletrônico

2.3 Medição de gás natural em escoamentos

2.3.1 Golfadas – Padrões de escoamento

Escoamentos multifásicos ocorrem quando uma mistura de duas ou mais fases (sólido, líquido ou gás), as quais não se encontram totalmente diluídas, escoam simultaneamente numa dada geometria[13].

Na indústria do petróleo, a produção de óleo e gás natural envolve o transporte de fluidos (provenientes do reservatório) nas fases líquida (óleo e água) e gasosa – eventualmente com grãos de areia dispersos – até a unidade de processamento onde será realizada a separação de fases. Como, nos últimos anos, as operações de produção *offshore* vem se expandindo para profundidades cada vez maiores, os custos associados também crescem. Isso implica na necessidade de estudos detalhados de viabilização e otimização dos equipamentos e processos relacionados.

² Tempo após a produção

A importância na previsão de escoamentos multifásicos em tubulações de petróleo é notável e ao mesmo tempo uma tarefa extremamente complicada, especialmente devido à complexa interação entre as diversas fases escoando.

No conceito matemático, de forma a entender os mecanismos fundamentais governantes, muitas vezes é suficiente considerar apenas duas fases escoando, isto é, apenas líquido e gás. É importante saber que em situações onde água é produzida simultaneamente, o óleo e a água não constituirão uma mesma fase líquida na mistura.

Essas fases podem se arranjar em diversas configurações na tubulação, as quais influenciarão diretamente as características do escoamento associado. Estudos têm sido realizados ao longo dos anos para mapear os regimes possíveis de acordo com as propriedades dos fluidos, geometria do escoamento e condições de operação. Esquemas contendo padrões de escoamento são mostrados na Figura 2.3.1-1.

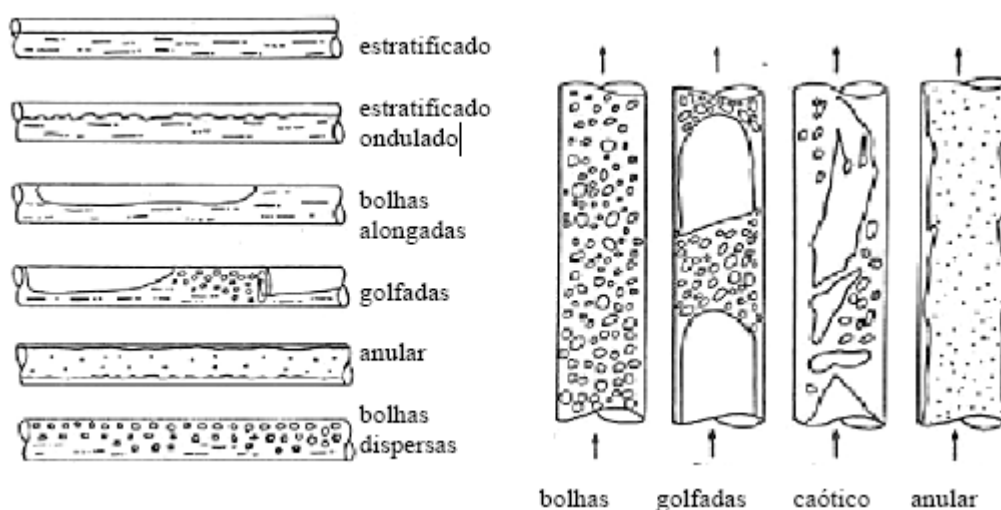


Figura 2.3.1-1 – Diagramas esquemáticos dos padrões de escoamento para os fluxos vertical e horizontal.

Dentre os diversos padrões de escoamento bifásico possíveis, o escoamento do regime em golfadas se destaca por ser encontrado em diversas aplicações de engenharia, como por exemplo, o transporte de hidrocarbonetos em tubulações e o escoamento de líquido-vapor em usinas de geração de energia. Além de ser bastante comum, ocorrendo para uma grande variedade de condições, altas perdas de carga estão normalmente associadas a este regime. Ainda, ele possui um caráter intermitente, o qual lhe confere grande complexidade.

O regime em golfadas caracteriza-se pelo escoamento de pacotes de líquido separados por grandes bolhas de gás na tubulação (Figura 2.3.1-2). O que determina se a golfada está livre (regime de bolhas alongadas) ou não de pequenas bolhas de gás dispersas ao longo de seu corpo é um balanço entre as forças turbulentas, que tendem a quebrar as bolhas maiores, e as forças de empuxo e tensão superficial, as quais controlam a aglomeração e coalescência destas pequenas bolhas [14].

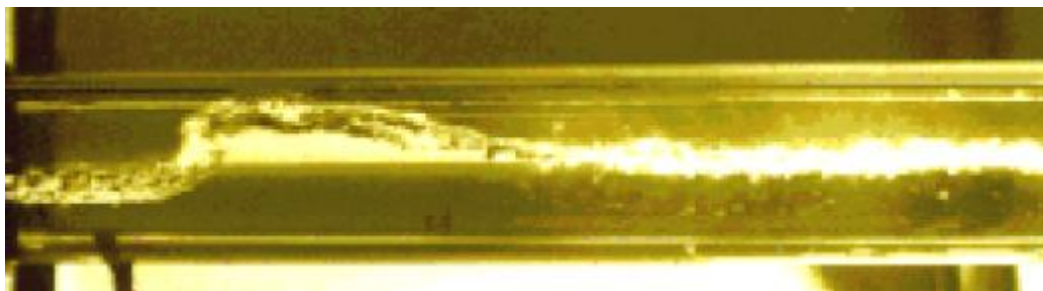


Figura 2.3.1-2 – Ilustração do regime de golfada.

O desenvolvimento do regime de golfadas se dá a partir do escoamento estratificado em decorrência de dois fatores: do crescimento natural de pequenas perturbações presentes no escoamento (por um mecanismo de instabilidade de *Kelvin-Helmholtz*, Figura 2.3.1-3a) ou devido à acumulação de líquido causada por mudanças de inclinação no perfil do duto (Figura 2.3.1-3b). O regime estratificado não ocorre em tubulações verticais, neste caso, o regime em golfadas se estabelece como resultado da coalescência das bolhas de gás [15].

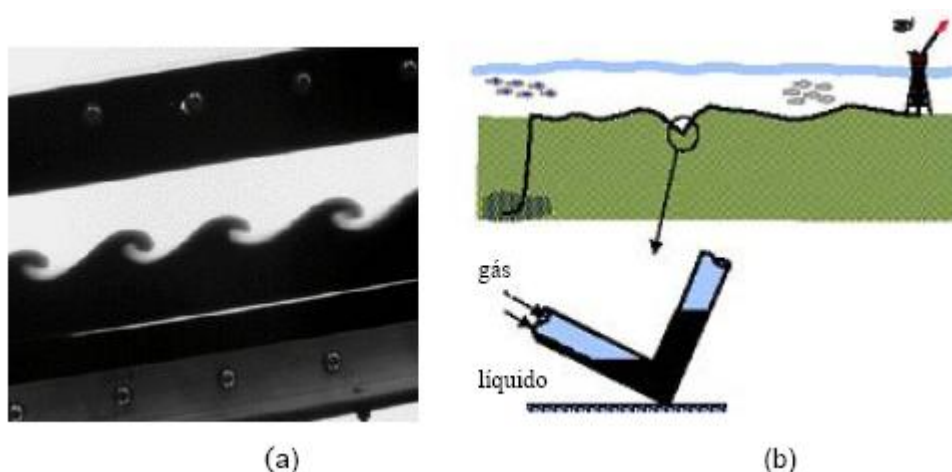


Figura 2.3.1-3 – Mecanismos de formação de golfadas: (a) Instabilidade de *Kelvin-Helmholtz*; (b) Acumulação de líquido devido à mudança de inclinação.

Sob o ponto de vista da operabilidade das plantas de processamento de óleo e gás, a intermitência na produção pode ser um fator bastante problemático. Um cenário em que isso pode ocorrer de forma crítica surge em poços cuja inclinação da linha de produção é descendente, associado ainda à presença do regime estratificado de escoamento. Nesta situação pode haver um bloqueio do gás devido ao acúmulo de líquido na base do *riser*. No entanto o gás continua a ser produzido pelo poço, ocasionando um aumento de pressão a montante do bloqueio, até o ponto em que há o deslocamento da golfada pelo líquido (Figura 2.3.1-4). Este fenômeno é comumente chamado de “golfada severa”. Quando esta situação ocorre, variações cíclicas nas vazões de líquido e gás serão observadas pelo separador, podendo ser consideravelmente maiores do que a vazão média para a qual ele está projetado. O processamento destas golfadas pode ser extremamente complicado se o volume de líquido recebido for muito grande. Isso pode levar à necessidade da adição de outro equipamento denominado “*slug catcher*”, de modo a evitar a inundação do separador e prevenir a entrada de líquido na corrente gasosa, extremamente prejudicial ao compressor para onde o gás estará sendo transportado. Assim, o comprimento das golfadas é um parâmetro crítico de projeto do sistema de separação. Por outro lado, mesmo as golfadas de comprimento menor, se

ocorrerem com a frequência suficientemente alta, podem causar o mesmo problema ao sistema.

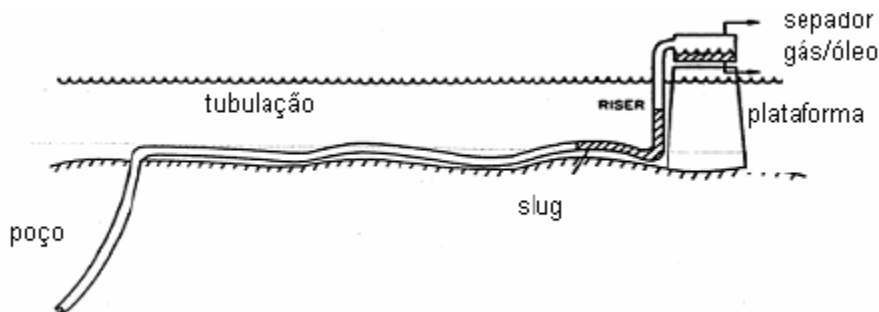


Figura 2.3.1-4 – Longa golfada de líquido viajando através do riser: golfada severa

Além disso, as golfadas de líquido viajam a velocidades razoavelmente altas. Portanto, longas golfadas carregam considerável quantidade de movimento. Em trechos de curvatura acentuada, é possível que surjam forças de reação muito altas, devendo sua consideração ser importante no projeto mecânico do sistema [16].

2.3.2 Placa de orifício e vazão pulsante

Dos muitos dispositivos inseridos numa tubulação para se criar uma pressão diferencial, o mais simples e comumente usado é o da placa de orifício (Figura 2.3.2-1). Esse diferencial de pressão é desenvolvido como uma função da velocidade do fluido à medida que passa através da placa e utilizado para inferir a vazão.



Figura 2.3.2-1 – Placas de orifício

O medidor consiste de uma placa precisamente perfurada com um orifício concêntrico e de bordas retas, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação. Possui ainda um dispositivo porta-placa que poderá ser um simples par de flanges equipados com tomadas de pressão diferencial ou um equipamento projetado para a troca da placa de orifício mais facilmente. E, por fim, possui um tubo de medição consistindo de seções adjacentes podendo ter ou não um condicionador de fluxo (Figura 2.3.2-2)

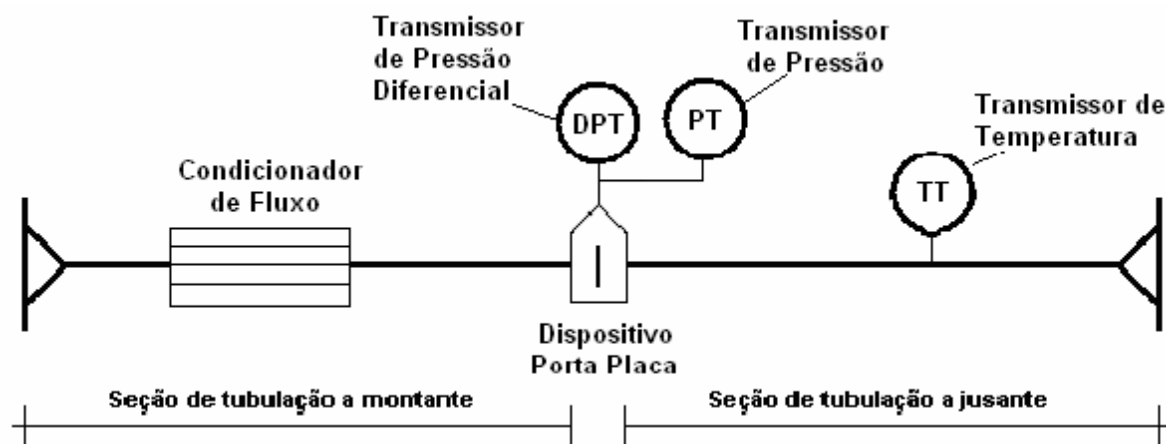


Figura 2.3.2-2 – Trecho de medição tipo placa de orifício

Medições confiáveis de vazão não podem ser obtidas com um medidor tipo placa de orifício quando pulsações severas estão presentes no ponto de medição. Até o momento, não existe nenhum ajuste teórico ou empírico que possa ser aplicado à medição com placa de orifício na presença de pulsações que permita manter o nível de precisão necessário para uma medição visando transferência de custódia, por exemplo [1]. A própria Norma API-MPMS 14.3-1[27] que estabelece os critérios de medição de gás natural através de placa de orifício não recomenda o uso deste tipo de medição na presença de fluxo pulsante.

As pulsações em uma tubulação originárias da presença de bombas alternativas e rotativas, abertura/fechamento de válvulas, configurações da tubulação, etc., consistem em mudanças bruscas de velocidade, pressão e densidade do fluido em fluxo. Os padrões de escoamento citados no item 2.3.1 são exemplos causadores de pulsação em tubulações.

Para se obter medições confiáveis é necessária a supressão da pulsação. De uma forma geral, existem diversas regras práticas como posicionar o trecho de medição em um local menos favorável a interferência da fonte de pulsação, inserir tanques de grande capacidade limitadores de fluxo, usar tubo de curto circuito para o impulso e/ou *manifold*³ com aproximadamente a mesma dimensão das tomadas usadas pelo instrumento de medição de pressão diferencial, etc., que tem sido efetivas na diminuição da pulsação e/ou seu efeito sobre a medição das placas de orifício. Porém a maior parte dessas regras é de difícil implementação em plataformas de produção de petróleo, em função da escassez do espaço físico disponível para a instalação de novos equipamentos.

2.3.3 Vazão pulsante em poços de Plunger Lift

Os separadores teste que são utilizados normalmente na indústria do petróleo possuem na malha de medição de gás um controlador PID que é ajustado para definir a pressão de separação no interior do vaso. Estes controladores são, via de regra, sintonizados para manter a variável controlada próxima à referência (*set point*) e, conseqüentemente, tem como principal desvantagem o fato de repassarem as oscilações de carga para a vazão de saída. Assim, para sistemas com pequenas oscilações na carga, a utilização do PID é satisfatória (Figura 2.3.3-1).

³ As válvulas Manifold são válvulas de bloqueio indicadas para instalação de transmissores de pressão diferencial, transmissores de pressão ou manômetros.

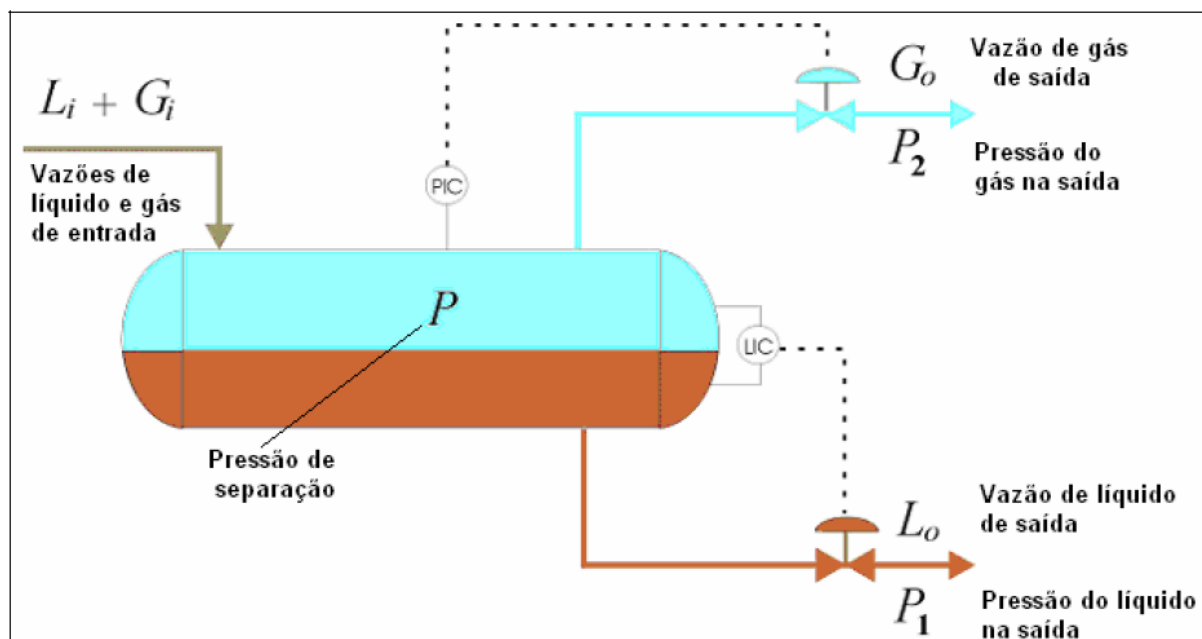


Figura 2.3.3-1 – Diagrama esquemático das malhas de controle em um separador

Todavia, com o surgimento de poços tipo *plunger lift* o comportamento da vazão de produção é caracterizado pelas chamadas "golfadas". A não uniformidade da mistura óleo e gás proveniente do poço faz com que sejam formados bolsões intercalados com predominância ora de óleo, ora de gás, nas linhas de produção. Como consequência, a vazão de cada uma das fases da mistura apresenta variações que podem ser bastante bruscas e com grande amplitude.

Quando um poço de vazão intermitente é alinhado para um separador teste convencional, ocorre o fenômeno chamado *overrange*⁴ no instrumento de medição da pressão diferencial, ou seja, a intensidade do sinal medido pela placa de orifício é maior que o limite superior da faixa de medição do instrumento, fazendo com que ocorra a saturação do sinal de saída do mesmo. Este efeito acarreta um erro considerável no cálculo da vazão de gás, já que o operador não consegue estimar qual o percentual do sinal que ficou além da faixa de medição do instrumento.

Uma alternativa utilizada no campo para contornar este problema é utilizar-se uma placa de orifício de grande diâmetro de forma a conseguir-se captar a maior intensidade do sinal gerado pela placa, porém nesse caso os níveis mais baixos do sinal ficavam comprometidos, pois o diferencial de pressão é muito pequeno para ser sentido pelo instrumento com precisão aceitável [1].

