



ISMAEL ORLANDO OCHOA LARA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR FÍSICO DE
GAS LIFT INTERMITENTE E BOMBEIO PNEUMÁTICO ZADSON
EM ESCALA DE LABORATÓRIO**

CAMPINAS
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS

ISMAEL ORLANDO OCHOA LARA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR FÍSICO DE
GAS LIFT INTERMITENTE E BOMBEIO PNEUMÁTICO ZADSON
EM ESCALA DE LABORATÓRIO**

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Exploração.

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado defendida pelo aluno Ismael Orlando Ochoa Lara e orientada pelo Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo.



Orientador

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Oc3d Ochoa Lara, Ismael Orlando, 1987-
Desenvolvimento de um simulador físico de gas lift intermitente e bombeio pneumático Zadson em escala de laboratório / Ismael Orlando Ochoa Lara. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Sérgio Nascimento Bordalo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Poços de petróleo - Gás-lift. 2. Poços de petróleo. 3. Escoamento bifásico - Tubulações. 4. Escoamento intermitente. 5. Laboratórios - Projetos e construção. I. Bordalo, Sérgio Nascimento, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Development of a physical simulator for intermittent gas lift and Zadson pneumatic pump in laboratory scale

Palavras-chave em inglês:

Oil wells - Gas-lift

Oil well

Two-phase flow - Pipes

Intermittent flow

Laboratories - Design and construction

Área de concentração: Exploração

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora:

Sérgio Nascimento Bordalo [Orientador]

Paulo Roberto Ribeiro

Manuel de Almeida Barreto Filho

Data de defesa: 25-02-2013

Programa de Pós-Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo



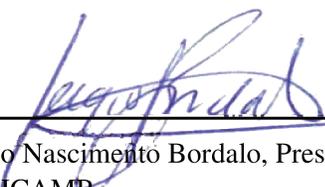
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

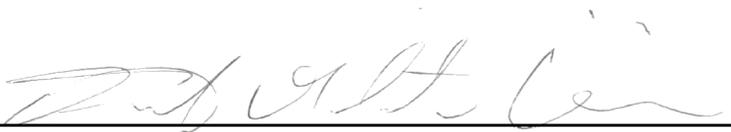
**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR FÍSICO DE
GAS LIFT INTERMITENTE E BOMBEIO PNEUMÁTICO ZADSON
EM ESCALA DE LABORATÓRIO**

Autor: Ismael Orlando Ochoa Lara
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo

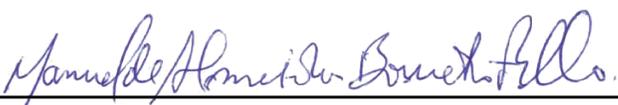
A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:



Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Roberto Ribeiro
DEP/FEM/UNICAMP



Dr. Manuel de Almeida Barreto Filho
PETROBRAS

Campinas, 25 de fevereiro de 2013

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer às pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho:

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor Sérgio Nascimento Bordalo pela dedicação e a orientação durante todo o tempo do desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da UNICAMP por suas contribuições acadêmicas. A todos os pesquisadores, funcionários e estagiários do DEP e do LabPetro pela convivência e dedicação durante todo este tempo. A Alcimar da Silveira pela colaboração com a montagem do laboratório. Aos colegas pós-graduandos pela amizade e os momentos de descontração que marcaram nossa convivência, sempre amena e prazerosa.

À minha mãe que em todo momento incentivou-me a alcançar os meus objetivos. À Erika do Nascimento, pela companhia e o constante apoio durante todo esse tempo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por me brindar com o apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.

E por último, eu quero agradecer à Universidade Estadual de Campinas por ter permitido fazer parte de sua alma mater.

A todos vocês, meus mais sinceros agradecimentos.

“El secreto de mi felicidad está en no esforzarme por el placer, sino en encontrar el placer en el esfuerzo”

André Gide

Resumo

Apesar dos avanços alcançados, alguns aspectos da operação do *gas-lift* intermitente (GLI) convencional permanecem inexplorados ou pouco estudados até o presente, como por exemplo, a concomitância de etapas do ciclo apresentada por Carvalho (2004), ou a estabilidade de ciclos em função da temporização da válvula motora e do ajuste da válvula operadora. Ao mesmo tempo, o bombeio pneumático de Zadson (BPZ) tem apresentado bons resultados em sua aplicação em campos no Brasil, motivando-se estudos para se desenvolverem simuladores computacionais para o projeto e análise destes sistemas. Neste trabalho, foi construído um simulador físico para os métodos GLI convencional e BPZ, para validar simuladores numéricos propostos anteriormente por outros autores. O aparato laboratorial é constituído por quatro conjuntos operacionais: o primeiro conjunto representa a coluna de produção do GLI convencional, o segundo conjunto representa a coluna do BPZ, o terceiro conjunto representa o acoplamento poço-reservatório e o quarto conjunto representa a injeção de gás comprimido. Para a medição, há transdutores de pressão localizados em vários pontos do aparato e tanques de medição do volume produzido. O sistema de aquisição de dados e atuação das válvulas operadora e motora são operados por uma placa micro-controlada. Testes foram realizados alterando-se as variáveis operacionais dos métodos. Como conclusões do trabalho foram identificadas a concomitância das etapas do ciclo GLI, avaliado o *fallback* para várias condições operacionais, estudada a estabilidade dos ciclos de GLI, e desenhado um mapa operacional das condições de um ciclo GLI regular. Além disso, foi testado o funcionamento de três modos de operação do BPZ.

Palavras-Chave: *Gas-Lift*; Bombeio Pneumático de Zadson; Poço de Petróleo; Elevação Artificial.

Abstract

Despite the advances achieved so far, some important aspects of the operation of the conventional intermittent gas-lift (IGL) remain unexplored or poorly studied, as for instance, the concurrency of cycle stages, as presented by Carvalho (2004), or the stability of cycles due to motor valve timing and adjustment of the gas-lift valve. At the same time, the Zadson pneumatic pump (ZPP) has presented good results in Brazilian fields, motivating studies to develop computational simulators for the design of this method. In the course of the present work, a physical simulator was built for the IGL and ZPP, to validate numerical simulators proposed by previous authors. The laboratory apparatus consists of four operational sets; the first set is the production column of conventional IGL, the second set is the column of ZPP, the third set represents the well-reservoir coupling and the fourth set is the injection of compressed gas. For measurement, there are pressure transducers located at various points of the apparatus and tanks for measuring the produced volume. The system of data acquisition and actuation of gas-lift and motor valves are operated by a microcontroller board. Tests were performed by changing the operating variables of the gas lift methods. The results of the study are: the identification of the concurrent stages during the IGL cycle, the fallback for various operating conditions, the stability of IGL cycles, and an operating map for the conditions of a stable IGL cycle. In addition, the operation of three lifting modes of the ZPP were tested.