Assim, como uma alternativa de cálculo de medição de vazão, o trabalho referenciado em [1] propôs um algoritmo capaz de estimar a vazão de gás em vasos de separação primária utilizando o sinal de controle do algoritmo PID implementado na malha de controle de pressão.

⁴ Ultrapassagem da faixa de medição do equipamento.

2.4 Vasos de pressão – Separadores

2.4.1 Conceito

Vasos são todos os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter fluido pressurizado[4].

Nas indústrias de processo existem três condições específicas características que tornam necessário um grau maior de confiabilidade para os equipamentos, em comparação com o que é normalmente exigido para as indústrias em geral:

- Devido ao trabalho em regime contínuo, os equipamentos ficam sujeitos a regime severo de operação;
- Necessidade de máxima segurança e confiabilidade de funcionamento dos equipamentos, pois eles formam uma cadeia contínua, através da qual circulam os fluidos de processo e uma falha ou paralisação num único equipamento obriga geralmente à paralisação de toda instalação;
- A existência de condições de grande risco, devido ao manuseio de fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, ou em elevadas pressões ou temperaturas. E sua falha pode resultar em acidentes ou desastres de grandes proporções.

Os vasos de pressão constituem não só os equipamentos mais importantes da maioria das indústrias de processo, como também são geralmente os itens de maior tamanho, peso e custo unitário nessas indústrias. Esses mesmos equipamentos são igualmente presentes, como itens de maior ou menor importância, em muitas outras indústrias de outros ramos[4].

No projeto e a construção de vasos de pressão, como atividade de engenharia, é indispensável que sejam considerados todos os fatores éticos e sociais que possam estar envolvidos, desde os aspectos de segurança em equipamentos, segurança contra acidentes na fabricação e montagem do vaso, bem como possíveis prejuízos a terceiros, danos ecológicos, infrações de marcas e patentes etc.

Este tipo de equipamento é projetado, construído e instalado sob requisitos de controle de qualidade muito apertados e que se encontram definidos em códigos de construção próprios. Existe uma diretiva europeia sobre este assunto, conhecida na indústria como PED (*Pressure European Directive*) a qual foi transposta para a legislação portuguesa através do decreto-lei nº 211/1999. Outro código muito utilizado, principalmente na indústria de refinação de petróleo e petroquímica é o código americano ASME VIII, Divisão I ou Divisão II[17].

Os vasos se classificam quanto a suas classes e finalidades. Dentre as classes, podem ser classificados como vasos não sujeitos a chama, como por exemplo, os vasos de armazenamento e acumulação, as torres de destilação fracionada, retificação, absorção, os trocadores de calor, entre outros, e os vasos sujeitos a chama, como por exemplo, as caldeiras e fornos.

Os vasos de pressão não sujeitos a chama (objetivo do trabalho) são empregados em três casos gerais de uso:

- Armazenagem de gases sob pressão;
- Processamento de gases e líquidos;
- Acumulação intermediária de gases e líquidos em processos industriais.



Figura 2.4.1-1 – Vasos de pressão horizontais

2.4.2 Projeto

A grande maioria dos vasos de pressão são equipamentos feitos por encomenda, sob medida, para atenderem, em cada caso, determinados requisitos e especificações, sendo bastante raros os casos em que esses equipamentos sejam itens padronizados de linhas de fabricação de algum fabricante.

Por esse motivo principalmente, as etapas em que se desenvolvem o projeto, a fabricação e a montagem dos vasos de pressão são mais numerosas e mais complexas, e diferem bastante da rotina usualmente seguida para as outras classes de materiais e de equipamentos de uso industrial, que, pelo contrário, são normalmente itens de linhas normais de fabricação.

A construção de um vaso possui uma série de etapas que devem ser seguidas desde o projeto até a instalação final e a primeira delas é a definição dos dados gerais do projeto, onde são informados dados relativos à decisão ou preferência do usuário. Informações como as normas que devem ser seguidas para projeto e construção do vaso (No caso do Brasil, deve ser seguida a NR-13 da ABNT), tempo de vida útil mínimo desejado para o vaso, preferência do tipo de vaso e/ou sistema de construção, exigências de materiais, condições climáticas do local, limitações de área disponível, dimensões e peso para transporte, etc. Em seguida devem ser definidos os dados de processo como o tipo geral do vaso, propriedades das correntes fluidas que entram e saem do vaso, temperatura e pressão do equipamento, volume e resistência necessários, etc.

Diante desses dados, serão realizados os projetos de processo do vaso, projeto térmico, mecânico, das peças internas e por fim o projeto para fabricação. Este último consiste no detalhamento completo do equipamento para a sua fabricação e montagem, sendo a complementação do projeto mecânico, com o acréscimo de dados e informações adicionais, tais como detalhes de soldas, procedimentos de sequência de soldagem, localização de todas as soldas e cortes, etc. O projeto de fabricação deve incluir os desenhos de fabricação e os desenhos de soldagem e de inspeção de soldas.

Existem ainda rotinas de desenvolvimento do projeto e da construção dos vasos que, porém, não serão contempladas nesse trabalho.

2.4.3 Definições de vasos separadores

Os separadores gravitacionais são muito utilizados em sistemas de produção *offshore* e tem por objetivo separar as fases aquosa, oleosa e gasosa, denominados separadores trifásicos, ou as fases líquida e gasosa, denominados separadores bifásicos. Sua função é manter dentro dos limites toleráveis:

- a) Para separadores trifásicos:
 - A quantidade de líquido arrastado no gás;
 - A quantidade de água arrastada no óleo;
 - A quantidade de óleo arrastado na água;
- b) Para separadores bifásicos:
 - A quantidade de líquido arrastado no gás;
 - A quantidade de gás arrastado no líquido;

Existem várias concepções de separador com variações na forma e no tipo de dispositivos internos, como mostra a Figura 2.4.3-1.

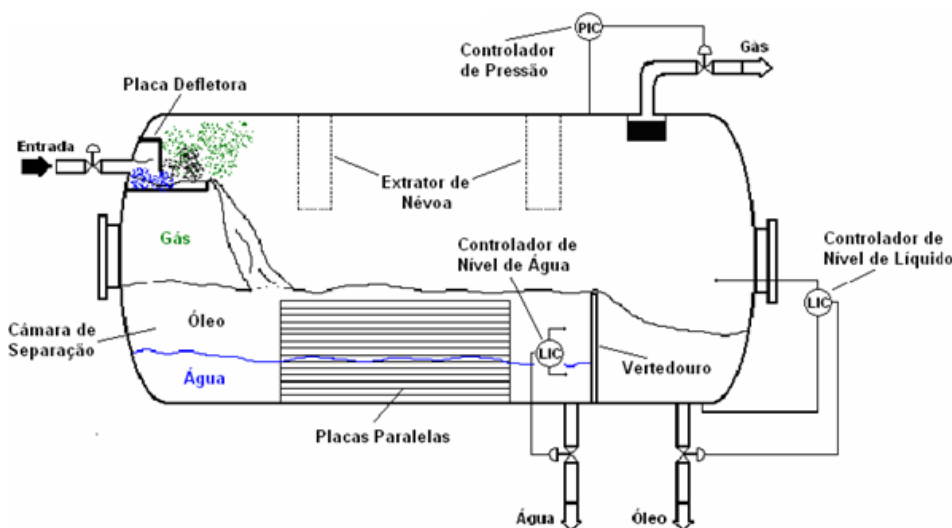


Figura 2.4.3-1 – Separador Trifásico

O equipamento possui uma placa defletora na entrada que é responsável pela fragmentação das fases, o que facilita a saída de gás e aumenta a dispersão das fases. Após o choque, o óleo e a água caem na câmara de separação e ocorre, parcialmente, a separação gravitacional entre os fluidos. Dependendo do tipo de óleo, pode ocorrer a formação de espuma, geradora da dispersão de líquidos na fase gasosa.

O controle de nível de interface da câmara atua sobre a vazão de saída da fase aquosa. A parte oleosa verte para a câmara de óleo, onde o nível é controlado manipulando-se a vazão de saída da fase oleosa. O controle de pressão (PIC da Figura 2.4.3-1) atua sobre a abertura da válvula de controle, o que faz com que a vazão de saída de gás se altere continuamente.

Para melhorar a eficiência da separação, são utilizados vários dispositivos internos. Os extratores de névoa retiram o líquido carreado pelo gás. Na saída de gás existe ainda outro dispositivo com a mesma função. As placas paralelas da câmara efetuam a separação líquido-líquido.

No vaso de separação bifásica, a fase líquida é composta de água+óleo, o que dispensa a saída de água existente no separador trifásico. O controle também se torna mais simples, pois só são necessários os controles de nível no vaso e da pressão de separação.

2.5 Válvulas de controle

2.5.1 Conceito

A escolha do elemento final de controle mais adequado é de grande importância para o bom desempenho de uma malha de controle, pois ele é o responsável pela modificação de valores diversos para que a variável sob controle seja mantida no valor desejado. Existem diversos tipos de elementos finais de controle, tais como resistências elétricas, bombas, motores, etc., porém o de maior uso e, talvez por isto, o mais importante é a válvula de controle.

De forma genérica, pode-se dizer que a válvula se trata de um dispositivo cuja finalidade é a de provocar uma obstrução parcial ou até total na tubulação com o objetivo de permitir maior ou menor passagem de fluido por esta. Em outras palavras, é todo dispositivo que, por meio de uma parte móvel, abra, obstrua ou regule uma passagem através de uma tubulação. Seu objetivo principal é a variação da vazão do fluxo [25].

Quanto ao seu acionamento, uma válvula pode ser classificada em:

- a) Manual: A operação da abertura e fechamento a ser realizada é feita pelo homem. Em uma válvula de controle pode ser feita utilizando-se de um volante, especificado como um opcional.
- b) Auto-reguladora: A operação de abertura e fechamento é realizada utilizando a energia contida no fluido. Pode ser realizada por válvula auto-operada ou por válvula piloto operada.
- c) Controle: Utiliza-se uma força auxiliar para operação e, o acionamento é feito de acordo com os sinais provenientes dos controladores. Utiliza um tipo de atuador especificado conforme a aplicação.

2.5.2 Tipos de válvulas de controle

Uma válvula de controle consiste basicamente de dois conjuntos principais: Corpo e Atuador. O corpo é a parte da válvula que executa a ação de controle permitindo maior ou menor passagem do fluido no seu interior, conforme a necessidade do processo. Ele pode ser dividido em: corpo, internos (sede, obturador, gaiola) e castelo.

O conjunto do corpo – parte da válvula que entra em contato direto com o fluido – deve satisfazer os requisitos de pressão, temperatura e corrosão do fluido.

O atuador é a parte da válvula de controle responsável pelo seu acionamento e pelo movimento relativo dos internos para a obstrução parcial ou total à passagem do fluxo.

Os tipos de válvulas são classificados em função dos respectivos tipos de corpos, consequentemente quando se fala de tipos de válvulas subentendem-se tipos de corpos.

Os principais tipos de válvulas podem ser agrupados em dois grupos:

- | | |
|--------------------------|---|
| | $\left\{ \begin{array}{l} 1) \text{ Globo Convencional}; \\ 2) \text{ Globo Três vias}; \\ 3) \text{ Globo Gaiola}; \\ 4) \text{ Globo Angular}; \\ 5) \text{ Diafragma}; \\ 6) \text{ Macho}; \\ 7) \text{ Guilhotina}. \end{array} \right.$ |
| a) Deslocamento linear | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | $\left\{ \begin{array}{l} 1) \text{ Borboleta}; \\ 2) \text{ Esfera}; \\ 3) \text{ Globo rotativa}; \\ 4) \text{ Obturador Excêntrico}; \\ 5) \text{ Segmento de Esfera}. \end{array} \right.$ |
| b) Deslocamento rotativo | |
| | |
| | |
| | |

Define-se por válvula de deslocamento linear, a válvula na qual a peça móvel vedante descreve um movimento retilíneo, acionada por uma haste deslizante; enquanto que uma válvula de deslocamento rotativo é aquela na qual a peça móvel vedante descreve um movimento de rotação acionada por um eixo girante.

Para cada tipo de processo ou fluido sempre existirá pelo menos um tipo de válvula que satisfaça os requisitos teóricos de processo, independente da consideração econômica. Cada um desses tipos de válvulas possui as suas vantagens, desvantagens e limitações para um determinado processo.

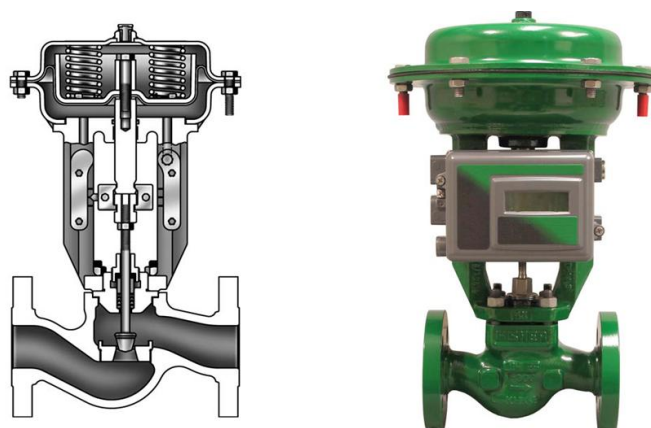


Figura 2.5.2-1 – Válvula de controle convencional

2.5.3 Aspectos do material de construção das válvulas

A seleção do adequado material para construção de uma válvula é um fator de fundamental importância. A sua escolha depende das propriedades e características do fluido em processo: pressão, temperatura, corrosividade e erosividade.

Cabe ao usuário conhecer perfeitamente as características dos fluidos de sua planta industrial, quanto aos efeitos corrosivos e erosivos. A escolha do material da válvula é uma responsabilidade do usuário, podendo este ser suportado tecnicamente pelo fabricante da válvula [25].

As classes de pressão e temperatura, para as partes da válvula que estão sob pressão, foram estabelecidas pelo ANSI (*American National Standards Institute*), para os materiais comumente utilizados. Os materiais recomendados, quanto aos requisitos físicos e químicos são dados pelas Normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Para a corrosão é costume utilizar como guia de orientação as diversas tabelas publicadas em compêndios técnicos, quanto à capacidade de resistência dos diversos materiais. Toda orientação neste sentido não deve ser considerada como definitiva, já que é praticamente impossível catalogar com absoluta certeza as inúmeras aplicações, face às variações que a pressão, temperatura e concentração exercem sobre a característica corrosiva do fluido [25].

A erosão é caracterizada por danos provocados pelo choque de partículas, provenientes do fluido, em alta velocidade sobre as superfícies do material. Na prática, as principais ocorrências de erosão em válvula de controle, acontecem em aplicações com fluidos lamacentos (*slurries*), líquidos com arraste de sólidos e líquidos sob *flashing*⁵ (Figura 2.5.3-1). Para as partes que estão submetidas a uma determinada pressão, a seleção dos materiais é bastante limitada. No geral adota-se a utilização de um tipo de válvula que permita um revestimento interno.



Figura 2.5.3-1 – Válvula com erosão causada por *flashing*

Toda importância que se dá ao material de fabricação também deve considerar a classe de vedação da válvula (classe de vazamento ou estanqueidade) que é o máximo vazamento permissível que escoar através da válvula, quando esta se encontra na posição fechada. A classificação das válvulas quanto a sua classe de vazamento é regida pela norma ANSI/FCI-70-2.

2.5.4 Dimensionamento de uma válvula de controle

O dimensionamento de uma válvula de controle é uma tarefa que envolve uma série de fatores. O tamanho da válvula é normalmente dado por um coeficiente de tamanho, C_v . Este coeficiente é determinado experimentalmente pela passagem de fluido pela válvula. Para líquidos sem *flasheamento*, por exemplo, a vazão através da válvula é dada por:

$$Q = C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P_y}{\rho}}$$

onde ‘Q’ é a vazão; ‘x’ é a posição da haste da válvula expressa em percentagem da abertura; ‘f(x)’ representa a fração da vazão máxima (em função da posição da válvula).

A função ‘f(x)’ representa uma propriedade importante da válvula, a sua característica inerente. A característica da válvula é determinada por diversos fatores, especialmente o

⁵ Fenômeno erosivo ocorrido pela vaporização do líquido quando passa de alta para baixa pressão.

formato do obturador e do assento. Na indústria são comuns as válvulas de característica de vazão linear, onde $f(x) = x$, e as de característica de vazão igual percentagem, nas quais $f(x) = a^{x-1}$, onde 'a' é um parâmetro com valor entre 20 e 50 dependendo do projeto da válvula.

O dimensionamento de válvulas de controle deve levar em conta a faixa de controlabilidade desejada. A queda de pressão na válvula, usada no cálculo do ' C_v ', depende da abertura da válvula e de outros fatores referentes a condições de escoamento (outros equipamentos em série, etc.) [26].

Normalmente as informações necessárias para o correto dimensionamento de uma válvula de controle podem ser agrupadas nos seguintes itens:

- a) Dados quanto ao fluxo
 - Vazão (máxima, normal e mínima)
 - Pressão a montante (P_1) e a jusante (P_2) para vazão máxima, normal e mínima.
- b) Dados quanto ao fluido
 - Identificação do fluido;
 - Estado do fluido (líquido, gasoso, mistura de fases)
 - Densidade, peso específico ou peso molecular
 - Temperatura do fluido
 - Viscosidade (para líquidos)
 - Pressão de vaporização (para líquidos)
- c) Dados quanto à influência da tubulação
 - Existência ou não de reduções ou outros dispositivos causadores de turbulência junto à válvula

2.5.5 Atuadores e acessórios de uma válvula de controle

O atuador constitui-se no elemento responsável em proporcionar a necessária força motriz ao funcionamento da válvula de controle. Ele é um dispositivo que, em resposta ao sinal enviado pelo controlador, produz a força motriz necessária para movimentar o elemento vedante da válvula de controle. O atuador utilizado em aplicações de controle modulado, baseado no meio de produção de sua força motriz, classifica-se basicamente em cinco principais tipos:

- a) Pneumático a mola ou diafragma;
- b) Pneumático a pistão;
- c) Elétrico;
- d) Elétrico-hidráulico;
- e) Hidráulico

Um dos aspectos importantes na especificação de uma válvula de controle é a sua posição de falha, sendo esta falha motivada por falha mecânica do atuador ou por falha no sistema de energia de suprimento. Esta especificação é geralmente ditada pela segurança do processo. Em algumas aplicações, como no suprimento de vapor para um aquecedor, é desejável que a válvula feche na falta de um sinal de comando: esta válvula é chamada de falha-fecha, ou ar-para-abrir. Em outras situações, a segurança do processo exige a abertura da válvula em caso de falha do sistema: falha-abre, ou ar para-fechar. A Figura 2.5.5-1 mostra as combinações entre o obturador e o atuador para as condições de segurança.

Posição de Falha da Válvula	Aberta		Fechada	
Atuador	Direto	Inverso	Inverso	Direto
Obturador (tipo de montagem)	Por cima	Por baixo	Por cima	Por baixo
Esquema				

Figura 2.5.5-1 – Posições de segurança por falha em função das diversas combinações entre atuador e obturador

São chamados de acessórios todos os dispositivos que são utilizados em válvulas para se obter determinadas adaptações ao sistema de controle utilizado ou sofisticações quanto dos mesmos. Os principais tipos de acessórios utilizados são:

- Posicionadores: É o dispositivo que transmite pressão de carga para o atuador, permitindo posicionar a haste da válvula no valor exato determinado pelo sinal de controle.
- “Boosters” pneumáticos: Podendo ser de volume ou pressão, os *boosters* são utilizados para aumentar a velocidade de operação de uma válvula de controle e, no caso do *booster* de pressão, aumentar a pressão vinda do controlador.
- Válvulas solenóide: A sua utilização principal é em aplicações de controle biestável, pilotando uma válvula de controle pneumático, mas também pode ser instalada em aplicações de controle modulado, para serviço de emergência.
- Chaves indicadoras de posição: São utilizadas para indicação remota da posição da haste da válvula. Essa indicação fornecida pela chave indicadora é do tipo de duas posições, ou seja, possibilita a indicação, por exemplo, de válvula fechada e de válvula aberta.
- Válvula fixadora de ar: É uma válvula auxiliar utilizada em aplicações nas quais seja necessário que a válvula mantenha a sua posição caso haja uma queda de pressão de ar de suprimento central da planta.
- Transmissor de posição: É um dispositivo para indicação contínua da posição da haste da válvula.
- Conversores eletro-pneumáticos: Estes dispositivos convertem o sinal elétrico da saída de um controlador eletrônico, em sinal pneumático compatível com o atuador pneumático da válvula de controle. Estes transdutores tanto podem ser corrente, para pressão (I/P), ou voltagem, para pressão (E/P). O sinal de entrada de corrente é aplicado a um eletroímã. O campo magnético criado e a corrente, produzem uma força que desloca a palheta, alterando a posição relativa entre a palheta e o bocal. Isso faz aumentar ou diminuir a pressão no bocal, aumentando ou diminuindo o sinal de pressão para a válvula de controle.
- Conjunto filtro-regulador de ar: Talvez um dos acessórios mais comuns seja o filtro regulador, que é uma válvula reguladora de pressão de ar, do tipo auto-operada, de pequenas dimensões e alta capacidade, com filtro de ar integral. A sua função é a de fornecer ar limpo, a uma pressão constante compatível com os limites de alimentação dos posicionadores.

- i) Volantes manuais: Trata-se de um acessório amplamente utilizado na linha de válvulas de deslocamento linear da haste. Na maioria das válvulas rotativas, o volante faz parte da válvula não sendo considerado como acessório adicional propriamente dito. O volante manual é utilizado para possibilitar uma operação manual de válvula de controle, no caso de falta de ar.

2.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os componentes que fazem parte do processo de elevação artificial por *plunger lift*. Foram mostrados o processo elevatório do método, a medição de golfadas e suas características, o método de medição de vazão mais utilizado e as consequências dessa medição com vazões pulsantes (ocasionadas pelas golfadas), definições de construção dos vasos separadores e características de válvulas de controle.

Como foi visto, os poços de *plunger lift* constituem uma classe especial de poços produtores de petróleo, onde a elevação dos fluidos do fundo do poço até a superfície é realizada com o auxílio de um pistão que funciona como uma interface mecânica entre o gás pressurizado abaixo dele e o óleo produzido acima do mesmo.

Devido a essa característica, golfadas são produzidas e chegam aos vasos separadores no momento de cada ciclo. Isso torna a medição de vazão de gás uma tarefa não trivial, pois esses picos de gás, caracterizando uma vazão pulsante, facilmente ultrapassam os limites de medição do equipamento placa de orifício. Como foi dito, a Norma API-MPMS 14.3-1[27] não recomenda o uso deste tipo de medição na presença de fluxo pulsante.

Assim o desafio que motivou o trabalho em [1], foi encontrar uma alternativa para essa medição.

Consequentemente foi necessário conseguir dados para testar a solução encontrada. Para realizar tais testes e coletar esses dados, o uso do processo real da planta de *plunger lift* se mostrou muito complicado e, algumas vezes, impossível. A planta em produção não pode ser parada para testes e, muitas vezes, a única alternativa é se trabalhar com dados em softwares simuladores.

Este trabalho, então, propôs a alternativa de se criar uma planta-piloto que fosse capaz de produzir os mesmos efeitos de picos de pressão do poço de *plunger lift*. Para isso foi necessário esse estudo aprofundado nos elementos que o compõem, desde o processo de elevação, até os instrumentos utilizados para compor a malha de controle que iria receber a vazão pulsante.

Capítulo 3

Projeto do emulador de escoamentos

3.1 Fluxograma de execução

Com base no trabalho referenciado em [1], pode-se constatar que a simulação de trabalhos e operações relacionados à perfuração, prospecção, produção ou qualquer outra atividade da indústria de petróleo e gás é uma tarefa que demanda estudos complexos e detalhados com bastantes testes.

Nessa área são desenvolvidas soluções e alternativas para melhorar o desempenho das operações, porém existe ainda uma dificuldade para se testar tais métodos.

Por vezes, não se tem como adaptar uma nova alternativa a uma plataforma apenas para testá-la. Portanto, se demora muito até que um projeto totalmente inovador seja, efetivamente, implantado em seu objetivo.

A ideia de um sistema capaz de gerar picos de pressão emulando golfadas de um reservatório de petróleo surgiu dessa necessidade. O trabalho realizado em [1], necessitava de dados que deveriam ser coletados em uma plataforma de petróleo. Muito embora fosse possível conseguir tais dados, não era tão simples, por fatores como deslocamento até a planta, parada de produção para coleta, etc. Isso geraria perda de tempo e dinheiro, pois a parada da produção de um poço, em um único dia, significa perda de faturamento diário, que seria inadmissível para a empresa. Além disso, a instalação de algum outro equipamento na plataforma ocupa espaço e requer utilização de recursos normalmente escassos. Foi então que se teve a ideia do sistema emulador que geraria as condições de escoamento em laboratório.

A ideia de execução do sistema pode ser vista no fluxograma da Figura 3.1-1.

Esse fluxograma mostra o sistema que consiste de um vaso pulmão que é pressurizado por um compressor e o gás nele contido passa para outro vaso separador por meio de duas tubulações em paralelo controladas por válvulas globo manuais.

Inicialmente com o compressor ligado o vaso pulmão é preenchido até uma determinada pressão. Quando as válvulas estão abertas elas permitem a passagem de gás através da tubulação. Porém uma das tubulações contém também uma válvula solenóide que é acionada, abrindo ou fechando, por comando de um CLP. Gás sob alta pressão é, então, liberado através da tubulação. Poderá existir líquido na tubulação, preenchida por meio de uma bomba. Ao se encontrar com o líquido, o gás pressurizado tenderá a empurrá-lo para dentro do vaso separador. O vaso separador bifásico está equipado com sensores ligados ao CLP que realiza um controle de nível e outro de pressão. Há ainda um medidor de temperatura, para simples monitoramento. Assim, cinco supervisões podem ser realizadas no sistema – nível, pressão, vazão, estimação da vazão e temperatura. O controle do líquido é feito por meio de uma válvula presente na saída da bomba. No controle da pressão, a válvula de controle está posicionada na saída do vaso separador e vai liberar o mesmo através da tubulação que, em sua extremidade, contém um medidor de vazão do tipo placa de orifício.

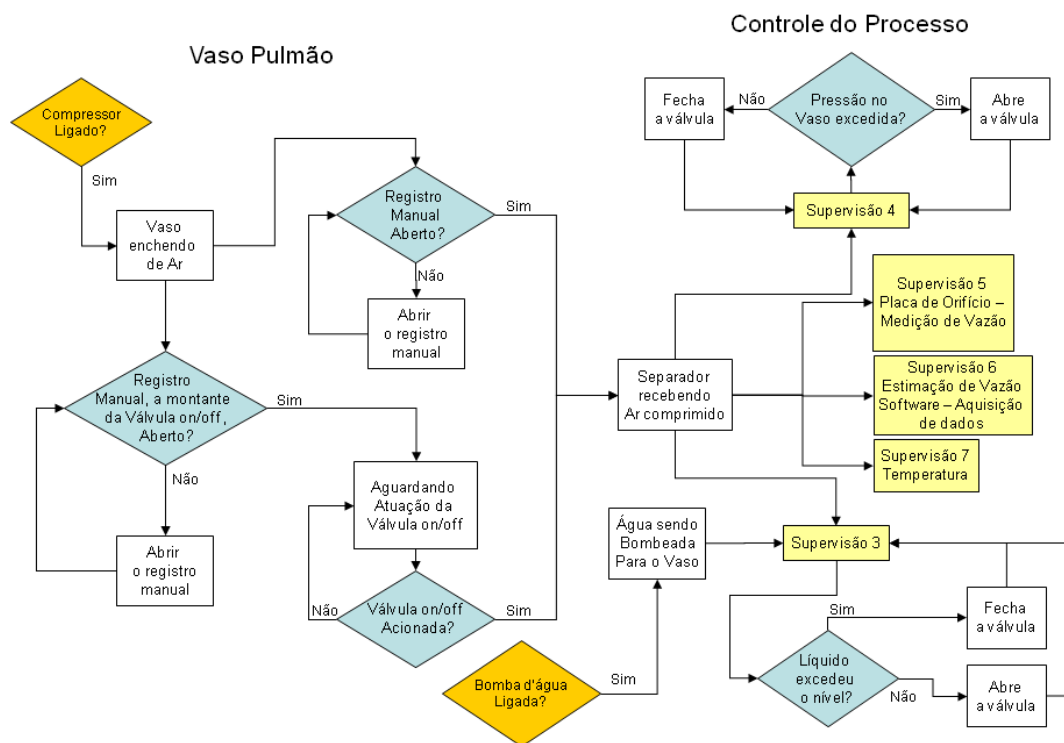


Figura 3.1-1 – Fluxograma do processo

3.2 Parâmetros do processo

Para desenvolver um projeto de engenharia e dimensionar todos os instrumentos que serão utilizados é indispensável definir os parâmetros de processo.

Por meio dos parâmetros é possível definir dados como tipo de válvulas e sensores utilizados no controle, dimensionamento das paredes dos vasos de pressão e das tubulações, etc.

Primeiro foi feita a escolha do tipo de gás e líquido utilizados. Como o projeto não tem intenção de envolver características químicas do processo, as questões de viscosidade, compressibilidade, entre outras relacionadas à mecânica dos fluidos, não foram levadas em conta para efeito de emulação. Assim, foi assumido que o ar e a água fariam papel similar ao gás natural e o óleo do reservatório. Para efeitos mecânicos, os picos de pressão irão ocorrer independente dos fluidos utilizados, portanto a definição dos mesmos é válida.

Outro parâmetro que não será utilizado para efeito de geração de picos é a temperatura. Esse parâmetro foi definido como sendo a temperatura ambiente e poderá ser monitorado.

A pressão foi estimada levando-se em consideração a capacidade do compressor, que pode trabalhar numa pressão de operação de 10 kgf/cm². Então, estipulou-se uma pressão média de 5kgf/cm² e máxima de 6kgf/cm².

Outro parâmetro definido anteriormente a seleção das válvulas de controle foi o diâmetro da tubulação. Serão utilizadas tubulações de ½” e 2”, principalmente devido à saída do compressor já adquirido.

3.3 Memorial de projeto da planta

Após definidos os parâmetros, deve-se especificar a memória do projeto, ou seja, é preciso saber em que regime ele vai trabalhar, quais as válvulas e sensores serão utilizados, as dimensões dos vasos de pressão, etc.

Com a ajuda da empresa especializada foram definidos parâmetros de dimensionamentos de vasos e escolha de válvulas, seguindo os conceitos definidos no item 2.5 deste trabalho. A empresa também foi responsável pela execução da obra. Alguns dados relevantes serão exibidos, mas os detalhes de toda a documentação podem ser encontrados nas referências desse trabalho.

3.3.1 Descrição

O sistema emulará picos de gás semelhantes às golfadas de ar/água. Trata-se de uma planta experimental de golfada composta de um compressor tipo parafuso, dois vasos de pressão com 300 (trezentos) litros hidráulicos e pressão máxima de trabalho admissível de PMTA 13,53kgf/cm². Os volumes serão medidos por placa de orifício e transmissor de pressão diferencial e controlados por válvulas globo especificadas.

Essa definição foi baseada nas necessidades do projeto do trabalho referenciado em [1], outrora citado nesse trabalho.

3.3.2 Legislação

A legislação é fator importante na execução de qualquer obra de engenharia, tanto para questões de padronização, como, principalmente, de segurança.

Conforme já foi citado, as normas que regem o dimensionamento e fabricação de vasos separadores são o código ASME VIII e a norma NR-13.

Outras normas são importantes para a escolha do aço que será utilizado na tubulação, conexões, válvulas e sensores e até mesmo na pintura das linhas de gás e água. A Petrobrás, como uma das grandes empresas de petróleo do mundo e maior do Brasil, tem propriedade para criar e exigir suas próprias normas de fabricação. De acordo com isso outras normas utilizadas foram N-115, N-2630, N-02 e N-1201, todas da Petrobrás. Além disso, foram utilizadas NBRs ISO.

3.3.3 Especificações técnicas do material utilizado

De acordo com os parâmetros do processo, foram definidos os instrumentos utilizados. A descrição de cada equipamento utilizado encontra-se no anexo D deste trabalho.

Todos os dados do material utilizado foram retirados das especificações fornecidas pelos fabricantes e do memorial fornecido pela empresa responsável pela execução da obra.

3.4 Fluxograma de engenharia

Após ser feita toda definição de operações, parâmetros e dimensões, foi possível criar o fluxograma de engenharia para o projeto, esse documento pode ser visualizado no anexo A desse documento.

Esse fluxograma mostra os símbolos da instrumentação com os detalhes de todos os equipamentos utilizados no sistema.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram descritos todos os elementos de construção da planta-piloto. A escolha dos fluidos de trabalho como ar e água, bem como a temperatura ambiente, facilitou e barateou a produção dos vasos de pressão e dos demais instrumentos. Essa escolha se deve ao fato que só é necessário produzir os efeitos de uma vazão pulsante, sem maiores restrições quanto à quantidade de gás ou líquido que passará pelas válvulas. Ou seja, qualquer tipo de fluido capaz de reproduzir os efeitos mecânicos dos escoamentos nas plataformas de petróleo poderia ser utilizado.

Em parceria com a empresa que executou a obra, definiram-se os instrumentos que seriam utilizados. Alguns itens como o compressor e duas válvulas de controle já estavam disponíveis e puderam ser utilizados, o restante do material foi fornecido pela própria empresa.

Além disso, a planta será extremamente flexível, podendo atender, além do projeto que foi proposto, outros trabalhos que envolvem controle de pressão e nível. A forma que foi projetada facilita ainda a substituição de peças, seja para manutenção, seja para mudança das condições de trabalho.

Capítulo 4

Estudo do funcionamento dos equipamentos

4.1 Introdução

Este capítulo descreverá os aspectos de funcionamento dos equipamentos e da montagem da planta. Serão exibidos dados a respeito das condições de segurança e manutenção, bem como a utilização de cada componente. Antes de ligar a planta e colocar o sistema em funcionamento, é estritamente essencial que sejam conhecidas as formas de utilização descritas a seguir.

Para a um bom funcionamento e uma boa conservação dos instrumentos, é necessário que estejam sempre calibrados e, acima de tudo, bem cuidados. Os manuais de cada equipamento, referenciados neste trabalho, devem ser sempre seguidos. É sugerido que se realizem inspeções periódicas nos equipamentos, a fim de manter os instrumentos calibrados e aferidos.

A maior parte deste capítulo foi baseada na referência [23].

4.1.1 Segurança e manutenção

O sistema foi projetado e confeccionado com toda estrutura de segurança possível para as condições de trabalho a ele submetidas.

O compressor está calibrado para uma pressão média de operação de 10kgf/cm², isso significa que ele alimenta os vasos com uma pressão de, no máximo, 10kgf/cm².

A compressão de um gás provoca um aumento na temperatura, por isso é recomendado que os compressores trabalhem em locais abertos e ventilados. Portanto, enquanto estiver ligado, é necessário que a porta da sala esteja totalmente aberta para que o compressor tenha a maior ventilação possível.

Esse equipamento possui um medidor de temperatura que deve ser sempre observado (Figura 4.1.1-1). Se a temperatura exceder os 100°C, é recomendado que o compressor seja desligado, para ser resfriado por algum tempo. Caso a temperatura suba acima de 115 °C, o compressor se desliga por intermédio de um termostato.

Pode-se notar ainda na Figura 4.1.1-1 que o compressor possui um botão de segurança que pode ser acionado para seu desligamento instantâneo. Se esse botão estiver pressionado, o compressor não funcionará. Ele deverá ser acionado apenas quando uma emergência ocorrer e o compressor precisar ser desligado. Contudo é recomendado que quando o compressor já estiver desligado e não estiver sendo utilizado, deve-se deixar o botão pressionado.

Na operação normal, deve-se desligar o compressor somente através do botão “Liga/Desliga”, pois o mesmo necessita de um tempo para se estabilizar e, por isso, seu desligamento demora alguns segundos após esse botão ser apertado.



Figura 4.1.1-1 – Pannel de ligação do compressor com medidor de temperatura

Além da temperatura, as pressões internas são medidas e exibidas em medidores no painel do compressor (Figura 4.1.1-2).



Figura 4.1.1-2 – Medidores das pressões internas

Abrindo a tampa de visita/manutenção do compressor deve-se checar, visualmente, se existe vazamento de óleo, peças folgadas, fios desconectados, nível de óleo na altura do visor de nível (deve sempre estar até 1,8 barg (27 psig), pois acima disso deve ser substituído), deflexão máxima aceitável de 1cm da correia ou algum indício que possa trazer problemas quando for iniciado o funcionamento do equipamento (Figura 4.1.1-3).



Figura 4.1.1-3 – Compressor internamente

4.1.2 Alimentação das válvulas

As válvulas de controle possuem alimentação pneumática, então ar comprimido deve ser enviado para as mesmas, para que estejam em funcionamento. Assim, foi montada uma derivação da linha de ar comprimido que sai do compressor e passa por um regulador de pressão que envia o sinal pneumático para as válvulas (Figura 4.1.2-1).