Keywords: Gas-Lift; Zadson Pneumatic Pump; Oil Well.

Sumário

	Pág
Sumário	xvii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxiii
Nomenclatura	xxv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo	4
Capítulo 2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 <i>Gas-lift</i> intermitente	5
2.1.1 Tópicos de estudo do GLI	5
2.1.2 Projeto do simulador físico	9
2.2 Bombeio pneumático Zadson	10
Capítulo 3 Fundamentação teórica	13
3.1 Fundamentação teórica sobre o <i>gas-lift</i> intermitente	13
3.1.1 Teorema II de Buckingham	13
3.1.2 Tipo de instalação para GLI no Brasil	14
3.1.3 <i>Fallback</i>	15
3.1.4 Ciclo de <i>gas-lift</i> intermitente	16
3.1.5 Válvula operadora e sua dinâmica	18
3.1.6 Amplitude da válvula operadora	21
3.1.7 Válvula motora e temporização	22
3.2 Fundamentação teórica sobre o bombeio pneumático Zadson	23
3.2.1 Completação do poço	23
3.2.2 Sistema de superfície	23
3.2.3 Ciclo de operação	24
Capítulo 4 Análise dimensional e semelhança	29
4.1 Condições sobre o projeto	29
4.2 Análise dimensional para o GLI	30
4.3 Modelo e protótipo	31
4.4 Considerações sobre a análise dimensional	33

Capítulo 5	Projeto do poço modelo para GLI	35
5.1	Considerações a respeito do projeto dos aparatos	35
5.2	Diâmetro da coluna de produção	35
5.3	Diâmetro de revestimento	35
5.4	Volume que representa o revestimento	36
5.5	Pressão do reservatório	38
5.6	Pressão no fundo da coluna de produção	39
5.7	Pressão na coluna de produção na profundidade da válvula operadora	40
5.8	Pressão de abertura da válvula operadora na coluna de produção	40
5.9	Pressão de abertura da válvula operadora no revestimento	41
5.10	Diâmetros da válvula operadora	42
5.11	Pressão de domo na válvula operadora	42
5.12	Válvula operadora	42
5.13	Pressão de injeção	43
5.14	Volume de gás requerido por ciclo de GLI	45
5.15	Volume da caixa de alimentação de líquido	46
5.16	Estimativa do índice de produtividade	47
5.17	Tempo de injeção para abertura da válvula operadora	48
5.18	Tempo de elevação e produção da golfada	49
Capítulo 6	Projeto do poço modelo para BPZ	51
6.1	Determinação de níveis de acumulação para o protótipo	52
6.2	Projeto do poço modelo para BPZ	54
Capítulo 7	Descrição do simulador físico	63
7.1	Subsistema acoplamento poço-reservatório	65
7.2	Subsistema de injeção de gás	66
7.3	Subsistema de coluna de produção	68
7.4	Sistema de automação	68
Capítulo 8	Comportamento dinâmico do poço modelo nos ciclos de GLI	73
8.1	Caracterização do poço modelo GLI	73
8.1.1	Influência da pressão de injeção	74
8.1.2	Influência da pressão de fechamento da válvula operadora	76
8.1.3	Influência da carga de líquido na coluna	78
8.2	Estabilidade	79
Capítulo 9	Comportamento dinâmico do poço modelo nos ciclos de BPZ	87
9.1	Primeiro modo de pressurização BPZ	88
9.1.1	Procedimento	88
9.1.2	Análise dos resultados	88
9.2	Segundo modo de pressurização BPZ	91
9.2.1	Procedimento	91
9.2.2	Análise dos resultados	92
9.3	Terceiro modo de pressurização BPZ	95

9.3.1	Procedimento	95
9.3.2	Análise dos resultados	95
Capítulo 10 Conclusões e recomendações		99
10.1	Conclusões sobre o GLI	99
10.2	Conclusões sobre o BPZ	101
10.3	Sugestões para trabalhos futuros	102
Referências Bibliográficas		105
Anexo I Equipamento		107

Lista de Figuras

Figura 1.1	Métodos de elevação artificial	3
Figura 2.1	Elevação da golfada de líquido no GLI	9
Figura 3.1	Instalação convencional de um poço GLI	14
Figura 3.2	<i>Fallback</i> nos primeiros ciclos de produção (Santos, 1997)	16
Figura 3.3	Sequência de estágios de um ciclo de intermitência do método de elevação GLI convencional (Santos, 1997)	17
Figura 3.4	Representação esquemática de uma válvula operadora de <i>Gas Lift</i> de fole carregado, sem mola e não compensada.	19
Figura 3.5	Dinâmica do ciclo GLI (Carvalho, 2004)	21
Figura 3.6	Operação da válvula motora	23
Figura 3.7	Esquema da completação de um poço para BPZ, com três colunas (Santana <i>et al.</i> , 2005b)	24
Figura 3.8	Sequência de estágios de um ciclo de intermitência do método de elevação BPZ, poço de 3 colunas (Santana <i>et al.</i> , 2005a)	25
Figura 3.9	Sequência de acionamento das válvulas V1, V2 e V3, nas etapas do ciclo BPZ, operando no modo 1	26
Figura 5.1	Magnitudes para as pressões do reservatório	39
Figura 5.2	Magnitude de pressões no fundo da coluna e na profundidade da válvula operadora	40
Figura 5.3	Magnitude para as pressões de abertura a montante da válvula operadora	41
Figura 5.4	Magnitude para as pressões no domo da válvula operadora	43
Figura 5.5	Esquema representativo para a válvula operadora na construção experimental	43
Figura 5.6	Magnitude das pressões de injeção para $R=0,255$	44
Figura 5.7	Volume de gás injetado em função da altura da golfada	46
Figura 5.8	Valores de velocidade de alimentação e o IP em função da altura de líquido e tempo de alimentação	48