A alimentação das válvulas deve receber um sinal de 3 a 15psi. A montante da válvula reguladora de pressão existe uma válvula manual de segurança, para o caso de algum problema ocorrer e o gás não passar indiscriminadamente aumentando a pressão e danificando as válvulas de controle.

O regulador está ajustado para liberar ar comprimido numa pressão de 4 bar, o que é suficiente para alimentar as válvulas do sistema. Essa pressão não chega diretamente a uma das válvulas de controle, o que poderia causar danos devido à alta pressão. Ela passa por um conector onde as válvulas de controle estão ligadas em paralelo e, nesse ponto, a pressão de 4 bar cai para um valor suficiente e considerável de alimentação.

Devido à alta pressão e às dimensões pequenas do sistema, é natural criar um condensado de água dentro da válvula reguladora de pressão. É importante sempre esvaziar essa água que se acumula, girando o pequeno dreno existente na parte inferior da mesma. Caso não seja feito com frequência, o acúmulo dessa água pode começar a ser enviado para as válvulas de controle, danificando assim seu funcionamento.



Figura 4.1.2-1 – Derivação da linha de gás para alimentação das válvulas e válvula reguladora

4.1.3 Vaso pulmão

Conforme mencionado no item 2.5.4, o sistema possui dois vasos de pressão – o vaso pulmão e o vaso de separação. O vaso pulmão é o primeiro vaso, que recebe o ar comprimido diretamente do compressor. Sua finalidade é servir de reservatório de ar comprimido, pressurizado. Este poderá ser liberado da forma mais conveniente e necessária que se deseje, sendo regulado por válvulas manuais de gás que irão controlar a vazão de saída do vaso pulmão.

Assim como a válvula reguladora, o vaso pulmão também possui uma válvula manual a montante, que libera o fluxo de ar comprimido do compressor apenas quando aberto.

Esse vaso é equipado com um manômetro, um dreno e uma válvula de escape. O manômetro deve sempre ser observado, pois é o instrumento que mostrará a pressão atual no vaso.

O compressor é regulado para manter a pressão de 10kgf/cm² dentro desse vaso. Se esse valor aumentar, a válvula de escape na parte superior do vaso será acionada, fazendo um efeito similar ao da panela de pressão, liberando o gás excedente e mantendo a pressão estável.

O dreno na parte inferior serve para esvaziar água do vaso que, eventualmente, se acumula por fatores como condensados de ar, retrocesso da água do sistema de líquido, etc.

A Figura 4.1.3-1 mostra o vaso pulmão instrumentado com o manômetro, a válvula de escape e o dreno.

Poderá ser visto mais adiante nesse documento que experiências com o líquido podem ser feitas sem a utilização de ar comprimido, ou seja, à pressão atmosférica. Nesse caso o vaso pulmão pode ser usado como reservatório de ar para a alimentação das válvulas de controle em substituição do compressor, que pode ficar desligado evitando gastos de energia e trabalho, além de diminuir o ruído geral do sistema.

Como as válvulas consomem muito pouco de ar comprimido para funcionar e, como o vaso possui um volume de 300 litros, todo o gás acumulado é suficiente para se trabalhar com o compressor desligado, desde que experiências com gás não sejam realizadas.



Figura 4.1.3-1 – Vaso pulmão do sistema

4.1.4 Válvulas manuais de controle de gás e válvula solenóide

As válvulas manuais de controle de gás impedem, quando fechadas, a passagem de ar comprimido do vaso pulmão para o vaso separador. A válvula solenóide é utilizada para liberar o ar comprimido sem controle gradativo, ela apenas abre e fecha, por meio de um comando do CLP. A Figura 4.1.4-1 mostra as válvulas manuais em paralelo e a solenóide.

Experiências com o vaso separador pressurizado e a válvula de controle de pressão totalmente aberta foram realizadas e chegou-se a conclusão que não seria possível atingir baixas pressões para experiências de controle, caso a válvula manual estivesse toda aberta.

Devido ao diâmetro da linha ser muito grande para a passagem de gás pressurizado (1/2”), é necessário que se regule quanto de gás pode passar pela tubulação.



Figura 4.1.4-1 – Válvulas manuais de controle de gás e válvula solenóide

Então as válvulas manuais foram pintadas com valores que correspondem a pressões mínimas que podem ser estabilizadas no caso da válvula de controle de pressão estar totalmente aberta (Figura 4.1.4-2). Por exemplo, para uma vazão de gás máxima na saída do vaso de separação, se a válvula manual de entrada for aberta até a marca de 0,5 significa que o vaso separador se estabiliza em 0,5kgf/cm², se for aberta até 2, significa que o vaso separador se estabiliza em 2kgf/cm². E assim por diante.

Essa experiência foi realizada com a válvula manual a montante da válvula solenóide da mesma forma. Foi observado que quando essa válvula estiver aberta até 2, se houver um acionamento da solenóide, a pressão no vaso de separação vai aumentar em 2 kgf/cm², considerando a vazão máxima na saída do vaso de separação. Se a solenóide se mantiver aberta, a nova pressão mínima no vaso será a soma dos valores marcados pelas duas válvulas manuais.

É óbvio que essas medidas pintadas são experimentais e podem conter pequenas diferenças, pois as válvulas manuais não são instrumentos munidos de medidores precisos. Porém, para resultado das experiências, a relação é válida e pode ser utilizada para projetos de controle.



Figura 4.1.4-2 – Válvulas manuais de controle de gás.

Pode-se notar nas figuras que as válvulas estão em paralelo. E como já foi mencionado, uma delas possui uma válvula de controle em série – a válvula solenóide ou válvula on/off. Essa válvula é acionada por meio de um comando do CLP. Ela tem o objetivo de gerar um pico de pressão no vaso de separação. Para que isso seja possível, a válvula manual a montante deve ser aberta numa vazão desejada. O ar comprimido será contido pela válvula solenóide. Por intermédio de um comando do CLP, a solenóide é aberta. Essa abertura é instantânea e faz com que o ar comprimido seja liberado rapidamente, gerando um aumento de pressão no vaso de separação.

Essa experiência também faz com que seja gerado um aumento na vazão, na saída do vaso de separação, esse ponto será abordado no capítulo de medição de vazão.

Embora seja possível abrir a válvula a montante da solenóide completamente, isso não deve ser feito. Pois o efeito do pico de pressão instantâneo pode causar descalibração dos equipamentos de medição. Portanto é recomendado que sejam usados os limites mínimos pintados nas válvulas, por exemplo, entre zero e dois na válvula a montante da solenóide e 0,5 na válvula em paralelo.

4.1.5 Líquido e medição de nível

O funcionamento do sistema com líquido ocorre todo no vaso de separação (Figura 4.1.5-1). Inicialmente a bomba alternativa deve ser ligada, utilizando-se um interruptor existente dentro da sala onde se encontra o compressor. Após isso, a mesma começará a bombear água de um reservatório para a tubulação do sistema, em direção ao vaso de separação.



Figura 4.1.5-1 – Vaso de pressão separador bifásico

O sistema de nível pode ser utilizado à pressão atmosférica, ou seja, pode ser independente da entrada de ar comprimido do vaso pulmão. Caso essa configuração sem pressão manométrica seja utilizada, as válvulas apresentadas no item 4.1.4 devem estar fechadas, para evitar que a água entre pela tubulação em direção ao vaso pulmão.

Se o sistema for utilizado dessa forma, o compressor não precisa ficar ligado todo o tempo, pois, uma vez o vaso pulmão pressurizado com ar comprimido, ele pode servir como reservatório para a alimentação da válvula de controle de nível. Essa válvula possui um consumo de sua alimentação muito pequeno, isso faz com que a pressão no vaso pulmão demore a cair, justificando a utilização do mesmo como reservatório de ar comprimido.

Porém, para utilizar essa configuração, o controle de nível deve ser feito com o dreno do vaso separador aberto, pois sem o ar comprimido entrando pela tubulação, não há possibilidade de força de arraste⁶ que faça a água sair pela parte superior do reservatório.

O nível de água no vaso de separação pode ser observado através de um medidor instalado na parte posterior do mesmo (Figura 4.1.5-2).

⁶ Na dinâmica dos fluidos, **arrasto** é definido como a componente da força, paralela à velocidade de aproximação, que o fluido em movimento exerce sobre o corpo. [24]



Figura 4.1.5-2 – Medidor de nível no vaso separador – dreno aberto na parte inferior

O medidor visual é apenas um recurso para acompanhar de forma mais clara o nível do líquido no vaso. O sistema possui um sensor que calcula o diferencial de pressão pelo peso da coluna d'água do vaso separador (Figura 4.1.5-3). Então o sinal correspondente a esse diferencial de pressão é enviado ao CLP e o nível pode ser calculado.



Figura 4.1.5-3 – Sensor medidor de nível por pressão diferencial

A calibração desse sensor foi feita de acordo com o medidor visual, sendo estabelecido que o nível totalmente vazio, o zero do sistema, é equivalente ao medidor estar com o mínimo de água. Já o nível máximo, o span, se dá quando o medidor estiver totalmente cheio de água. E essas medidas são dadas em porcentagem de água no vaso. Ou seja, 100% do nível equivalem ao medidor visual totalmente cheio e 0%, totalmente fechado.

O sensor mede o diferencial de pressão no vaso de separação e envia um sinal de 4-20mA para o controlador (CLP), sendo o sinal de 4mA equivalente ao menor nível e 20mA ao maior. O controlador faz o cálculo matemático de controle e envia um sinal de controle de 4-20mA para a válvula de nível, fazendo-a abrir ou fechar controlando a passagem de água para dentro do vaso separador (Figura 4.1.5-4).



Figura 4.1.5-4 – Bomba alternativa e válvula controladora de vazão de água

A jusante da válvula controladora existe uma válvula manual de segurança para impedir a passagem de fluidos através dessa tubulação. Para que o líquido seja utilizado, essa válvula deve estar aberta.

O funcionamento da bomba independe do controle, isso significa que ela continuará bombeando água do reservatório, mesmo que o nível tenha sido atingido e esteja controlado.

Essa bomba deve operar até 10kgf/cm^2 , pois, sendo uma bomba alternativa de deslocamento positivo, foi instalada uma chave de pressão elétrica e uma válvula de alívio, com retorno para caixa d'água, ambos calibrados PA 11kgf/cm^2 para proteger o sistema, já que a bomba alternativa pode bombear até 450 l/h a 1300 psi (Figura 4.1.5-5) [23].



Figura 4.1.5-5 – Sistema de segurança da bomba – água retorna ao reservatório

Pode-se notar pela Figura 4.1.5-5 que o reservatório é um sistema caixa d'água. As bóias fazem o controle mecânico de água na entrada do reservatório, quando o mesmo está cheio, as bóias fecham a passagem de água. Se água for bombeada para a tubulação, o reservatório começa a secar e as bóias liberam a passagem de água. Como a bomba não para de bombear, se houver um bloqueio no sistema e a água começar a retornar ao reservatório, o mesmo vai encher, fazendo as bóias restringirem a passagem de água na entrada à medida que o nível aumenta. Se esse bloqueio de água do sistema for total, toda água bombeada irá retornar ao reservatório. Assim, só haverá água entrando e nenhuma saindo. As bóias irão se fechar totalmente, quando o nível máximo for atingido. Pode-se então concluir que, num momento em que a válvula de controle está estabilizada, a quantidade de água que está entrando no sistema é igual à quantidade de água que entra no reservatório, por intermédio das bóias.

Existe ainda outra forma de se fazer o controle de nível. Se o dreno do vaso separador estiver fechado e o sistema de nível trabalhar juntamente com o sistema de gás, o vaso

separador estará pressurizado numa pressão manométrica diferente da pressão atmosférica. Nesse caso, se um pico de pressão for gerado pela válvula solenóide, dependendo do nível de água e da pressão no vaso separador, pode ocorrer um arraste, e a água ser expelida pela saída de gás na parte superior do vaso pulmão.

Esse fenômeno acarretaria diminuição de nível, fazendo com que o mesmo procedimento de controle fosse adotado, a diferença seria na forma onde o vaso separador perderia água.

Porém, para a vazão máxima da bomba e as pressões máximas adotadas nesse trabalho, esse estado é muito difícil de atingir. Além do mais, o vaso separador é equipado com placas defletoras que servem como barreiras para o gás com gotículas de água. Esse gás, ao entrar no separador, bate nas placas com violência devido à alta pressão e parte da água presente no gás é liberada, coalescendo-se.

4.1.6 Gás e medição de pressão

O sistema de medição de pressão está instalado no vaso separador de forma similar ao sistema de medição de nível.

Para se trabalhar com controles e variações na pressão do vaso separador, o compressor deve estar ligado, o vaso pulmão deve estar pressurizado e as válvulas manuais reguladoras de vazão de gás, citadas no item 4.1.4, abertas. É importante sempre lembrar que essas válvulas devem ser abertas de forma regulada para não exceder a pressão limite de trabalho, que foi proposta nesse documento.

Como pode ser visto na Figura 4.1.5-1, o vaso separador possui um manômetro que mostra a pressão interna. É fundamental que, durante os experimentos, a pressão desse manômetro seja sempre observada, para se ter certeza que o vaso estará trabalhando nas condições de pressão estipuladas.

Quando o ar comprimido sai do vaso pulmão chegando ao separador, a pressão no segundo começa a subir. O sensor de pressão ligado ao vaso fica monitorando essa pressão e envia para o CLP um sinal de 4-20mA (Figura 4.1.6-1). Assim como no sensor de nível, 4mA equivale a menor pressão ou pressão atmosférica e 20mA equivalem a máxima pressão no vaso.



Figura 4.1.6-1 – Sensor medidor de pressão

Esse sinal é enviado ao CLP que, por meio de cálculos matemáticos, elabora uma resposta de controle, enviada em seguida para a válvula de controle de pressão (Figura 4.1.6-2).



Figura 4.1.6-2 – Válvula de controle de pressão

Quando é necessário diminuir a pressão no vaso separador, essa válvula é aberta, liberando ar comprimido. Essa liberação fará com que a massa de ar no vaso diminua, diminuindo sua pressão.

Como foi citado no item 4.1.4, a válvula solenóide, ou válvula on/off, é usada para gerar um pico de pressão no vaso separador. Com a válvula a montante aberta, quando a solenóide é acionada, ela libera rapidamente o gás, gerando um aumento considerável de vazão de entrada e, conseqüentemente, um pico de pressão no vaso separador. O CLP recebe esse sinal do sensor e realiza o controle para estabilizar a pressão.

4.1.7 Gás e medição de vazão

À medida que é feito o controle de pressão no vaso separador, o ar comprimido vai sendo liberado pela válvula de controle. Essa quantidade de ar que é liberada representa a vazão de gás do sistema, que vai passar pela placa de orifício.

A placa de orifício é o tipo de sensor de vazão mais comum do mercado. Como já foi dito anteriormente, consiste numa placa com um orifício no meio, onde a passagem de gás através do mesmo gera um diferencial de pressão a ser medido.

No caso desse sistema, o medidor de vazão (Figura 4.1.7-1) mede esse diferencial de pressão e envia um sinal de 4-20mA para o CLP, onde 4mA representa o diferencial mínimo e 20mA representa o máximo.

O medidor está calibrado para medir um diferencial de pressão que varia de 0 a 100inH₂O. Essa medida de pressão pode ser usada para se calcular a vazão através da placa de orifício.



Figura 4.1.7-1 – Medidor de vazão

A medição é feita quando o gás passa por dentro do medidor de vazão, que está protegido por um *manifold*⁷ (Figura 4.1.7-2). Este último regula a passagem de gás através de pequenos registros em forma de “T” chamados manípulos. Para a medição é necessário que os manípulos laterais do *manifold* estejam se comunicando com o sistema (abertos) e o manípulo central do mesmo não esteja comunicando (fechado). Numa operação onde não seja necessária a medição de vazão, o manípulo central do *manifold* deve estar comunicando e os laterais não devem estar comunicando. Recomenda-se não abrir os manípulos até o limite. Altas pressões podem prendê-los, dificultando seu fechamento. É suficiente girar até o final e, em seguida, retornar 10°.

OBS: Os manípulos do *manifold* nunca devem ficar fechados ao mesmo tempo. Se necessário mudar a configuração, abrir primeiro os manípulos fechados e, em seguida, fechar os que se desejam, caso contrário pode ser criada uma situação em que toda a pressão proveniente do vaso será impressa no diafragma existente na parte interna do medidor, podendo romper o mesmo e danificar o equipamento.



Figura 4.1.7-2 – Manifold do medidor de vazão

Para o projeto de placas de orifício, é necessário um alto cálculo matemático, envolvendo variáveis de processo como pressão, velocidade do escoamento, densidade e viscosidade dos fluidos, etc. Hoje em dia, as empresas usam simuladores para realizar tais cálculos. Dessa forma, foram projetadas três placas para uso no sistema, diferenciadas no tamanho do orifício (7,1, 8,2 e 9,1 mm) como mostra a Figura 4.1.7-3.

Embora seja um método muito utilizado de se medir vazões, a placa de orifício não é capaz de medir qualquer diferencial de pressão. Uma das maiores limitações deste tipo de medidor é a sua rangeabilidade, ou seja, a razão entre a vazão mínima e a vazão máxima onde a placa de orifício pode ser utilizada. Esta razão normalmente é da ordem de 1:3 ou 1:4 o que torna a tarefa de medição de gás em golfadas muito mais complexa [1]. Para se ter uma medição com menos saturação, é necessário se calcular a relação entre o diâmetro do orifício o diâmetro da tubulação, levando-se em consideração características do fluido. Além disso, é preciso levar em consideração que a pressão diferencial gerada pela placa é proporcional ao quadrado da vazão, assim essa relação não linear torna pequena a rangeabilidade da medição.

Portanto não é suficiente ter um orifício maior ou menor para variar o range de vazão. Deve-se fazer um estudo detalhado para se alcançar o tamanho ideal para o orifício. Na descrição das placas de orifício na Tabela D-9, pode-se observar as pressões máximas atingidas para o fator β de cada placa. Esse fator é a relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação. Nota-se que, apesar da placa de 9,1mm de orifício ter um maior fator β comparado às outras placas, ela não possui um maior range de pressão.

Podem ser realizados estudos trocando as três placas e vendo os resultados.

⁷ As válvulas Manifold são válvulas de bloqueio indicadas para instalação de transmissores de pressão diferencial, transmissores de pressão ou manômetros.