Figura 5.9	Tempo de elevação e produção da golfada para as colunas de 1, 1.5 e 2 pol	50
Figura 6.1	Representação esquemática do poço protótipo para BPZ com três colunas (Santana <i>et al.</i> , 2005b)	52
Figura 6.2	Dimensões do poço protótipo BPZ com níveis de acumulação	55
Figura 6.3	Diâmetros das colunas do poço modelo BPZ	57
Figura 6.4	Válvula de retenção do poço modelo BPZ	58
Figura 6.5	Luvas para conexão das colunas BPZ	59
Figura 6.6	Esquema dos canhoneados na coluna BPZ	60
Figura 6.7	Dimensões do poço modelo BPZ com níveis de acumulação	61
Figura 7.1	Diagrama do simulador físico de <i>gas lift</i> intermitente e bombeio pneumático Zadson	64
Figura 7.2	Subsistema Acoplamento poço-reservatório, (a) Tanque reservatório T1, (b) Acoplamento poço-reservatório	65
Figura 7.3	Subsistema de injeção de gás, (a) Sistema de compressão de gás (b) Válvula motora	66
Figura 7.4	Subsistema de Injeção de gás para GLI, (a) Tanques que representam os revestimentos, (b) Válvula operadora	67
Figura 7.5	Subsistema de Injeção de gás para BPZ, (a) Válvulas de compressão e decompressão do BPZ, (b) Conexões do anular externo e intermediário do BPZ	67
Figura 7.6	Colunas de produção de GLI e BPZ	68
Figura 7.7	Subsistema de coluna de produção, (a) Alimentação da coluna BPZ, (b) Válvulas de retenção superior e inferior	69
Figura 7.8	Controlador lógico programável dos sistema GLI e BPZ	69
Figura 7.9	Software controlador GLI-BPZ	70
Figura 8.1	Percentagem de recuperação por pressão de injeção a montante da válvula operadora, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar	75
Figura 8.2	Volume de recuperação por pressão de injeção a montante da válvula operadora para carga de 0,3 bar	76
Figura 8.3	Percentagem de recuperação por pressão de fechamento para coluna de 1 pol, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar	77

Figura 8.4	Percentagem de recuperação por pressão de fechamento para coluna de 1,5 pol, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar	77
Figura 8.5	Percentagem de recuperação por pressão de fechamento para coluna de 2 pol, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar	78
Figura 8.6	Percentagem de recuperação por volume de gás injetado, Coluna de 1 Pol para duas cargas de líquido, pressão de injeção $P_{co} = 1,5 bar$	79
Figura 8.7	Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 100 s$, $t_{inj} = 10 s$, $P_d = 0,5 bar$	80
Figura 8.8	Ciclo de operação GLI	80
Figura 8.9	Comportamento das pressões no momento da elevação da golfada de líquido	81
Figura 8.10	Mapa operacional $P_d = 0,5 bar$	82
Figura 8.11	Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 50 s$, $t_{inj} = 10 s$, $P_d = 0,5 bar$	83
Figura 8.12	Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 160 s$, $t_{inj} = 10 s$, $P_d = 0,5 bar$	83
Figura 8.13	Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 100 s$, $t_{inj} = 2 s$, $P_d = 0,5 bar$	84
Figura 8.14	Mapa operacional $P_d = 0,6 bar$	85
Figura 8.15	Percentagem de recuperação na coluna de 1 pol	85
Figura 8.16	Repetibilidade dos testes e ajuste de pontos	86
Figura 9.1	Esquema da coluna para BPZ utilizada no simulador físico	87
Figura 9.2	Dinâmica do BPZ modo 1, $t_1 = 160 s$, $t_2 = 4 s$, $t_3 = 14 s$	89
Figura 9.3	Estabilidade do BPZ modo 1, (a) estável, (b) irregular	90
Figura 9.4	Influência de t_1 e t_4 na dinâmica do BPZ (modo 1)	91
Figura 9.5	Dinâmica do BPZ modo 2, $t_1 = 100 s$, $t_2 = 4 s$, $t_4 = 8 s$	92
Figura 9.6	Estabilidade do BPZ modo 2	93
Figura 9.7	Comportamento das pressões para t_4 longos	93
Figura 9.8	Influência de t_1 e t_4 na dinâmica do BPZ (modo 2)	94
Figura 9.9	Dinâmica do BPZ modo 3	96
Figura 9.10	Estabilidade dos ciclos para o terceiro modo de pressurização do BPZ, (a) tempo de alimentação longo, (b) tempo de alimentação curto, (c) tempo de injeção longo, (d) tempo de injeção curto.	97
Figura I.1	Sistema de medição de pressão, (a) Transmissores de pressão, (b) Calibração dos transmissores de pressão	109
Figura I.2	Diagrama da válvula solenóide utilizada como válvula operadora e motora, to- mada do manual Asco de válvula solenóide	109

Figura I.3	Bombas do subsistema poço-reservatório.	110
Figura I.4	Sistema de compressão de ar, (a) Compressor de Ar, (b) Válvula reguladora de pressão	110

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Sequência de acionamentos das válvulas V1, V2 e V3, nas etapas do ciclo do BPZ	27
Tabela 4.1	Grandezas envolvidas na análise do GLI	30
Tabela 4.2	Grupos adimensionais envolvidos no GLI	31
Tabela 4.3	Principais características do poço empregado como protótipo	32
Tabela 4.4	Características base do poço modelo	32
Tabela 4.5	Principais características do poço modelo	33
Tabela 5.1	Valores para relação entre diâmetros nominais de revestimento e de coluna de produção aplicados em campo	36
Tabela 5.2	Valores para o diâmetro do revestimento dos poços modelo	36
Tabela 5.3	Valores para o diâmetro e volume do revestimento dos poços modelo	37
Tabela 5.4	Valores para o diâmetro do revestimento dos poços modelo	38
Tabela 5.5	Valores de diâmetro de sede e Razão R da válvula operadora para $A_b = 0,77 \text{ in}^2$	42
Tabela 5.6	Valores para o volume da caixa de alimentação de líquido	46
Tabela 5.7	Valores máximos e mínimos para as pressões no fundo P_{wf} da coluna e no reservatório P_R	47
Tabela 6.1	Principais características de um poço convencional BPZ (Gomez, 2008)	51
Tabela 6.2	Valores de áreas no poço protótipo BPZ	53
Tabela 6.3	Níveis de acumulação no poço protótipo BPZ	54
Tabela 6.4	Relação de diâmetros do poço protótipo BPZ	55
Tabela 6.5	Relações de diâmetros do poço modelo BPZ mais próximas ao protótipo com base na disponibilidade de mercado	56
Tabela 6.6	Relações de diâmetros do poço modelo BPZ	56
Tabela 6.7	Diâmetros das colunas do poço modelo BPZ	57
Tabela 6.8	Dimensões de válvula de retenção vertical superior e inferior	58
Tabela 6.9	Níveis de acumulação no poço modelo BPZ	60