Figura 4.1.7-3 – Placas de orifício de 7,1 e 9,1mm do projeto

Para realizar a troca das placas existentes é necessário seguir os seguintes passos:

- 1) Retirar toda a pressão do sistema e desligar os equipamentos para que não sofram avarias;
- 2) Desmontar os flanges (Figura 4.1.7-4), folgando as porcas e retirando a metade dos pernos⁸ existentes;
- 3) Separar os flanges desenroscando o parafuso e girando-o no sentido horário;
- 4) Retirar o conjunto antigo (placa de orifício + juntas);
- 5) Instalar as novas juntas e alinhar a placa de orifício ao diâmetro interno da tubulação;
- 6) Encaixar novamente os flanges girando no sentido anti-horário e apertar o parafuso. Não muito apenas para fixar;
- 7) Recolocar os pernos e apertá-los utilizando um padrão de rodízio tipo estrela, para que não haja desalinhamento dos flanges nem da placa;
- 8) Apertar o parafuso;



Figura 4.1.7-4 – Flanges que prendem a placa de orifício. Está ligada ao medidor de vazão.

4.1.8 Temperatura e conversores IP

A temperatura do sistema pode ser monitorada por um sensor instalado na tubulação de saída do vaso separador (Figura 4.1.8-1). Como o sistema trabalha à temperatura ambiente, não é necessário um controle dessa grandeza.

Assim como os demais sensores, o medidor de temperatura envia um sinal de 4-20mA para o CLP e este sinal pode ser monitorado.

⁸ Espécie de parafuso. Não possui cabeça, apenas corpo cilíndrico e rosqueado.



Figura 4.1.8-1 – Sensor de temperatura. Fiação ligada ao CLP que envia sinal de 4-20mA

Os conversores são instrumentos que convertem o sinal de corrente proveniente do CLP para um sinal pneumático e envia esse sinal para as válvulas de controle. A Figura 4.1.8-2 mostra os conversores IP da planta.



Figura 4.1.8-2 – Conversores IP

4.1.9 Controlador Lógico Programável (CLP)

O controlador lógico programável, ou CLP, é o instrumento responsável pelas ações inteligentes do sistema. Como já foi citado em alguns itens desse capítulo, nesse instrumento são configurados os algoritmos de controle que enviam os sinais de atuação para as válvulas. Ele recebe e envia sinais de corrente de 4-20mA que são interpretados seja pelas válvulas (depois de convertidos para um sinal pneumático) ou pelo computador (depois de convertido para um sinal binário).

A utilização das entradas e saídas analógicas e digitais do CLP é mostrada na Tabela 4.1-1.

Tabela 4.1-1 – Configuração dos Sinais do Sistema no CLP

Sinal do sistema	CLP
Transmissor de Temperatura (TT)	E4 – Entrada analógica
Transmissor de Nível (LT)	E5 – Entrada analógica
Transmissor de Pressão (PT)	E6 – Entrada analógica
Transmissor de Vazão (FT)	E7 – Entrada analógica
Válvula de controle de Pressão (PY)	S0 – Saida analógica
Válvula de controle de Nível (LY)	S1 – Saida analógica
Ativação do Solenóide (XY)	O16 – Saida digital

Alimentado por uma fonte DC, o CLP envia os sinais ao computador por um cabo serial. A Figura 4.1.9-1 mostra a ligação das entradas e saídas digitais e analógicas do CLP e sua alimentação.



Figura 4.1.9-1 – Fiação e instalação do CLP

Existe ainda um software gratuito fornecido pelo fabricante que é utilizado para as configurações do CLP. O software, chamado SPDSW (Figura 4.1.9-2), é o ambiente desenvolvido para a configuração, programação, depuração, documentação de programas, e supervisão dos controladores da HI tecnologia. Integrado em um único aplicativo, o SPDSW oferece todos os recursos encontrados nos pacotes de programação para o CLP, incluindo depuração, monitoramento on-line de variáveis e completa integração com as IHM's (Interfaces homem máquina) da HI [19].

Neste trabalho o SPDSW foi utilizado na calibração dos sensores, no monitoramento dos sinais, no desenvolvimento e supervisão do algoritmo PI. Para a utilização, recomenda-se o uso do help contextual incorporado no ambiente de trabalho do mesmo ou o acesso ao site referenciado neste trabalho.



Figura 4.1.9-2 – SPDSW – Tela inicial

4.2 Conclusão

Este capítulo mostrou todo funcionamento da planta-piloto, ressaltando os aspectos de ligação e manutenção. Assim, está elaborado um manual de utilização do sistema – presente no anexo C deste trabalho – que deve ser seguido para manter a calibração e manutenção dos equipamentos.

De acordo com os testes desenvolvidos, o comportamento da planta foi bastante satisfatório. A operação dos testes para desenvolvimento desse manual mostrou que os efeitos de picos de vazão desejados foram conseguidos, porém ainda sem mostrar coleta de dados ou desenvolvimento de malha de controle. Esses aspectos serão abordados no próximo capítulo, que trará todas as experiências realizadas até o momento.

Capítulo 5

Experiências de controle e medição de vazão

5.1 Introdução

Durante o processo de desenvolvimento do manual de utilização, foram realizadas experiências de controle e análise de sinal dos sensores. Foram feitos controles de nível, pressão e medição de vazão, bem como aquisição de dados do sinal de controle da planta e do diferencial de pressão gerado pela placa de orifício.

Foram utilizados os softwares SPDSW, da HI tecnologia (fabricante do CLP), e o software de supervisão do CLP, criado pelo aluno de engenharia de computação Danielson Xavier da UFRN. O software supervisor tinha como diferencial a possibilidade de se monitorar e alterar os parâmetros dos controladores de nível e gás ao mesmo tempo, monitorar o sinal de vazão, além de fazer a aquisição de dados dos sinais para armazená-los em arquivos.

O objetivo desse capítulo foi exibir os resultados obtidos analisando os dados e comparando com o objetivo principal que é validar uma correlação entre o sinal de controle do controle de pressão no vaso separador e o sinal do sensor de vazão medido.

Experiências de controle de nível e pressão independentes foram realizadas para mostrar que a planta pode ser utilizada em outros trabalhos acadêmicos. Os controladores foram ajustados de forma empírica, não sendo feito um estudo detalhado sobre isso.

5.2 Monitoramento dos sinais

O primeiro passo para a verificação dos sensores, foi o monitoramento dos sinais medidos.

A planta possui quatro sensores trabalhando e fazendo a aquisição dos dados: pressão, nível, vazão e temperatura.

Os sensores de pressão, nível e vazão trabalham analisando a pressão, a diferença é que, nos dois últimos, mede-se o diferencial de pressão para então ser calculada a grandeza a qual estão destinados a medir.

O CLP capta os sinais enviados pela planta e os guarda na memória do módulo ZEM400, onde há uma conversão do sinal de corrente para um dado binário armazenado.

Para essa análise desses dados, foi utilizado o software SPDSW da HI tecnologia. Esse software possui o driver de ligação com o CLP. Os dados são lidos pelo programa e mostrados na tela.

A Figura 5.2-1 mostra a tela de configuração do módulo ZEM400, onde podem ser vistos os sinais das memórias do CLP. Nota-se que o próprio software já faz a conversão do dado binário na unidade desejada.

Os sinais de entrada analógica estão calibrados do EA4 ao EA7, já a saída analógica é representada pelos SA0 e SA1, assim como mostra a Tabela 4.1-1. Essa tela de configuração do módulo é utilizada para calibrar as entradas de acordo com o envio de sinal da planta. A

forma de calibração dos sinais pode ser encontrada nos manuais dos sensores, referenciados nesse trabalho.

Embora o software SPDSW faça a conversão direta dos valores binários armazenados na memória do CLP e converta em valores de corrente, o desenvolvimento de qualquer outro software que acesse essa memória, deve conter uma equação para conversão, se for desejado mostrar os valores reais medidos na planta.

Pode-se observar, pela figura, que na coluna “Valor Atual”, todos os sinais estão chegando ao CLP, visto que o mínimo é um sinal de 4mA. A partir desse ponto, foi realizada a primeira experiência de controle – O controle de nível.

Configuração do Módulo ZEM400

Config. do filtro de entrada analógica
Nro. de Amostras Aquisição [1..12] 8 73.2 %/seg

Calibração da entrada analógica
Offset= [0..100%] Ganho= [0..2]

Canal	Unidade	Valor Atual	OffSet	Ganho
EA0	mA	INV	19,83	1,26
EA1	mA	INV	19,83	1,26
EA2	mA	INV	19,83	1,26
EA3	mA	INV	19,83	1,26
EA4	mA	7,81	19,83	1,26
EA5	mA	5,38	19,83	1,26
EA6	mA	4,47	19,83	1,26
EA7	mA	19,99	19,83	1,26

Calibração da saída analógica
Offset= [0..100%] Ganho= [0..2]

Canal	Unidade	Valor Teste	OffSet	Ganho
SA0	mA	20	19,54	0,78
SA1	mA	20	19,54	0,78

Configuração da saída digital Q16
☒ Saída digital simples
☐ Saída de frequência programável (0..4000 Hz) + PWM
 Frequência [Messenger Hz] Ciclo de Traj [Messenger %]

Configuração do canal digital Q19
☒ Saída digital simples
☐ Saída de frequência programável (16..2000 Hz)

Configuração do estado
 Programação Habilitada

Figura 5.2-1 – Tela de configuração do módulo ZEM400

5.3 Controle de nível

Antes de realizar a primeira experiência, foi necessário fazer a calibração entre o sinal da saída da planta e o nível que representava. O marcador visual de nível (Figura 5.3-1) foi marcado utilizando uma régua e dividido de forma que o maior ponto medido seria considerado 100% do nível e o menor ponto medido seria considerado 0% do nível.

A interface de calibração do programa SPDSW para calibrar os sinais do módulo ZEM400, encheu-se o vaso até a marca de 0%, então o sensor foi calibrado para ter esse como o “zero”. Em seguida, encheu-se o vaso até 100% e o sensor foi calibrado para ter esse ponto como “span” (traduzido do inglês - alcance).

Como foi citado no item 5.2, o programa supervisorio desenvolvido deveria conter equações para a conversão, pois a leitura da memória do CLP lhe traria um valor inteiro representando o sinal binário. Assim foi feita uma avaliação enviando um sinal de 4-20mA no CLP. O valor de 4 mA era representado pelo valor inteiro 0, já o 20mA era representado pelo valor 4095. Assim, para se obter o nível, foram usados os valores de calibração de 0-100%, ao invés de 4-20mA.



Figura 5.3-1 – Medidor visual de nível marcando as porcentagens medidas

Encontrando a inclinação da reta, utilizando dois pontos:

$$y - y_0 = m(x - x_0)$$

$$100 - 0 = m(4095 - 0)$$

$$m = 100 / 4095 \cong 0,0244$$

Encontrando a equação da reta:

$$y - y_0 = m(x - x_0)$$

$$y - 0 = 0,0244(x - 0)$$

Onde o x representa o valor dos bits de 0-4095 e o y representa o nível de 0-100%

$$\boxed{nivel = 0,0244bits} \text{ (Equação 1)}$$

Conforme foi descrito no item 4.1.5 deste trabalho, o dreno do vaso de separação foi mantido aberto numa determinada vazão. Em um primeiro momento, o vaso estava à pressão atmosférica.

O CLP foi, então, programado com um controlador PI e seus parâmetros foram estimados empiricamente, por meio de tentativas.

A Figura 5.3-2 mostra a tela do software supervisor criado para monitorar os sinais de pressão, vazão e nível respectivamente. Nela pode-se observar o comportamento do sistema com as mudanças dos parâmetros do controlador PI.

Inicialmente não há sinal no monitor de pressão, pois o vaso está à pressão atmosférica. A vazão também apresenta um valor quase nulo, pois o fluxo de ar que passa através da placa de orifício é mínimo, minimizando, também, o diferencial de pressão.

Devido às dimensões do vaso de separação e às vazões de entrada e saída de líquido, o sistema foi caracterizado como um sistema lento, o que tornou o ajuste dos parâmetros difícil. No tempo entre 0 e 1000 segundos, o controlador possuía parâmetros que levavam a resposta da planta a convergir para a referência (*setpoint*), porém de forma oscilatória. O sinal de controle também apresentava muitas variações. Só a partir de 2000 segundos, o ajuste dos parâmetros foi sendo refinado e, mesmo havendo pequenas oscilações na saída da planta, o sinal de controle foi suavizado. Em aproximadamente 2800 e 3600 segundos, a referência foi alterada e o controlador conseguiu fazer com que o nível seguisse a referência desejada.

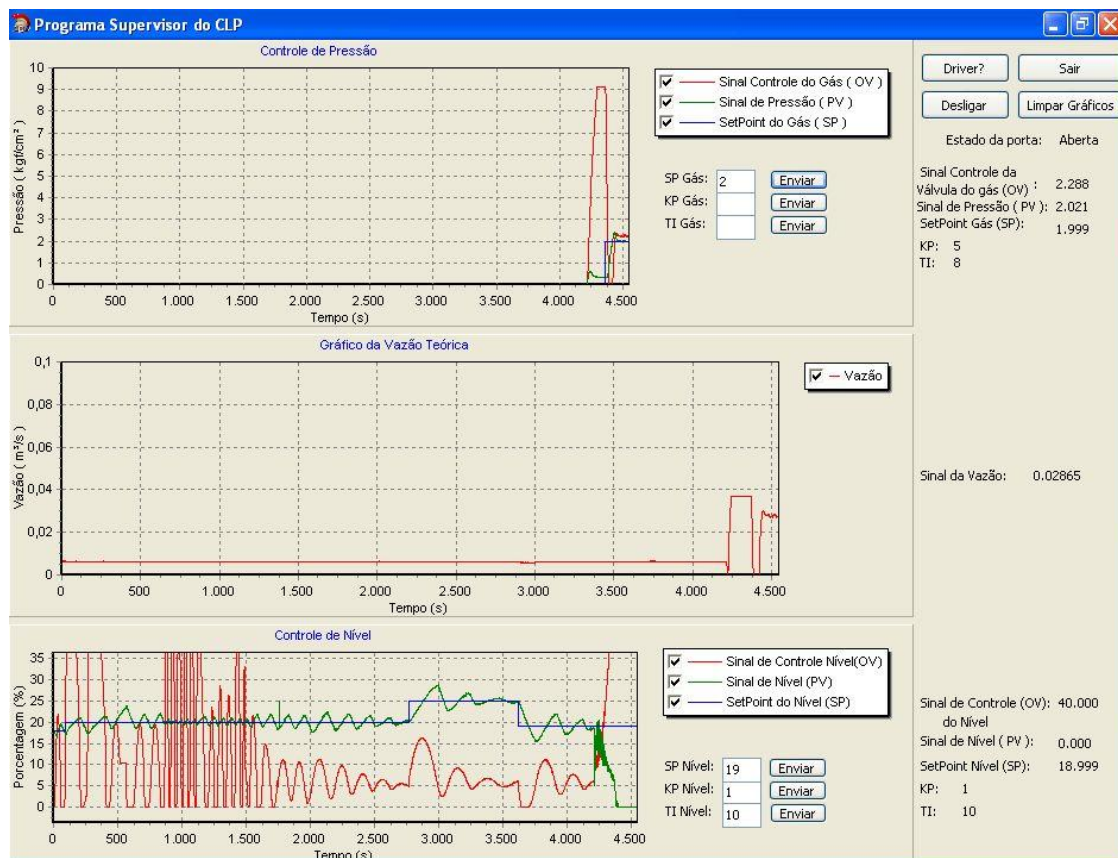


Figura 5.3-2 – Software de monitoramento de sinais

Apesar do controlador não estar perfeitamente ajustado, essa experiência mostrou a capacidade de se controlar o nível nessas condições.

Por volta de 4200 segundos, o sistema de pressurização do vaso separador foi acionado. Pelo gráfico da pressão pode-se observar que o sinal de saída de pressão da planta começa a subir e o controlador de pressão começa a atuar. A vazão também teve seu valor alterado, pois começa a aparecer uma diferença de pressão medida na placa de orifício. Essas duas medições serão explicadas nos próximos itens deste capítulo.

Como as condições físicas de controle mudaram, os parâmetros não servem mais para o controle de nível. Pode-se observar que o sinal de controle da válvula de líquido chega ao seu máximo, permitindo vazão total, mas essa vazão não é suficiente para manter o nível controlado. Quando a pressão no vaso aumenta, a vazão de líquido no dreno também aumenta, fazendo com que a vazão de saída seja muito maior que a vazão de entrada. Assim, todo o líquido do vaso é expelido através do dreno.

Para se realizar o controle novamente seria necessário diminuir a abertura do dreno de tal forma que as condições anteriores fossem atingidas, ou seja, a vazão de entrada e a vazão de saída estivessem em equilíbrio. Caso não seja possível atingir esse estado, outra alternativa seria trocar a bomba, para uma com vazão maior.

5.4 Controle de pressão

A segunda experiência realizada foi o controle de pressão no vaso separador. Com certo nível de líquido mantido e o dreno fechado, foi liberado para o vaso separador, através das

válvulas descritas no item 4.1.4, ar comprimido que estava armazenado no vaso pulmão. Esse ar preencheu o vaso, aumentando sua pressão interna.

Para se ter a noção exata do valor de pressão no vaso para cada valor de corrente do sensor enviado ao CLP, foi preciso encontrar a equação de conversão. Para tal, a experiência realizada seguiu os seguintes passos:

- 1) Foi aplicado um sinal de 20mA à válvula de controle de vazão de gás. Isso fez com que ficasse toda aberta e a vazão máxima fosse atingida.
- 2) A válvula de vazão de gás de entrada foi aberta até que a pressão no vaso se estabilizasse em 1kfg/cm² (Pressão vista através do manômetro).
- 3) Foi medido o valor do sinal de corrente do sensor de pressão, que estava chegando ao CLP nesse momento.
- 4) Os passos 2) e 3) foram repetidos para as pressões de 2, 3, 4 e 5kfg/cm².
- 5) O resultado é exibido na Tabela 5.4-1

Tabela 5.4-1 – Experiência de valores de corrente medidos para pressões aplicadas

Corrente do sensor de pressão (mA)	Pressão (kgf/cm ²)
4,8	1
5,5	2
6,25	3
7,06	4
7,8	5

A partir desses dados foi traçado o gráfico mostrado na Figura 5.4-1.

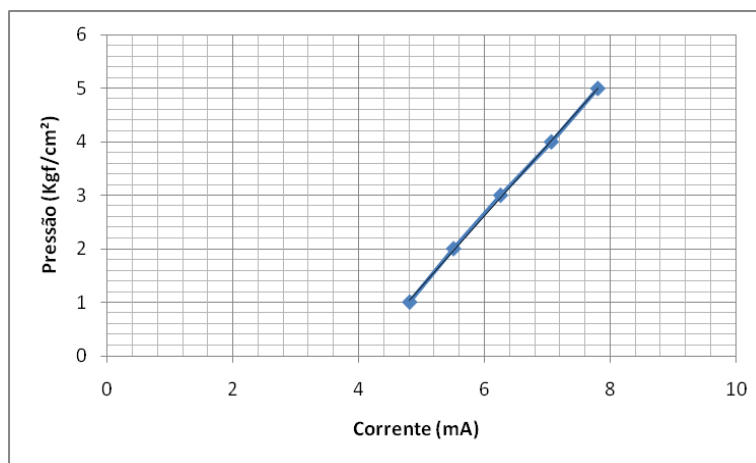


Figura 5.4-1 – Reta obtida na medição de valores de corrente e pressão

Os pontos estão dispostos de forma que o gráfico pode ser aproximado por uma reta, mostrando a linearidade do sensor. Assim pode ser encontrada equação da reta correspondente.