Tabela 8.1	Características de poços GLI utilizados em trabalhos anteriores	75
Tabela I.1	Especificações dos transmissores de pressão	107
Tabela I.2	Especificações das válvulas solenóide	107
Tabela I.3	Especificações dos transmissores de pressão	108
Tabela I.4	Especificações do compressor do sistema injeção de gás	108

Nomenclatura

Subscrito

al	Alimentação lateral
b	Fole da válvula operadora (<i>belows</i>)
bolha	Bolha de gás
c	Cauda
c	Ciclo
c	Fechamento (<i>closing</i>)
c	Revestimento (<i>casing</i>)
d	Domo da válvula operadora
e	Externo
elev	Elevação
f	Final
i	Inicial
i	Interno
inj	Injeção
L	Líquido
li	Nível de líquido à partir da válvula operadora
m	Intermediário
o	Abertura (<i>opening</i>)
p	Sede da válvula operadora (<i>port</i>)
R	Revestimento
s	Golfada (<i>slug</i>)
sc	Condição padrão (<i>standard condition</i>)
t	Coluna de produção (<i>tubing</i>)
vo	Válvula operadora
w	Canhoneio
wf	Fundo de poço (<i>wellbore flowing</i>)

- wh Cabeça de poço (*well head*)
 wv Altura da válvula operadora à partir do canhoneio

Letras Gregas

α	Constante	[-]
γ	Peso específico	[-]
λ	Constante	[-]
Π	Grandeza adimensional	[-]
ρ	Densidade absoluta	[kg/m ³]

Siglas

- BPZ Bombeio Pneumático Zadson
 GLC Gas Lift Contínuo
 GLI Gas Lift Intermitente
 IP Índice de Produtividade
 RGLI Razão de Gás injetado por Líquido produzido

Letras Latinas

A	Área	[m ²]
D	Diâmetro	[m]
F	Força	[N]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Altura	[m]
h	Nível de líquido	[m]
K	Coeficiente de descarga da válvula	[-]
M	Massa Molar	[kg/kgmol]
P	Pressão	[Pa]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
R	Razão entre as áreas da sede e do fole da válvula operadora	[-]
S	Amplitude (<i>Spread</i>)	[Pa]
S	Área lateral da golfada	[m ²]

T	Temperatura	[K]
t	Tempo	[s]
V	Volume	[m ³]
Z	Fator de compressibilidade	[-]

Capítulo 1

Introdução

No início da vida produtiva de alguns poços de petróleo, a pressão existente no reservatório consegue elevar os fluidos contidos neles até a superfície, sendo os poços denominados surgentes. Na medida em que a produção progride ao longo do tempo, a pressão no reservatório diminui até um ponto em que não se consegue sustentar o escoamento dos fluidos nos poços em vazões economicamente atraentes.

Desse ponto em diante, a produção requer o auxílio de métodos de elevação artificial para fornecer o suplemento de energia necessário para realizar a elevação. Alguns desses métodos incluem a elevação a gás, a bomba centrífuga submersa, o bombeamento mecânico com hastes etc (Brown, 1980).

A seleção do método depende de aspectos como localização geográfica do campo, custos operacionais e de capital, características do reservatório, conhecimento e familiaridade com o método por parte do pessoal técnico da empresa operadora, entre outros (Bucaram e Patterson, 1994).

Entre os métodos de elevação artificial existentes, o método de *gas-lift* é muito empregado na indústria do petróleo em situações onde há disponibilidade de gás a alta pressão e a um baixo custo, em poços desviados ou onde a razão gás-óleo seja alta, nos quais o emprego de outros métodos de bombeio implicaria em baixa eficiência volumétrica ou em problemas operacionais (Velloso, 1992).

O *gas-lift* é um método de elevação artificial baseado na injeção de gás como fonte externa de energia para a elevação dos fluidos desde o fundo do poço até a superfície. Em função da temporização da injeção de gás, o método se classifica como contínuo ou intermitente.

O método de *gas-lift* contínuo (GLC) é realizado por uma contínua injeção de gás a alta pressão, no ponto mais profundo possível do poço, com o propósito de reduzir a densidade da mistura de fluidos em ascensão, reduzindo-se a pressão de fundo do poço, e possibilitando-se maior vazão do fluido advindo do reservatório. Aplica-se, em geral, no início da fase produtiva do poço, onde normalmente a pressão estática do reservatório e o índice de produtividade são elevados (Chacín, 1994).

No *gas-lift* intermitente (GLI), a injeção de gás ocorre em intervalos regulares, temporizados com a capacidade de alimentação do poço pelo reservatório. Essa metodologia é detalhada na seção 3.1.4.

O método de GLI é um método adequado para campos maduros, onde a pressão estática do reservatório e o índice de produtividade (IP) são baixos, com as vantagens de um baixo custo para equipar o poço, a adoção de centrais de compressão e boa confiabilidade operacional, desde que haja disponibilidade de gás e o sistema seja projetado para vazões pulsáteis (Carvalho, 2004).

O GLI ganha importância, substituindo-se o GLC em função da depleção do reservatório. Assim, em um poço utilizando-se GLC, a pressão estática do reservatório cai eventualmente para um valor a partir do qual a injeção contínua de gás torna a elevação do óleo ineficiente ou não econômica. Nessa condição, a utilização do GLI pode ser a melhor alternativa (Chacín, 1994).

Embora o *gas-lift* intermitente seja utilizado como método de elevação há noventa anos, a natureza do estado transitório do processo de GLI não foi tratada por um modelo dinâmico para simular o funcionamento cíclico até 1995, com os trabalhos de Machado (1988), Liao *et al.* (1995), Santos (1997) e Carvalho (2004).

Como tentativa de se aumentar a eficiência econômica de extração do óleo dos campos em terra no Brasil, desenvolveu-se um método de elevação artificial a gás, denominado Bombeio Pneumático de Zadson (BPZ)¹. Esse método realiza a elevação do óleo através de ciclos de compressão e descompressão de gás, tornando-se um método alternativo para poços maduros, de baixa pressão estática e altas razões gás-líquido, para os quais os métodos de *gas-lift* contínuo e bombeio mecânico são ineficientes (Gomez, 2008). A Figura 1.1 mostra completações de poços utilizando três métodos de elevação artificial.

1.1 Motivação

Certos campos maduros brasileiros (que apresentam produção declinante e que podem estar próximos de seu limite econômico) são objeto de estudos de aplicação de métodos que possibilitam a manutenção da sua produção, devido ao favorável preço do barril de petróleo, ao lado da importância sócio-econômica desses campos para as regiões próximas às suas localizações, seja pela absorção de mão de obra, aquecimento do comércio e da indústria ou recolhimentos de impostos.

¹A ENGEPET é uma empresa qualificada pela Petrobras para a comercialização da tecnologia do Bombeio Pneumático.

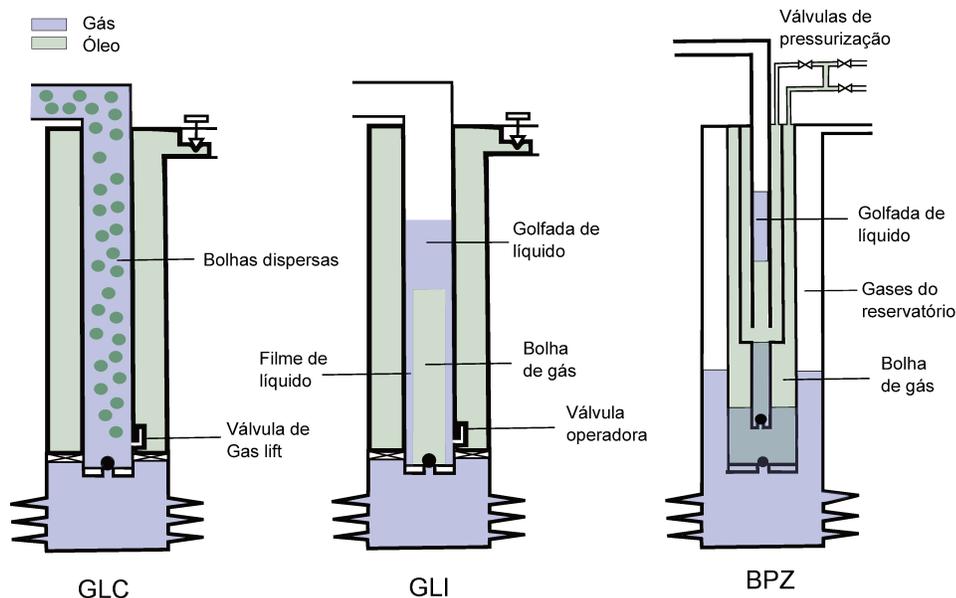


Figura 1.1: Métodos de elevação artificial

Nesse cenário, os métodos de *gas-lift* intermitente (GLI) são significativamente atraentes. Logo, o correto projeto e operação do GLI são de fundamental importância para a produção economicamente viável do poço e, conseqüentemente, do campo petrolífero.

Entretanto, a modelagem dos métodos de *gas-lift* intermitente (GLI) foi relativamente pouco estudados e apresentados na literatura até recentemente, considerando-se quase um século de utilização.

A partir dos modelos semi-empíricos surgidos após o trabalho pioneiro de Brown e Jessen (1962), a compreensão da dinâmica de operação do GLI e sua modelagem evoluíram para a descrição dos fenômenos observados no poço através de modelos mecanicistas (Liao *et al.*, 1995), baseados nos princípios da mecânica clássica.

Apesar dos avanços alcançados, alguns aspectos importantes da operação do GLI permaneceram inexplorados até o trabalho de Santos (1997) e Carvalho (2004). A divisão da operação do GLI em etapas sequenciais, assumida nos modelos mecanicistas tradicionais encontrados na literatura, restringe a análise do comportamento dinâmico do poço a uma faixa de condições operacionais limitada. De fato, dependendo-se dos parâmetros ajustados no GLI e das condições de contorno do poço, algumas das etapas consideradas podem ser concomitantes e, em decorrência, a produção observada na superfície pode diferir sensivelmente daquela predita pelos modelos anteriores. Um simulador dinâmico com etapas acopladas foi proposto por Carvalho (2004).

O bombeamento pneumático de Zadson (BPZ) é um método com base na bomba à gás, patente-

ado em 1999 (Santana *et al.*, 2005b). Apesar de existir há uma década, ainda apresenta lacunas de conhecimento, devido ao escasso número de dados operacionais disponíveis, à complexidade das etapas envolvidas no ciclo de operação do sistema e à variedade de condições que um BPZ pode apresentar. Com isso, os modelos existentes são bastante simplificados, sendo ajustados com os poucos dados de processo disponíveis. Portanto, representam com certa confiança apenas sistemas com características semelhantes de projeto, reservatório e localização (Gomez, 2008).

Neste contexto, faz-se importante a construção de um simulador físico, que permita o estudo de alguns dos tópicos da mecânica dos fluidos ou aspectos operacionais inexplorados ou poucos estudados do GLI e BPZ, enriquecendo-se o conhecimento dos métodos e, desse modo, melhorando-se o projeto dos sistemas e otimizando-se a produção.

1.2 Objetivo

Dimensionar e construir, em escala de laboratório, um simulador físico de poço com GLI e outro com BPZ, para entender melhor as etapas de ciclo dos métodos de elevação artificial intermitente e obter dados para testar a modelagem matemática utilizada em simuladores computacionais.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A primeira parte deste capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre o método de *gas lift* intermitente. Na segunda parte, se apresenta uma resumida história do BPZ.

2.1 *Gas-lift* intermitente

A revisão bibliográfica sobre o GLI foi classificada em duas seções: a primeira contém os principais aspectos a serem estudados no método de GLI, dos quais alguns foram abordados no presente trabalho: produção de óleo e o *fallback*. A segunda seção contém os principais aspectos práticos do projeto do simulador físico.