Encontrando a inclinação da reta, utilizando quaisquer dois pontos:

$$y - y_0 = m(x - x_0)$$

$$2 - 1 = m(5,5 - 4,8)$$

$$m = \frac{1}{0,7} \cong 1,43$$

Encontrando a equação da reta:

$$y - y_0 = m(x - x_0)$$

$$y - 1 = 1,43(x - 4,8)$$

Onde x representa o sinal de corrente e y representa o sinal de pressão

$$\boxed{\text{pressão} = 1,43\text{corrente} - 5,86} \quad (\text{Equação 2})$$

Embora o SPDSW leia e converta os valores binários da memória do CLP para corrente e mostre os dados em sua interface supervisória, deseja-se obter esses valores em pressão. Além disso, diferente da medida de nível, 20mA para o sensor de pressão não equivale a um valor absoluto, como por exemplo 100kgf/cm². Portanto fez-se necessária a experiência para obtenção da equação 2.

O próximo passo foi implementar o controlador PI para o sistema de pressão. Diferentemente do sistema de nível, o sistema com gás é muito mais rápido, o que facilitou a obtenção dos parâmetros do controlador empiricamente. A Figura 5.4-2 mostra situações de controle de pressão onde houveram diversas alterações para encontrar os parâmetros do PI. Os pontos com asterisco representam perturbações geradas pela válvula solenóide, onde uma quantidade de gás é liberada aumentando a pressão no vaso.

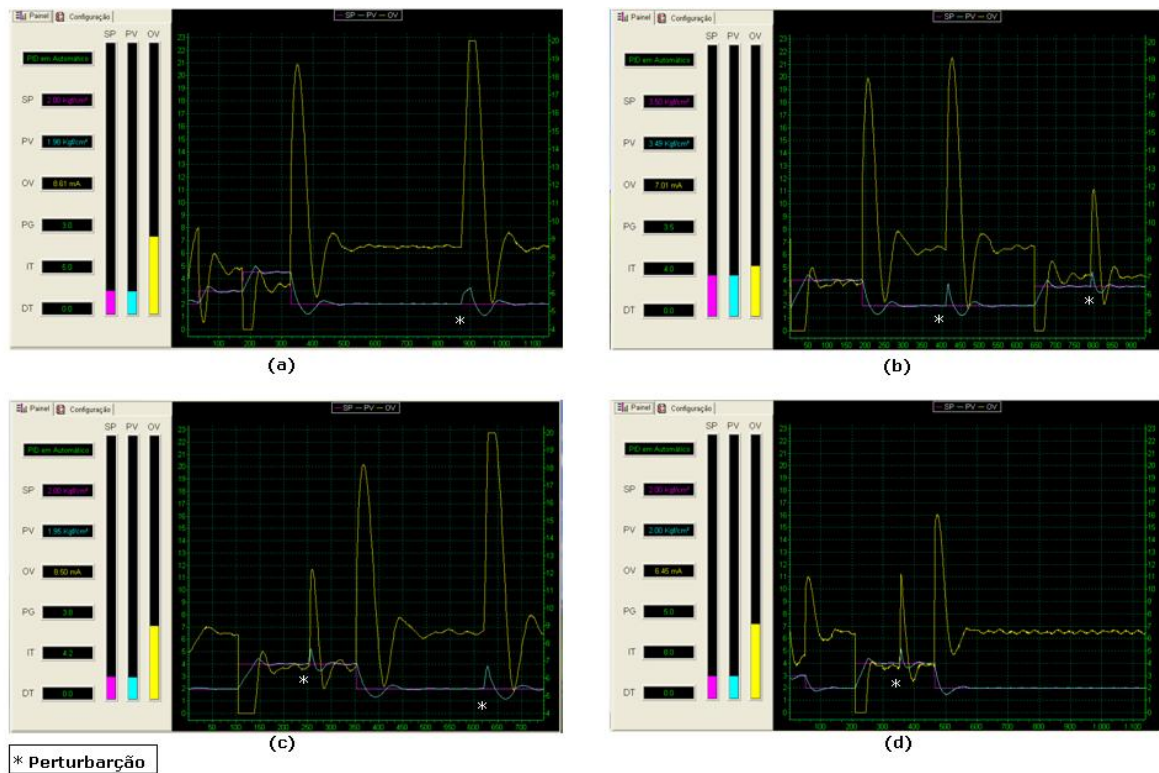


Figura 5.4-2 – Gráficos de controle de pressão – Ajustes dos parâmetros do controlador PI

Os gráficos são mostrados na tela de supervisão de PID do programa SPDSW da HI tecnologia (fabricante do CLP). O eixo da esquerda representa os valores de pressão correspondentes a cada valor de corrente de entrada – a equação da reta foi utilizada para se obter esses limites. Os sinais azul (sinal de saída da planta) e lilás (referência) estão dentro dessa faixa de valores. O eixo da direita representa o sinal de corrente de 4-20mA que pode ser enviado à planta. O sinal amarelo (sinal de controle) está dentro dessa faixa de valores. E o eixo horizontal representa o tempo.

Pode-se notar um bom comportamento para esse controlador. Apesar da variação de parâmetros, todos os gráficos mostram boas respostas para o controle com erro em regime nulo, rápida resposta e pouca oscilação. Contudo o objetivo é deixar o sinal de controle o menos variante possível, com o mínimo de ruído. A Figura 5.4-3 mostra um zoom do gráfico do sinal de controle da Figura 5.4-2(c), no trecho entre 450 e 630 segundos. Observando o gráfico, pode-se ver que, após os 500 segundos, o sinal de controle varia entre 8,5 e 8,8 para manter a saída da planta igual à referência, ou seja, uma variação de 0,3 mA.

É importante que esse nível de variação do sinal de controle seja o menor possível, pois é esse sinal que será utilizado no algoritmo de estimação de vazão que motivou este trabalho.

Com isso conclui-se que o sistema de medição e controle de pressão no vaso separador funciona e está apto a fornecer dados do sinal de controle.

Porém é importante fazer comparação da vazão estimada com a vazão medida.

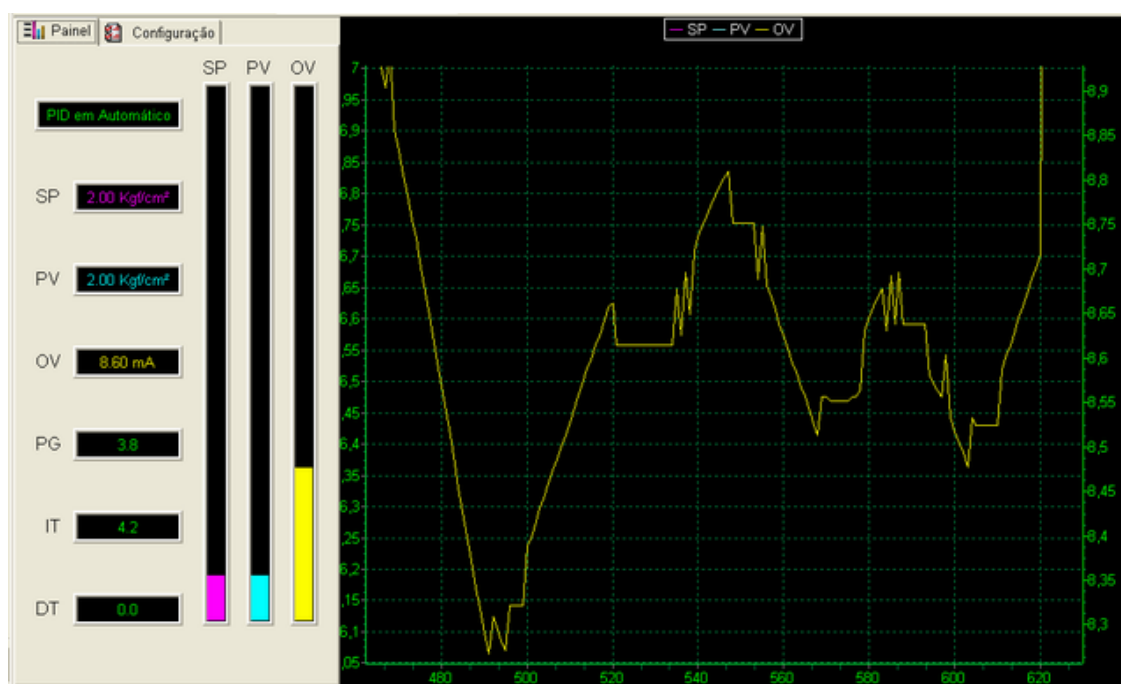


Figura 5.4-3 – Zoom do sinal de controle da planta – Controle de pressão

5.5 Medição de Vazão

O sistema de medição de vazão, conforme explicado no item 4.1.7, é constituído de uma placa de orifício que gera um diferencial de pressão medido pelo sensor e enviado ao CLP. Sabendo que os valores da medição do diferencial de pressão variam de 0-100, assim como o nível, é possível, por analogia, utilizar a equação 1 para a obtenção dos valores

absolutos de vazão. Pois, para ambos os casos o valor binário 0 corresponde a 0 unidades e 4095 corresponde a 100 unidades (inH₂O – pressão ou % – nível) .

Utilizando o programa supervisor, foi feita uma experiência de variação de pressão dentro do vaso separador e foi gerado o gráfico da medição do diferencial de pressão medido no sensor. O sinal de corrente medido é enviado para a memória do CLP. O programa supervisor lê esse dado e, pela equação 1, gera o gráfico do diferencial de pressão. O resultado é mostrado na Figura 5.5-1.



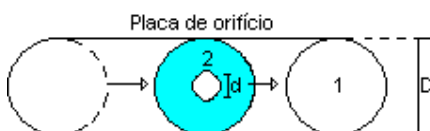
Figura 5.5-1 – Controle de pressão e medição de vazão

Fazendo uma análise da Figura 5.5-1, pode-se observar que foi gerada uma variação no valor de referência da pressão. O objetivo dessa experiência foi avaliar o desempenho da placa de orifício. Em 200, 460, 650, 780 e 870 segundos, o valor referência, setado em 4kgf/cm², foi diminuído gradativamente. Essa diminuição foi de 2, 1, 0.5 e 0.25kgf/cm² respectivamente. Nota-se que a única variação que não causou uma saturação na faixa de medição placa de orifício, ou seja, o sinal medido ultrapassou o valor de 100 inH₂O, foi em 870 segundos, onde a diminuição foi de 0.25kgf/cm². A saturação foi proposital, a fim de simular a saturação das placas de orifício utilizadas para medir os valores de vazão de gás dos poços de plunger lift.

A figura mostra ainda que, no tempo entre 1100 e 1300 segundos, ocorrem dois aumentos significativos da vazão, onde a mesma satura. Isso aconteceu devido à perturbação gerada pela válvula solenóide, que aumentou a vazão de gás na saída

Essa experiência mostrou a influência do controle de pressão do vaso separador no diferencial de pressão e, conseqüentemente, na vazão.

Com o valor do diferencial de pressão, é possível calcular a vazão. Utilizando a equação de Bernoulli, pode-se chegar a uma correlação entre o diferencial de pressão e a vazão:



Dados a partir da figura:

Tubulação horizontal $y = 0$

D = Diâmetro do tubo

d = Diâmetro do orifício da placa

1 = Representa a tubulação

2 = Representa o orifício

Equação de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + y_1 g = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + y_2 g$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

$$\left\{ \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right\} \times \frac{g}{g} ; \text{multiplicando e dividindo por (g - gravidade) e substituindo } \rho g = \gamma$$

$$\boxed{\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}} \quad [1]$$

Sabe-se que "Q"(vazão) em 1 deve ser igual a "Q" em 2, então:

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$V_1 = V_2 \frac{A_2}{A_1} ; \text{Onde } A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$V_1 = V_2 \frac{\pi d^2 4}{\pi D^2 4} \Rightarrow V_1 = V_2 \left(\frac{d}{D} \right)^2 ; \text{fazendo } \beta = \frac{d}{D}$$

$$\boxed{V_1 = V_2 \beta^2} \quad [2]$$

Substituindo [2] em [1]

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_2^2 \beta^4}{2g} ; \text{isolando } V_2$$

$$\left(V_2 = \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma} \times 2g \times \frac{1}{1 - \beta^4}} \right) \times \frac{A_1}{A_1} ; \text{multiplicando e dividindo por } A_1$$

$$A_1 V_2 = A_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma} \times 2g \times \frac{1}{1 - \beta^4}} ; \text{novamente utilizando [2]}$$

$$A_1 V_1 = \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}} \times \sqrt{2g} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} ; \text{se } Q = VA \text{ e chamando } E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}} \times \beta^2 A_1 \times \sqrt{2g} \times E ; \text{fazendo } K = \beta^2 A_1 \times \sqrt{2g} \times E \text{ tem-se:}$$

$$Q = K \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

Q representa a vazão teórica;

K representa a constante obtida;

ΔP representa o diferencial de pressão (para uma vazão em m³/s a pressão deve estar em kfg/m²);

γ representa o peso específico do fluido

A equação 3 é puramente teórica, principalmente pelo fato de considerar que, nas seções 1 e 2, as velocidades são uniformemente distribuídas e respectivamente iguais a V_1 e V_2 . Esta equação pode ser transformada adequadamente para uso prático, se for incluído um coeficiente de correção que leve em consideração todos os elementos do escoamento real. Este coeficiente é chamado de coeficiente de descarga C:

$$C = \frac{Q_{real}}{Q_{teorico}} \Rightarrow Q_{real} = C \times Q_{teorico}$$

A equação da vazão real fica então:

$$Q_{real} = C \times K \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}}$$

Os valores de C são resultados experimentais. Para cada tipo de elemento de medição de vazão e sistema de tomada de impulso, C varia em função do diâmetro da tubulação, do N° de Reynolds, e da relação β entre os diâmetros referentes à seção S1 e S2 [18]. Pode-se notar que a equação de vazão na placa de orifício é similar a equação de vazão na válvula de controle, mostrada no item 2.5.4.

5.6 Supervisório – Análise dos gráficos

A experiência feita foi relacionar os três sistemas (nível, pressão e vazão), gerando perturbações e analisando os sinais.

A equação que relaciona o diferencial de pressão com a vazão foi inserida no algoritmo do programa supervisório e a vazão teórica foi exibida. A Figura 5.6-1 mostra os gráficos dos três sistemas.

5.6.1 Análise do gráfico do controle de nível

O gráfico do controle de nível mostra a referência (azul) com um valor inicial de 19% do nível do reservatório. O sinal de controle (vermelho) indica que a válvula foi acionada para abrir totalmente, permitindo o vaso encher. Porém em aproximadamente 300 segundos, ocorre um *overshoot* e o controlador envia um sinal para fechar a válvula. A planta então passa a mandar uma resposta constante, igual a 25% do nível. Isso ocorre pelo fato do dreno estar fechado e a água do sistema não estar escoando.

Apesar do sistema estar ligado com controle de pressão, a vazão de gás na entrada não é suficiente para arrastar a água através da mesma tubulação, porém o gás causa um agito na

água, gerando um movimento causador de ruídos, que o sensor capta e mostra no gráfico (verde).

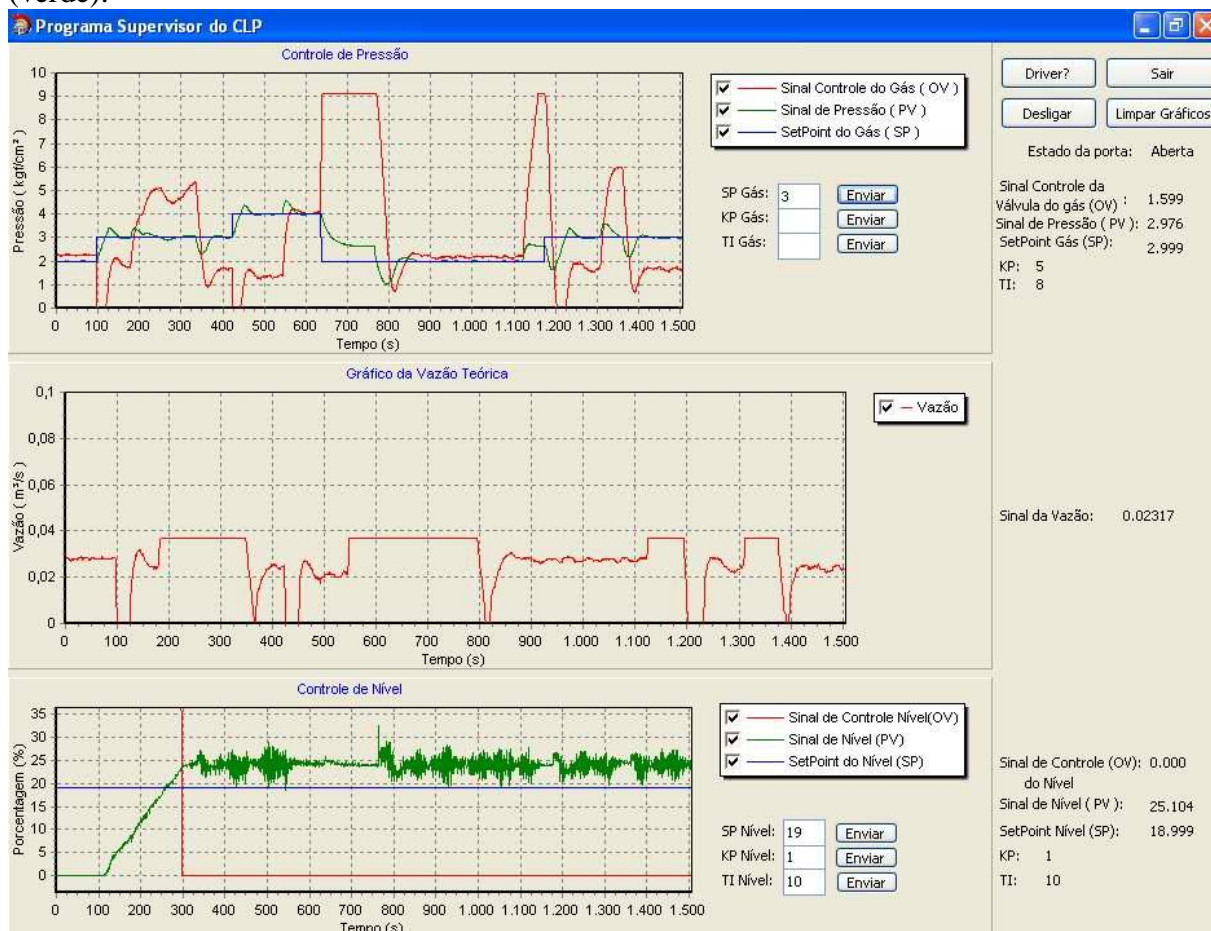


Figura 5.6-1 – Supervisório dos sistemas de controle e medição de vazão

5.6.2 Análise do gráfico do controle de pressão

O gráfico do controle de pressão mostra a pressão inicialmente estabilizada em 2kgf/cm². Em 100 segundos, ocorre um aumento na referência e o controlador então atua. Em 200 segundos a válvula solenóide é aberta e o sinal de resposta da planta mostra uma variação de subida, logo controlada pelo PI – esse fato pode ser concluído observando o sinal de controle nesse momento. Em 350 segundos, a solenóide é fechada e a vazão de entrada de gás no vaso diminui. Novamente o sinal de resposta da planta mostra uma variação, agora na descendente. Então o controlador atua para manter a pressão na referência.