2.1.1 Tópicos de estudo do GLI

Desde o estudo reconhecido como um dos precursores sobre GLI feito por Brown e Jessen (1962), vários outros estudos têm sido apresentados, enriquecendo a compreensão deste método de elevação. Alguns estudos experimentais propuseram os chamados modelos semi-empíricos e outros focaram sua pesquisa na construção de modelos mecanicistas, baseados nos princípios da mecânica clássica.

As contribuições feitas pelos diversos autores foram classificadas nesse trabalho por temas relevantes no estudo de GLI. Assim, mediante trabalhos experimentais futuros, utilizando-se o simulador físico, pretende-se abordar esses aspectos, reafirmando-se os conceitos mencionados em anteriores trabalhos e, explorando-se aqueles que tenham lacunas de conhecimento.

Produção de óleo no GLI

Brown e Jessen (1962) citaram a importância da análise econômica no balanço energético do método GLI, porque em muitos casos, o operador está interessado apenas na quantidade de óleo

no tanque e deixa de considerar a otimização econômica como um fator importante. Isso acontece quando o gás de uma planta próxima está sendo utilizado e o uso adicional de gás não é tão crítico como poderia ser para outros sistemas GLI. Em conformidade, uma estimativa econômica nos revela perdas financeiras devido ao excesso de gás.

White (1963) considerava a quantidade de líquido produzido igual à golfada que alcança a superfície, elevada pelo gás em ascensão.

Nelly *et al.* (1973) obtiveram diferentes resultados aos de White (1963) em termos de volume produzido, devido a que White não considerou o líquido produzido depois da golfada em forma de nevoa com o gás (*afterflow*), e isto pode ser a causa da diferença da eficiência de recuperação em comparação aos dados de (Brown e Jessen, 1962), os quais foram similares aos obtidos por Nelly *et al.* (1973).

Schmidt *et al.* (1984) concordaram com Nelly *et al.* (1973) dando atenção à importância do *afterflow*, já que em algumas ocasiões, mais que 50% do líquido produzido foi atribuído ao *afterflow*.

Brill e Doerr (1967) concluíram que a maior recuperação de líquido e o menor tempo de ciclo são alcançados com a injeção de gás até a chegada da golfada na superfície.

Santos (1997) concluiu que quanto maior o comprimento da coluna inicial para as mesmas condições de operação, menor o *fallback* de líquido por ciclo. Contudo, é menor a vazão diária de produção.

Carvalho (2004) identificou que em certas condições, as etapas de injeção e alimentação podem ser simultâneas, e não sequenciais como era assumido em trabalhos anteriores. Também fez uma análise da estabilidade dos ciclos, que identificou estar fortemente ligada à temporização da válvula motora e calibração da válvula operadora.

Fallback

Fallback é o líquido despreendido da golfada durante a elevação, aderindo-se à coluna de produção em forma de filme, podendo representar uma substancial parte da golfada original; portanto, o controle do *fallback* é de vital importância, visto que determina o sucesso de uma instalação de *gas-lift* intermitente. Contudo, o conhecimento que se tem deste fenômeno ainda é incompleto. Assim, a incapacidade de prever o *fallback* dificulta o projeto de muitas instalações. Em muitos casos, alta percentagem de recuperação é conseguida, mas com frequência, a um excessivo custo operacional (Brill e Doerr, 1967). Logo, vários autores têm explorado este tópico, chegando às premissas apresentadas a seguir:

Brill e Doerr (1967) foram os primeiros a elaborar uma racionalização para o *fallback*, explicando que há vários fatores que tendem a promover a penetração do gás no líquido, resultando na perda de produção de líquido. Os autores afirmaram que, como o gás tem menor densidade que o líquido, há uma força de empuxo ascendente que faz com que o gás ascenda à uma velocidade maior que a velocidade da golfada.

Uma visão diferente do *fallback* foi dada por Nelly *et al.* (1973), na qual define o *fallback* como uma função da velocidade do gás, afirmando que a coluna de gás ascendendo pode conter e estar em equilíbrio de forças com certa quantidade de líquido, que permanece suspenso no gás, mas sem ser elevado. Isto pode ser comparado com um escoamento contínuo vertical bifásico (gás-líquido), com uma velocidade do gás finita e velocidade de líquido zero. Se aquela condição prevalece depois da golfada de líquido e o líquido em forma de neva (chamado de *afterflow*) já tenham alcançado a superfície, o líquido suspenso irá escorrer como líquido não recuperado depois de ter terminado o escoamento de gás.

Santos (1997) realizou um estudo do *fallback* para vários ciclos, observando que o impacto deste na produção pode não ser tão adverso quanto apregoado em estudos anteriores, onde o *fallback* foi estimado apenas para um ciclo de produção.

Válvula operadora

Brown e Jessen (1962) estudaram o efeito do diâmetro da porta da válvula operadora no *gas-lift* intermitente, chegando às seguintes conclusões:

- Quanto maior o diâmetro de porta, maior será a eficiência da elevação e também menor a razão de gás injetado por líquido produzido (RGLI); menor o período de restauração da carga graças à menor contrapressão exercida sobre o reservatório; e maior pressão embaixo da golfada e, portanto, maior velocidade da golfada;
- Um tamanho de porta maior resultará em maior percentagem de recuperação. Contudo, quando é utilizado um excesso de gás, o tamanho da porta perde influência na percentagem de recuperação;
- A pressão da coluna na profundidade da válvula operadora parece decrescer enquanto a área da porta aumenta.

Brill e Doerr (1967) observaram que o escoamento de gás através da válvula operadora é dependente tanto da pressão na coluna quanto da pressão no espaço anular, para condições de escoamento

subsônico.

Nelly *et al.* (1973) chegaram às seguintes conclusões a respeito da válvula operadora:

- A atuação da válvula operadora é muito mais lenta do que tinha sido normalmente considerado na literatura (abertura quase instantânea);
- A operação da válvula operadora é significativamente influenciada pela vazão na qual o gás é injetado dentro do revestimento na superfície. Para baixa vazão de injeção, a válvula opera lentamente, e para alta vazão a abertura da válvula é rápida.

Velocidade da golfada

White (1963) foi um dos primeiros a explorar este tema; mediante seu estudo, propôs duas importantes premissas: a primeira diz que a velocidade da golfada passa a ser constante depois de poucos segundos do início da injeção de gás na coluna de produção, o mesmo acontecendo com a velocidade de penetração do gás na golfada em elevação; e a segunda assegura que a energia de expansão do gás é suficiente para elevar toda a golfada de líquido.

Brill e Doerr (1967) refutaram as afirmações de White (1963) com base nos resultados de seus testes experimentais, referente à primeira afirmando que há uma aceleração acentuada da golfada de líquido no início da elevação e ao longo da sua produção até a superfície. Também refutou a segunda afirmação, assegurando que a elevação promovida pela expansão do gás é ineficiente, uma vez que a velocidade de ascensão da golfada cai, rapidamente, após o fechamento da válvula operadora.

Nelly *et al.* (1973) concordaram com a premissa de White (1963) referente à velocidade da golfada, afirmando que, depois de uma aceleração inicial, a velocidade da golfada permanece razoavelmente constante pela maior parte de sua viagem à superfície. O tempo de aceleração depende do diferencial de pressão na válvula, que em muitos casos, é consideravelmente grande.

Interface gás-líquido

White (1963) reportou uma interface entre o gás e o líquido como se mostra na Figura 2.1, observada durante seus experimentos. Conjecturou que, apesar da interface existir ao longo de toda coluna, é possível que não permaneça estável.

Brill e Doerr (1967) estudaram a interface gás-líquido; um dos seus focos foi o efeito capilar na interface, chegando às seguintes conclusões:

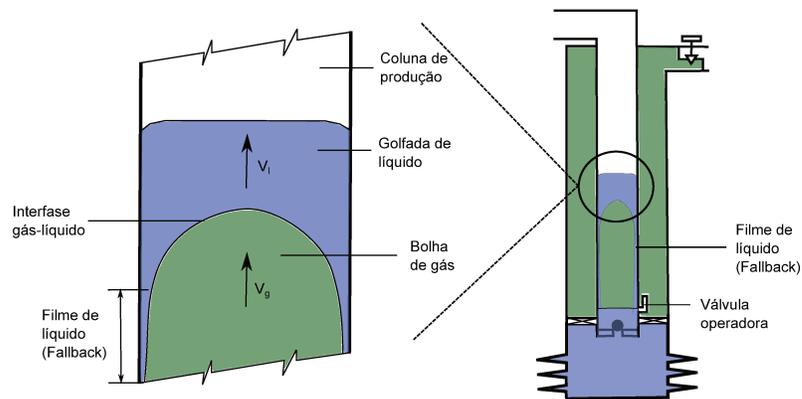


Figura 2.1: Elevação da golfada de líquido no GLI

- A forma da interface é tal que a soma de forças ascendentes promove alta penetração;
- A Força capilar pode ser importante na proximidade da interface onde a área de contato entre o líquido e o gás é menor, o qual tende a impedir a penetração, na medida em que a força resultante é exercida para baixo;
- A presença do efeito capilar pressupõe a descontinuidade da pressão ao longo da interface. Contudo, Street e Tek (1965) chegaram a conclusões de que a descontinuidade da pressão é negligenciável.

Por outro lado, Brill e Doerr (1967) concluíram, mediante análise de dados obtidos no seu trabalho, que uma alta velocidade de golfada leva a uma baixíssima penetração do gás.

Por último, Brill e Doerr (1967) afirmaram que os trabalhos anteriores assumem a existência da interface gás-líquido abaixo da golfada de líquido. Mas isto, sem dúvida, representa uma situação ideal. É mais razoável visualizar uma zona de transição entre a golfada de líquido e gás denso ou líquido saturado em fase gasosa. A zona de transição pode existir ao longo de toda a coluna.

2.1.2 Projeto do simulador físico

Nesta seção são descritos os principais aspectos práticos referentes ao projeto do simulador físico para GLI e planejamento dos testes realizados no trabalho.

Alguns dos trabalhos experimentais de autores anteriores: Brown e Jessen (1962), White (1963), Brill e Doerr (1967), Nelly *et al.* (1973) serviram como referência para o projeto e construção do

simulador físico para GLI deste trabalho, além da identificação de variáveis controláveis e variáveis importantes de se estudar, tomando-as como base no planejamento dos testes realizados.

White (1963) identificou a dependência da quantidade de líquido produzido por ciclo com algumas razões adimensionais: carga inicial sobre profundidade, área da porta da válvula sobre a área da coluna, pressão de revestimento sobre pressão de coluna e tipo de fluido.

Brill e Doerr (1967) identificaram algumas das variáveis que podem ser controladas nos testes: diâmetro da coluna e rugosidade, profundidade da válvula operadora, tipo de válvula (incluindo o tamanho da porta e calibração), propriedades do gás de injeção, tempo de injeção, pressão de injeção, pressão da cabeça do poço, tamanho das linhas de superfície, comprimento e restrições e tamanho inicial da golfada.

Brown (1980) descreveu o projeto de instalação de um sistema GLI.

Velloso (1992) explicou os tipos de instalações de *gas lift* intermitente e seus principais elementos: válvula operadora, válvula motora, revestimento, coluna de produção e sistema de compressão. Também descreveu alguns fatores a considerar no projeto do GLI.

2.2 Bombeio pneumático Zadson

O método foi patenteado pela PETROBRAS, em 1999, com o nome de BOMBEIO PNEUMÁTICO PARA ELEVAÇÃO DE PETRÓLEO, sendo de autoria dos engenheiros Zadson Franco e Francisco Alberto Cerqueira de Oliveira, o qual seria mais conhecido com o nome de “BOMBEIO PNEUMÁTICO ZADSON” com a sigla BPZ (Santana *et al.*, 2005a).

O método tem suas bases na “*early gas pumping*”, descrito por Brown (1980), tomando deste método suas principais características (detalhes mecânicos são apresentados na seção 3.2):

- Ciclos de injeção e descompressão de gás, controlados por válvulas temporizadas localizadas na superfície;
- Presença de câmara de acumulação de óleo;
- Princípio de elevação de deslocamento positivo (idéia inicial do BPZ).

Igualmente, BPZ tem similaridade com o *gás lift* intermitente (injeção cíclica de gás para a elevação de óleo), dessa forma conceitos de produção de óleo, *fallback*, velocidade da golfada, interface gás-líquido estudados no GLI são transmitidos no BPZ. Alguns fenômenos físicos envolvidos nos estágios do BPZ são similares aos apresentados no *gas lift* intermitente; dessa forma, modelagens

feitas para GLI, como as apresentadas por Carvalho (2004) e Santos (1997), são uma base importante para a formulação de um modelo para BPZ.