Em, aproximadamente, 420 segundos a referência é alterada para 4kgf/cm². A pressão se estabiliza e, em 550 segundos, a solenóide é novamente aberta. O controle é realizado e, em seguida, a referência é alterada para 2kgf/cm². O controlador abrindo totalmente a válvula de controle de pressão, porém a mesma chega a um mínimo de aproximadamente 2,8kgf/cm². Isso acontece, pois a solenóide liberou uma vazão de gás que aumentou o ponto de pressão mínima atingida pelo vaso de separação, mesmo com a vazão total de saída sendo máxima.

Nesse momento, embora o sinal de vazão esteja saturado, como a abertura é a mesma (total) ela se torna constante e o nível de água chega a se estabilizar em 25% sem gerar ruídos (gráfico do controle de nível).

Em 770 segundos, a válvula solenóide é fechada e o controlador consegue reduzir a pressão. Em 1100 segundos a solenóide é novamente aberta e a pressão volta a subir. O controlador tenta, sem sucesso, manter a pressão na referência.

Por fim a experiência é repetida. Novamente ocorre uma alteração de referência com mudança do estado do solenóide e a experiência é finalizada.

5.6.3 Análise do gráfico da medição de vazão

O gráfico foi configurado para mostrar a vazão em m^3/s , utilizando a equação 3, que relaciona o diferencial de pressão e a vazão teórica.

O valor máximo para essa vazão calculado é de, aproximadamente, $0,037\text{m}^3/\text{s}$ e, assim como o diferencial de pressão, esse valor satura quando é excedido. Os pontos em que o controlador atua fechando a válvula de gás são momentos onde é necessário aumentar a pressão do vaso de separação, então a vazão começa a diminuir. Do contrário, quando o controlador atua para abrir a válvula, é necessário diminuir a pressão do vaso de separação, então a vazão aumenta.

Pode-se observar que os pontos onde ocorreram as maiores saturações foram justamente os pontos onde ocorreu a experiência com a válvula solenóide, ou seja, um pico de pressão aumentando a pressão e a vazão e saturando a medição da placa de orifício.

5.7 Comparação de sinais de controle e diferencial de pressão

A última experiência realizada consistiu em fazer o controle de pressão, gerando perturbações no sistema, por meio da solenóide, que provocariam variações no sinal de controle, para que fosse comparado com o sinal do diferencial de pressão gerado pela placa de orifício.

A Figura 5.7-1 mostra que a referência foi setada para $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ e perturbações foram geradas para que o controle atuasse. Essas perturbações representam os picos de pressão produzidos pelo poço equipado com *plunger lift* no momento de produção que gera a golfada.

Nos momentos que ocorreram essas variações, o controlador atuou tentando manter a pressão na referência desejada. Assim, como houveram mudanças no sentido de diminuir a pressão, a válvula de controle foi aberta.

Essa abertura gerou picos de vazão, pois o ar comprimido era liberado pela válvula de controle.

O sinal de controle foi, então, mostrado juntamente com o sinal diferencial de pressão gerado pela placa de orifício. Os sinais foram sobrepostos e pôde-se constatar que há uma correlação entre o sinal de controle e a vazão.

Esse é o princípio seguido em [1] para elaborar seu algoritmo de estimação. Em outras palavras, essa correlação motivou a elaboração de sua dissertação.



Figura 5.7-1 – Análise do sinal de controle comparado com o diferencial de pressão

Os sinais podem ser capturados para serem salvos em arquivo de maneira simples, pois tendo o acesso às memórias do CLP, à medida que os gráficos são gerados, esses dados são armazenados numa variável local e, ao final de sua execução, são salvos num arquivo de texto ou ainda em forma de planilha.

O anexo B deste documento mostra os valores dos sinais de uma experiência, no tempo entre 200 e 220 segundos, apenas para ilustração. Dados de quaisquer sinais presentes na memória do CLP podem ser salvos em arquivos.

5.8 Conclusão

Este capítulo mostrou, utilizando experiências computacionais, a eficiência da planta-piloto. Todas as experiências de controle realizadas conseguiram atingir um resultado satisfatório, levando-se em consideração que não houve cálculo nos parâmetros do controlador, pois foram refinados por tentativas.

O mais importante foi mostrar a influência dos picos gerados no controle de pressão e, consequentemente, na medição de vazão, pois essa experiência comprova a similaridade entre o pico de pressão de gás produzido pela golfada no vaso de separação do poço equipado com *plunger lift* e a planta-piloto projetada.

Com isso, o algoritmo de estimação de vazão [1] poderá ser aplicado no sistema, para realizar os testes necessários para depois aplicar nas plantas reais, sem perda de similaridade.

Se necessário, poderá ainda coletar dados do controle de qualquer sinal do sistema e armazená-los em arquivo, para outras simulações.

Capítulo 6

Conclusões gerais e perspectivas

6.1 Introdução

Este trabalho descreveu o projeto e funcionamento da planta emuladora de escoamentos para produzir picos de pressão gerados por golfadas provenientes de poços de petróleo. Os resultados das experiências mostraram que o sistema foi capaz de gerar dados para o problema que foi proposto e corroborou a correlação proposta em [1], conforme mostrado no item 5.7. O trabalho gerou diversas possibilidades de estudos com problemas relacionados à medição óleo e gás, quando puderem ser simulados por ar e água. Gerou ainda o desenvolvimento de um ambiente supervisório capaz de medir e controlar os sinais do sistema. Espera-se que seja estudada a função de transferência da planta para ser feito um controle refinado e, com o algoritmo de controle, possa ser implementado junto aos sinais o algoritmo estimador. Neste capítulo estão relacionadas às conclusões da construção da planta estudada nesse trabalho e algumas perspectivas para projetos de pesquisa futuros.

6.2 Conclusões

A principal conclusão que se pode tirar do trabalho se deve a última experiência, quando, durante o controle de pressão, foram gerados picos na vazão que foram rapidamente corrigidos pelo controlador. Pôde-se constatar que o objetivo do trabalho foi alcançado. O sinal de controle da malha de pressão foi sobreposto ao sinal do sensor de vazão e a correlação abordada em [1] foi comprovada. Consequentemente, a planta poderá ser utilizada no problema que motivou sua construção.

Para se ter um sistema funcionando, os procedimentos de ligação devem ser seguidos com rigor. O trabalho com equipamentos que envolvem altas pressões é altamente perigoso quando feito sem qualquer precaução. É importante que o compressor, as válvulas e sensores, assim como outros instrumentos tenham sempre manutenção periódica, além dos procedimentos de segurança adotados nesse trabalho.

O sistema de controle de nível se mostrou complexo e de difícil ajuste dos parâmetros do controlador. Para um controle com o dreno aberto, seria mais eficaz aumentar a vazão de líquido na entrada. A troca da bomba alteraria essa variável de processo. Além disso, é recomendado que seja calculada a função de transferência da planta para um melhor ajuste nos parâmetros. Contudo, foi mostrado que o nível, mesmo de forma lenta e ruidosa, é capaz de ser controlado.

O sistema de controle de pressão se mostrou rápido, eficaz e com fácil ajuste dos parâmetros do controlador. A utilização da função de transferência para ajuste do controlador tende a dar um resultado mais preciso e menos oscilatório, principalmente para o sinal de controle.

A medição de vazão mostrou uma placa de orifício gerando diferenciais de pressão muito grandes, o que causou saturações precoces do medidor. Seria mais eficaz se uma nova placa fosse confeccionada, para se obter uma maior rangeabilidade. Sabendo que o resultado do algoritmo estimador será comparado com a vazão real, uma maior faixa de valores sem saturação seria mais adequada para conferência de valores.

O trabalho gerou ainda um artigo técnico que será apresentado em breve.

6.3 Perspectivas

A ideia de emular padrões de escoamento gerando picos de gás é uma solução eficaz e que trará muitas facilidades ao estudo e simulações de sistemas relacionados a petróleo.

O fato do sistema ser flexível e composto por várias possibilidades de experimentos, abre uma grande quantidade de perspectivas futuras para a geração de outros trabalhos. Por fim, pode-se citar alguns exemplos das áreas e onde podem ser aplicados os conhecimentos do sistema são:

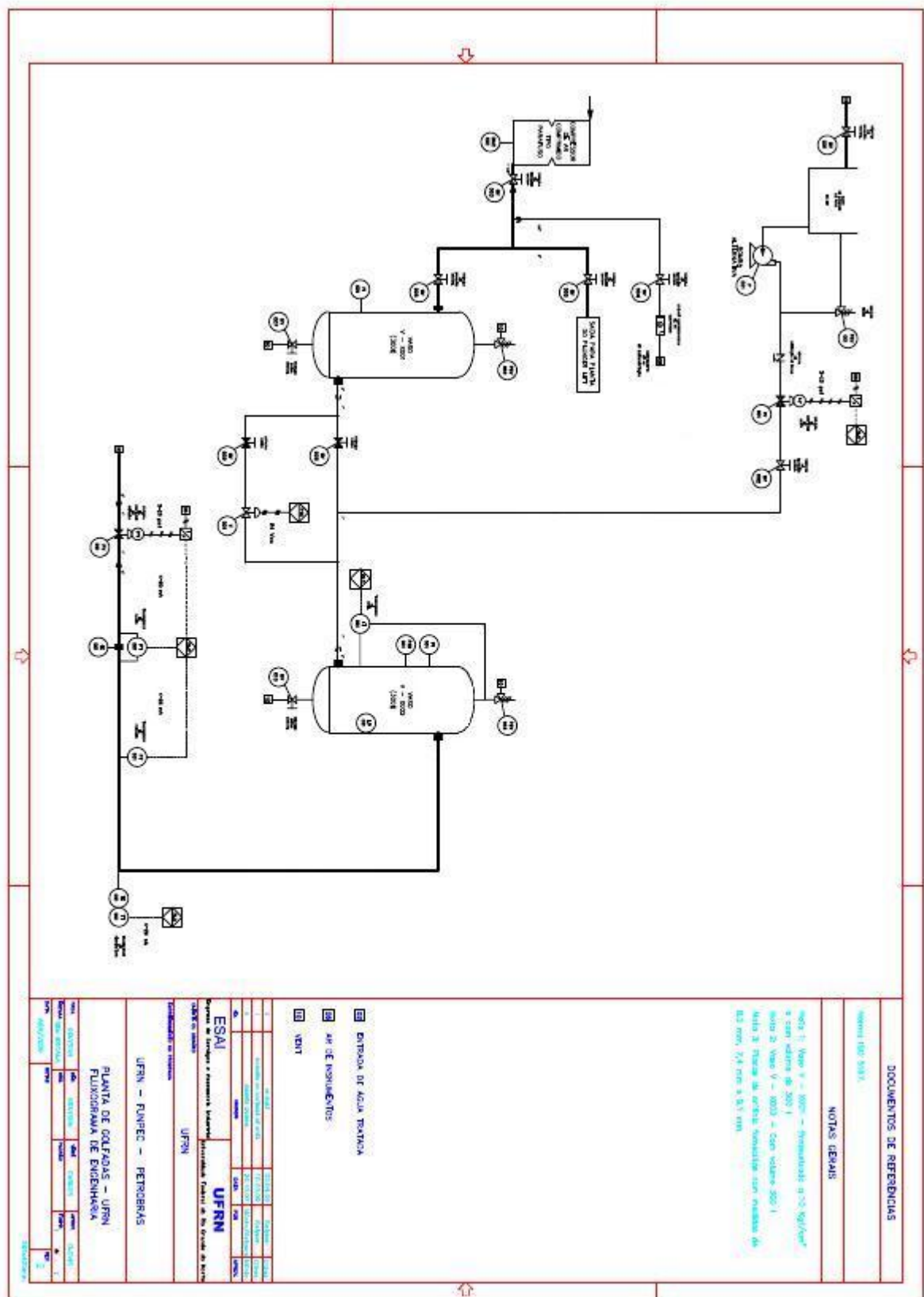
- Engenharia de Controle – Será possível utilizar os sistemas de nível, pressão e vazão para projetar controladores das diversas áreas de controle (PID, lógica nebulosa, controle adaptativo, etc.).
- Automação e Instrumentação – Equipamentos podem ser modificados para melhorar a dinâmica do sistema (caso da bomba). Podem-se estudar maiores limites para os instrumentos de medição, pois o vaso de separação suporta maiores pressões, a fim de se obter outros efeitos no sistema. Alguns equipamentos podem ser trocados (caso da placa de orifício) e se aumenta a quantidade de estudos que podem ser realizados. A documentação de todos os equipamentos pode ser mais aprofundada.
- Engenharia de Computação – O sistema supervisório pode ser melhorado e combinado com outros projetos existentes. Pode ser estudado o controle em tempo real via internet. A estimação de vazão do problema que motivou o trabalho pode ser feita em tempo real, com a criação de um novo gráfico. O estudo permite o desenvolvimento de drivers para a utilização do CLP no sistema operacional Linux. Estudos de tempo de aquisição de dados (período de amostragem do CLP) podem ser realizados.
- Estatística – Os sinais podem ser utilizados em algoritmos estatísticos, caso do algoritmo estimador da vazão.
- Engenharia de Petróleo e Gás e Engenharia Química – O processo utiliza ar comprimido e água para simular petróleo e gás. Com a válvula solenóide são gerados picos de pressão que alteram o escoamento dependendo das variáveis de processo velocidade e quantidade dos fluidos. Essas variáveis podem ser alteradas para gerar diferentes padrões de escoamento, que podem ser estudados e classificados.

Referências Bibliográficas

- [1] SILVA, Sérgio José Gonçalves e, *Um Sistema para Estimação da Vazão de Gás de Poços Produzindo por Plunger Lift para Vaso Separador de Teste em Plataformas de Petróleo*. Natal, 2007. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [2] SOUZA, Rodrigo Barbosa de, *Uma Arquitetura para Sistemas Supervisórios Industriais e sua Aplicação em Processos de Elevação Artificial de Petróleo*. Natal, 2005. 53f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: < <ftp://ftp.ppgeec.ufrn.br/Mestrado/M132.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2007
- [3] THOMAS, José Eduardo – *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 271p.
- [4] TELLES, Pedro C. Silva – *Vasos de Pressão*, 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 302p.
- [5] ELKIND, Raul – *Apostila do CENPES - Dimensionamento de Tambores*
- [6] SILVA, Cláudio Barreiros da Costa e; FILHO, Miguel João Borges; PINHEIRO, José Alberto. *Medição De Vazão E Propriedades Em Escoamentomultifásico: Solução Econômica Para Diferentes Atividades Industriai*. Bol. téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 43 (1): 45-61, jan./mar. 2000. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/port/boletim_tecnico/v43_n1_jan-mar-2000/pdf/6amedicao.pdf>. Acesso em: 19 out. 2007.
- [7] SILVA, Paulo Alexandre Souza da; JÚNIOR, Carlos Augusto Tavares da Costa; BARREIROS José Augusto Lima. *Programa de Análise Inteligente Aplicado em Perfis de Produção dos Poços da Indústria de Petróleo e Gás Natural*. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, vol. 4, nº. 5, setembro, 2006. Disponível em:<http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol4issue5Sept.2006/4TLA5_7SouzadaSilva.pdf>. Acesso em: 26 out. 2007.
- [8] MOHAN, Ram S.; SHOMAN Ovidia. *Design and Development of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Compact Separators for Three-Phase Flow*. Tulsa University Separation Technology Projects (TUSTP), Junho, 2003. Disponível em: < <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/819514-qXtUjU/native/819514.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2007.
- [9] MAITELLI, André L.; *Controladores Lógicos Programáveis*,2003. Disponível em: <ftp://users.dca.ufrn.br/clp>. Acesso em: 06 nov 2007.
- [10] OLIVEIRA, Luiz A. H. Guedes de; *Curso de Redes para automação industrial*, 2003. Disponível em: < <ftp://users.dca.ufrn.br/>>. Acesso em: 06 nov 2007.
- [11] BECKER, Leandro Buss; JÚNIOR Wilson Pardi; PEREIRA, Carlos Eduardo. *Proposal of an integrated object-oriented environment for the design of supervisory software for real-time industrial automation systems*. In Fourth International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems,1999.
- [12] WERNECK, Marcelo Martins. *Transdutores e Interfaces*. Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- [13] CARNEIRO, João N. Escosteguy, *Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos No Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais e Levemente Inclinadas*. Rio de Janeiro, 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-RIO.

- [14] Barnea, D; Brauner, N., *Hold-up of the liquid slug in two-phase intermittent flow*. Int. J. Multiphase Flow 1985.
- [15] TAITEL, Y.; DUKLER, A. E.; *A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow*. AIChE Journal, 1976.
- [16] BONIZZU, M; ISSA, R. I., *On the simulation of three-phase slug flow in nearly horizontal pipes using multi-fluid model*. Int. J. of Multiphase Flow, 2003.
- [17] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Recipiente> Acesso em: 09 nov. 2008.
- [18] Apostila do CENATEC – MG - *Medição de vazão*. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/medicao-de-vazao-senai-mg-pdf-pdf-a3529.html>> Acesso em: 23 abr. 2009.
- [19] Manual descritivo funcional – *Controlador Industrial ZAP 500 – Série II* - PDF.105003, Rev. 1.01, Março 2008. Disponível em: <<http://www.hitecnologia.com.br/download/PDF10500300.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2009
- [20] Manual de referencia – *Rosemount 1151 Pressure Transmitter* – 00809-01004360, Rev. BA, Agosto 2008. Disponível em: <<http://www.emersonprocess.com/Rosemount/document/reference-cards/00829-0100-4360.pdf>> Acesso em 19 mai. 2009.
- [21] <<http://www.smar.com>> Acesso em: 19 mai. 2009.
- [22] Catálogo técnico – *EDGE Conversor I/P* – Julho 2006. Disponível em: <http://www.dmttech.com.br/EDGE_CATALOGO_TECNICO.pdf> Acesso em: 19 mai. 2009
- [23] Empresa de Serviço e Assessoria Industrial LTDA. – ESAI – Memorial Descritivo – *Planta Experimental de Golfada* – Rev. 0, Maio 2009.
- [24] STREETER, Victor L.; *Mecânica dos fluidos*. Tradução: Celso da Silva Muniz e outros, São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977
- [25] DIAS, Fernando Tadeu Rios – *Apostila de válvulas de controle* – Curso de válvulas de controle. ISA-ES. Jun./2009.
- [26] <http://wwwusers.rdc.puc-rio.br/werneckr/cp_cap0400.htm> Acesso em: 14 ago. 2009.
- [27] AGA Report N° 3, Part 1, *Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids* – General Equations and Uncertainty Guidelines (1990).

Anexo A – Fluxograma de Engenharia



Anexo B – Aquisição de Sinais da Experiência

Tempo (s)	Pressão (kgf/cm ²)	Ref. Gás (kgf/cm ²)	ΔP (inH ₂ O)	Sin. de controle (mA)	Vazão Teórica (m ³ /s)
200.0	2.976	2.999	25.397	1.071	0.005944
200.2	2.976	2.999	25.788	1.124	0.005990
200.4	2.976	2.999	25.592	1.071	0.005967
200.6	2.976	2.999	25.592	1.068	0.005967
200.8	2.976	2.999	24.322	1.066	0.005817
201.0	2.976	2.999	24.615	1.066	0.005852
201.2	2.976	2.999	24.713	1.064	0.005864
201.4	2.976	2.999	23.932	1.062	0.005770
201.6	2.976	2.999	22.759	1.060	0.005627
201.8	2.976	2.999	21.783	1.060	0.005505
202.0	2.976	2.999	22.857	1.060	0.005639
202.2	2.976	2.999	22.466	1.057	0.005591
202.4	2.976	2.999	22.857	1.057	0.005639
202.6	2.976	2.999	23.443	1.055	0.005711
202.8	2.976	1.999	23.248	1.106	0.005687
203.0	2.976	1.999	32.430	2.283	0.006717
203.2	2.976	1.999	96.215	2.341	0.011570
203.4	2.954	1.999	99.927	2.403	0.011791
203.6	2.954	1.999	99.927	2.459	0.011791
203.8	2.932	1.999	99.927	2.490	0.011791
204.0	2.910	1.999	99.927	2.519	0.011791
204.2	2.865	1.999	99.927	2.601	0.011791
204.4	2.865	1.999	99.927	2.601	0.011791
204.6	2.843	1.999	99.927	2.626	0.011791
204.8	2.821	1.999	99.927	2.650	0.011791
205.0	2.821	1.999	99.927	2.699	0.011791
205.2	2.799	1.999	99.927	2.745	0.011791
205.4	2.754	1.999	99.927	2.739	0.011791
205.6	2.754	1.999	99.927	2.785	0.011791
205.8	2.732	1.999	99.927	2.803	0.011791
206.0	2.710	1.999	99.927	2.848	0.011791
206.2	2.665	1.999	99.927	2.885	0.011791
206.4	2.665	1.999	99.927	2.872	0.011791
206.6	2.643	1.999	99.927	2.885	0.011791
206.8	2.621	1.999	99.927	2.925	0.011791
207.0	2.621	1.999	99.927	2.936	0.011791
207.2	2.599	1.999	99.927	2.965	0.011791
207.4	2.554	1.999	99.927	3.001	0.011791
207.6	2.532	1.999	99.927	2.983	0.011791
207.8	2.532	2.999	99.927	2.988	0.011791
208.0	2.510	2.999	99.927	1.777	0.011791

208.2	2.510	2.999	93.773	1.721	0.011422
208.4	2.510	2.999	80.977	1.693	0.010614
208.6	2.488	2.999	64.078	1.661	0.009442
208.8	2.510	2.999	56.166	1.617	0.008840
209.0	2.488	2.999	50.501	1.562	0.008382
209.2	2.488	2.999	46.105	1.530	0.008009
209.4	2.488	2.999	43.858	1.499	0.007812
209.6	2.488	2.999	42.198	1.468	0.007662
209.8	2.488	2.999	40.928	1.424	0.007546
210.0	2.488	2.999	38.584	1.393	0.007327
210.2	2.488	2.999	38.095	1.362	0.007280
210.4	2.488	2.999	36.142	1.331	0.007091
210.6	2.488	2.999	34.286	1.299	0.006907
210.8	2.488	2.999	32.332	1.255	0.006707
211.0	2.488	2.999	30.867	1.251	0.006553
211.2	2.488	2.999	29.890	1.195	0.006449
211.4	2.488	2.999	28.425	1.164	0.006289
211.6	2.510	2.999	26.764	1.133	0.006102
211.8	2.510	2.999	25.201	1.115	0.005921
212.0	2.510	2.999	24.713	1.086	0.005864
212.2	2.510	2.999	23.736	1.057	0.005747
212.4	2.510	2.999	22.466	1.026	0.005591
212.6	2.510	2.999	21.392	0.984	0.005456
212.8	2.510	2.999	20.122	0.953	0.005291
213.0	2.510	2.999	19.634	0.951	0.005227
213.2	2.532	2.999	17.289	0.924	0.004905
213.4	2.532	2.999	16.313	0.895	0.004764
213.6	2.532	2.999	14.261	0.853	0.004454
213.8	2.554	2.999	11.526	0.853	0.004005
214.0	2.554	2.999	6.447	0.826	0.002995
214.2	2.554	2.999	3.907	0.800	0.002332
214.4	2.599	2.999	2.247	0.826	0.001768
214.6	2.621	2.999	1.465	0.817	0.001428
214.8	2.621	2.999	1.270	0.795	0.001329
215.0	2.643	2.999	1.074	0.800	0.001223
215.2	2.643	2.999	1.074	0.780	0.001223
215.4	2.665	2.999	0.977	0.775	0.001166
215.6	2.710	2.999	0.977	0.755	0.001166
215.8	2.710	2.999	0.781	0.789	0.001043
216.0	2.732	2.999	0.781	0.800	0.001043
216.2	2.754	2.999	0.781	0.782	0.001043
216.4	2.754	2.999	0.684	0.786	0.000975
216.6	2.799	2.999	0.684	0.826	0.000975
216.8	2.799	2.999	0.586	0.815	0.000903
217.0	2.821	2.999	0.586	0.831	0.000903
217.2	2.843	2.999	0.488	0.846	0.000824

217.4	2.843	2.999	0.488	0.833	0.000824
217.6	2.865	2.999	0.293	0.851	0.000639
217.8	2.910	2.999	0.195	0.842	0.000521
218.0	2.910	2.999	0.098	0.888	0.000369
218.2	2.932	2.999	4.884	0.906	0.002607
218.4	2.932	2.999	6.642	0.904	0.003040
218.6	2.932	2.999	9.963	0.926	0.003723
218.8	2.932	2.999	12.991	0.895	0.004252
219.0	2.932	2.999	13.871	0.920	0.004393
219.2	2.954	2.999	11.038	0.915	0.003919
219.4	2.954	2.999	9.573	0.913	0.003650
219.6	2.954	2.999	8.791	0.908	0.003497
219.8	2.954	2.999	9.182	0.906	0.003574
220.0	2.976	2.999	11.624	0.933	0.004022

Anexo C – Manual de Utilização da Planta

Após a apresentação detalhada da utilização da planta pode-se colocar o sistema em funcionamento seguindo os passos abaixo:

- 1) Checar se todas as válvulas da planta estão fechadas;
- 2) Checar se todas as pressões estão estabilizadas, observando os manômetros;
- 3) Ligar o CLP;
- 4) Se o CLP ainda não estiver com o algoritmo de controle em funcionamento, ligar o computador, executar o programa supervisorio (SPDSW) e, na tela de calibração, gerar um sinal de 20mA para abrir as válvulas de controle e permitir a passagem dos fluidos do sistema;
- 5) Abrir a tampa de visita/manutenção do compressor e checar, visualmente, se existe vazamento de óleo, peças folgadas, fios desconectados, nível de óleo na altura do visor de nível, deflexão máxima aceitável de 1 cm da correia ou algum indício que possa trazer problemas quando for iniciado o funcionamento do equipamento
- 6) Colocar o compressor em funcionamento checar os itens abaixo:
 - a. Temperatura de trabalho entre 80°C e 95°C (acima de 115°C o compressor desliga por intermédio de um termostato).
 - b. Restrição do filtro de óleo até 1,8 barg (27 psig). Acima disso deve ser substituído.
- 7) Abrir, lentamente, a válvula de alimentação do sistema, presente na linha de saída do compressor, dentro da sala.
- 8) Abrir, lentamente, a válvula manual, a montante da válvula reguladora de pressão para a alimentação das válvulas de controle e observar se o manômetro desse instrumento estará marcando 4bar;
- 9) Ligar a bomba
 - a. Se o computador estiver apenas enviando um sinal de 20mA para abrir a válvula de vazão de líquido, o nível começará a subir sem controle;
 - b. Se o CLP estiver funcionando, observar que o controlador tentará manter o nível na referência (setpoint) desejada;
 - c. Se a água estiver retornando para o reservatório, observar:
 - i. Se o dreno do vaso separador estiver fechado, observar se a referência de nível do vaso já foi atingido;
 - ii. Se o dreno do vaso separador estiver aberto, observar se o nível da planta está maior que a referência desejada, caso contrário nenhum sinal está sendo enviado para a válvula de controle, ou sua alimentação está insuficiente;
- 10) Abrir a válvula manual na entrada do vaso pulmão e observar o ar fluindo para dentro do vaso;
- 11) A pressão no manômetro deste vaso não pode ser maior que 10kgf/cm²;
- 12) Abrir a válvula da linha de gás entre os dois vasos, até a marca de 0,5
 - a. Se o CLP estiver funcionando, observar que o controlador tentará manter a pressão do vaso de separação na referência desejada;
 - b. Se o CLP não estiver funcionando, observar que todo o ar comprimido está saindo pela linha final da tubulação;
 - c. Se nenhuma das duas situações acima ocorrer, observar se a pressão no vaso de separação está subindo;

- i. Certificar-se que o computador está enviando o sinal para a abertura da válvula de controle de vazão de gás corretamente ou que a alimentação das válvulas de controle está suficiente;

**Obs: Não permitir que a pressão no vaso de separação ultrapasse 10kgf/cm².
Se isso ocorrer, fechar as válvulas de gás das linhas entre os dois vasos.**

- 13) Abrir a válvula a montante da válvula solenóide até a marca de 2;
- 14) Se a solenóide for acionada, a vazão de ar comprimido da entrada irá aumentar, aumentando a pressão;
 - a. Se o CLP estiver funcionando, observar que ocorrerá um pico de pressão, mas o controlador tentará manter a pressão do vaso de separação na referência desejada;
 - b. Se o CLP não estiver funcionando, observar um aumento na vazão de ar comprimido saindo pela linha final da tubulação;
 - c. Se nenhuma das duas situações acima ocorrer, observar se a pressão no vaso de separação está subindo;
 - i. Certificar-se que o computador está enviando o sinal para a abertura da válvula de controle de vazão de gás corretamente ou que a alimentação das válvulas de controle está suficiente;

**Obs: Não permitir que a pressão no vaso de separação ultrapasse 10kgf/cm².
Se isso ocorrer, fechar as válvulas de gás das linhas entre os dois vasos.**

- 15) Para colocar o medidor de vazão em condições de leitura, abrir os manípulos laterais do *manifold* para permitir a comunicação e fechar o manípulo central, obedecendo a essa ordem.

Obs.: Nunca abrir totalmente os manípulos, pois a alta pressão poderá prendê-los dificultando o destravamento. Abrir o manípulo totalmente e retornar 10° é suficiente.

- 16) Para desabilitar a condição de leitura do medidor de vazão, abrir o manípulo central do *manifold* e fechar os manípulos laterais, obedecendo a essa ordem.

Caso estejam sendo realizadas experiências de controle, não é necessário que o sistema seja totalmente retornado ao ponto inicial, para a sua ligação. Caso contrário, parâmetros da planta e sua função de transferência serão alterados, exigindo novos cálculos para ajustar o controlador.

As válvulas manuais de vazão de gás entre os vasos e o dreno do vaso separador podem ser mantidas abertas, mas é importante que, sempre antes de ligar o compressor ou alimentar o vaso pulmão, o CLP seja ligado para que o controle seja realizado à medida que o ar comprimido entre no vaso separador. Com isso o controlador não permitirá que a pressão dentro do vaso separador exceda o valor da referência.

Obs.: Observar sempre as medidas dos manômetros da planta. Eles sempre darão a condição real de pressão que os instrumentos da planta estão submetidos.

Anexo D – Descrição dos equipamentos

Conforme descrito no item 3.3.1, os vasos de pressão estão definidos de acordo com a Tabela D-1.

Tabela D-1 – Vasos de pressão

Características Técnicas	Vasos de Pressão
Volume Hidráulico	300 L
Pressão Máx. de Trabalho Admissível (PMTA)	13,5kgf/cm ²
Pressão de Teste	12kgf/cm ²
Categoria	V
Ano de fabricação	2009

Os vasos são interligados ao compressor por tubos de 2” que atendem as condições de resistência e são compatíveis com o uso de ar comprimido.

As especificações das válvulas de controle, sensores e outros equipamentos podem ser vistos a seguir:

- a) *Válvula de esfera tripartida passagem plena 1000 WOG MGA 2”*: Válvula de bloqueio de fluxo classe 300 (Conforme ASME B16.34) indicada para utilização em diversos tipos de fluido em ampla faixa de temperatura e pressão, conforme norma ASME B16.34

Tabela D-2 – Válvula de esfera tripartida plena 1000 WOG MGA 2”

Características Técnicas	Válvula de Esfera
Pressão Nominal	300 #
Coeficiente de Fluxo (m ³ /h)	278
Rotação	90°
Alavanca	Aço cromado revestido com PVC azul
Rosca	NPT

- b) *Válvula globo manual 1”*: Válvula classe 200 (Conforme NBR 15055) bronze indicada para utilização em diversos tipos de fluido em ampla faixa de temperatura e pressão

Tabela D-3 – Válvula globo manual 1”

Características Técnicas	Válvula de Esfera
Pressão Nominal	150 #
Rosca	NPT
Norma de Referencia	NBR 15055

- c) *Válvula de controle FISHER*: Válvula modelo EZ tipo globo com conexão de extremidade integral (rosca NPT), guia de suporte e compensador de troca rápida. São aplicadas em processamentos químicos ou de hidrocarboneto ou aplicações que requeiram controle de fluidos.

Tabela D-4 – Válvula de controle FISHER

Características Técnicas	Válvula de Esfera
Pressão Nominal	150 #
Conexão de Extremidades - Acoplamento	Rosca 1" NPT
Característica de Fluxo	Porcentagem igual; Abertura rápida; Linear
Classe de Pressão	250 de acordo com a ASME B 16.4
Peso	11 Kg

- d) *Compressor Schulz*: Compressor rotativo de parafuso, motor elétrico trifásico blindado, transmissão por correia, resfriador posterior, painel eletrônico e resfriamento a ar projetado para ambientes com temperatura até 45°C.

Tabela D-5 – Compressor tipo parafuso

Características Técnicas	SCHULZ Modelo SRP 2050
Pressão Máxima	10 Bar
Peso	790 kg
Ruido	80 dB(A)
Conexão de descarga	1 ½"
Potência	50 Hp
Vazão Efetiva	5660 l/min

- e) *Transmissor de Vazão LD301 Modelo Hart SMAR*: A medição da pressão diferencial é obtida através da aplicação de pressão aos lados de alta e de baixa do transmissor.

Tabela D-6 – Transmissor de vazão SMAR

Características Técnicas	Sensor de Vazão SMAR - Modelo LD301
Exatidão	± 0,04%
Rangeabilidade	120:01
Pressão estática	52 MPa (7500 psi)
Medição	Digital direta de capacitância
Atualização de Corrente de Saida	100 ms com 0,075 µA/bit de resolução;

- f) *Transmissor de Pressão Rosemount 1151 EMERSON*: O nível é medido pela diferença de pressão, utilizando o peso da coluna d'água. Já a pressão manométrica é de medição direta. Tanto o transmissor de pressão como o transmissor de nível fazem parte da série 1151.

Tabela D-7 – Transmissores de pressão ROSEMOUNT

Características Técnicas	Sensor Rosemount 1151 Series - EMERSON
Exatidão	± 0,075%
Rangeabilidade	0–25 bar
Limite de Pressão Estática	0,5 psia à 2.000 psig (3,45 kPa à 13790 kPa).

Medição	Digital direta de capacitância
Temperatura Limite	-40 à 85 °C

- g) *Controlador Lógico Programável ZAP 500 e módulo de extensão ZEM 400*: Controlador com Supervisão de hardware via *Watch Dog Timer*, memória de programa tipo Flash ROM com 128 Kbytes, memória de dados tipo RAM estática com 32 Kbytes, memória de dados retentiva tipo NVRAM opcional com 8 Kbytes e Banco de dados de 16 Kbytes de Flash ROM para gravação de receitas da aplicação. O módulo de expansão ZEM400-R0 acrescenta 18 pontos de I/O ao controlador ZAP500, disponibilizando recursos de aquisição e atuação analógica e digital.

Tabela D-8 – Controlador Lógico Programável (CLP) ZAP 500 e módulo de expansão ZEM400

Características Técnicas	CLP ZAP500/ZEM400
Alimentação	12 a 30 VDC (24 VDC nominal)
Temperatura de Operação	0 a 65°C
Dimensões Externas	98 x 98 x 165 mm (DIN 98x98)
Comunicação	serial
Display LCD	-40 à 85 °C
Entradas Digitais	6 + 4 (ZEM400)
Saídas Digitais	4 + 4 (ZEM400)
Entradas Analógicas	8
Saídas Analógicas	2
Resolução das Entradas Analógicas	10 bits
Resolução das Saídas Analógicas	8 bits
Período de Amostragem	~300µs

- h) *Medidor de vazão*: A medição de vazão é realizada por um gerador de pressão diferencial, o elemento placa de orifício. O material de construção das placas é o aço inoxidável 316.

Tabela D-9 – Características das placas de orifício

Características Técnicas	Placa de Orifício
$\Delta\Pi$	33,59 in Ca
Relação $d/D = \beta$	0,14095
Diâmetro do orifício	7,1 mm
$\Delta\Pi$	100 in Ca
Relação $d/D = \beta$	0,15618
Diâmetro do orifício	8,2 mm
$\Delta\Pi$	80 in Ca
Relação $d/D = \beta$	0,17333
Diâmetro do orifício	9,1 mm