Santana *et al.* (2005a) propuseram um modelamento matemático para a representação dos fenômenos físicos mais relevantes associados ao método de elevação BPZ. O modelo matemático foi obtido aplicando-se os princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento linear a volumes de controle associados aos estágios que constituem o ciclo de intermitência do método.

Gomez (2008) fez uma análise do escoamento compressível de gás natural em espaços anulares com restrições para a elevação de petróleo, aspecto importante no BPZ devido à completação do poço.

A ENGEPEP (Empresa de Engenharia de Petróleo Ltda.) é uma empresa licenciada pela Petrobras para o fornecimento desta tecnologia, e desde 2009, tem operado no Brasil e na Colômbia (ENG, 2012). Segundo a ENGEPEP (2003), a produção do poço utilizando BPZ como método de elevação é função da pressão de fluxo, pressão estática do reservatório e do IP (índice de produtividade), sendo possível obter uma produção satisfatória em reservatórios depletados, desde que se tenha um elevado IP.

Como o método BPZ é relativamente novo, pouquíssima referência bibliográfica foi encontrada na literatura técnica. As maiores fontes de informação ainda são a PETROBRAS e a ENGEPEP.

Capítulo 3

Fundamentação teórica

A fundamentação teórica foi dividida em duas seções, uma referente ao *gas-lift* intermitente e outra ao bombeio pneumático Zadson. Para os dois métodos são descritos os principais elementos da completação do poço e a dinâmica do ciclo de operação. Na seção 3.1, está incluído o teorema Π de Buckingham, utilizado na análise dimensional apresentada no Capítulo 4.

3.1 Fundamentação teórica sobre o *gas-lift* intermitente

Nesta seção são detalhados os principais conceitos referentes ao estudo do *gas lift* intermitente

3.1.1 Teorema Π de Buckingham

Dado um fenômeno físico no qual a grandeza dependente; X_1 , é uma função de $n - 1$ grandezas independentes ($X_2; X_3; X_4...$), podemos expressar a relação entre as variáveis de forma funcional:

$$X_1 = f_1(X_2, X_3, X_4, \dots, X_n)$$

Analogamente, podemos expressar a relação funcional na forma equivalente a uma função não especificada, diferente de f_1 :

$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0$$

O teorema de Buckingham declara que dada uma relação entre n grandezas, estas podem ser agrupadas em $n - m$ razões adimensionais independentes, ou grandezas Π , expressas na forma funcional por:

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0$$

ou

$$\Pi_1 = F_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m})$$

O número m , é, em geral, mas nem sempre, igual ao número mínimo, r , de dimensões independentes necessárias para especificar as dimensões de todas as grandezas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$.

As grandezas independentes geralmente escolhidas são: força, comprimento e tempo (FLT) ou massa, comprimento e tempo (MLT), em fenômenos onde a temperatura não está envolvida juntamente com as outras variáveis, nem há efeitos elétricos e magnéticos.

O teorema não prediz a forma funcional de G ou de F_1 . A relação funcional entre os adimensionais independentes Π deve ser determinada experimentalmente, ou, em casos particulares, por uma combinação de teorias e soluções matemáticas.

As $(n-m)$ grandezas adimensionais Π obtidas com esse procedimento, são independentes. Uma grandeza Π não é independente se ela puder ser formada por um produto ou quociente das outras grandezas adimensionais do problema. Por exemplo, se

$$\Pi_5 = \frac{2\Pi_1}{\Pi_2\Pi_3} \text{ ou } \Pi_6 = \frac{\Pi_1^{3/4}}{\Pi_3^2},$$

então, Π_5 e Π_6 são dependentes das outras grandezas adimensionais Π_1 , Π_2 e Π_3 . A formulação para a determinação dos grupos Π pode ser encontrada em Fox *et al.* (2012).

3.1.2 Tipo de instalação para GLI no Brasil

A instalação fechada é um tipo de instalação muito empregada para o GLI no Brasil. Uma instalação fechada como se apresenta na Figura 3.1, é aquela que tem válvula de pé e obturador (ou *packer*).

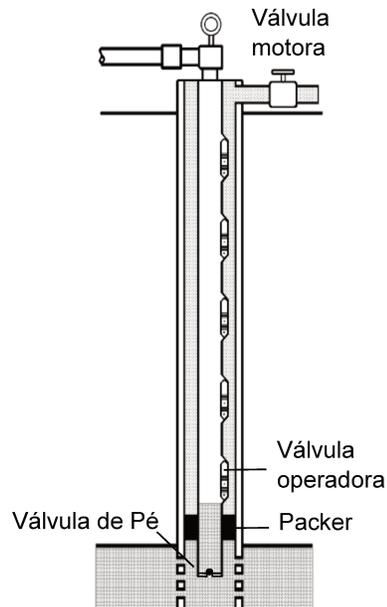


Figura 3.1: Instalação convencional de um poço GLI

A válvula de pé pode estar localizada no fundo do poço, ou a uma profundidade logo abaixo da válvula operadora. A finalidade da válvula de pé é evitar que a pressão do gás injetado na coluna de produção exerça uma contrapressão sobre a formação produtora, podendo causar um dano ou retardar a alimentação do fluido na coluna de produção. Em vez disso, a pressão do gás é aproveitada somente para a elevação da golfada de líquido.

Pelo exposto, é recomendável que se instale uma válvula de pé na maioria das instalações intermitentes, uma vez que é bastante provável que a produção diária do poço cresça. A instalação fechada é, particularmente, aplicável a poços de Pr baixa e IP alto ou baixo.

Um *packer* é usado para vedar o espaço anular entre o revestimento do poço e a coluna de produção, servindo como câmara para a acumulação do gás injetado; também evita que fluido da formação atinja a válvula operadora, podendo danificar a válvula.

A válvula operadora é posicionada no fundo de poço, para se buscar uma máxima produção. Em alguns poços, procura-se evitar um diferencial de pressão excessivo entre a pressão do reservatório e a pressão de fundo do poço, que possa causar a formação de cone de água, produção de areia ou fluxo preferencial de gás, os quais levam à redução da capacidade produtiva do poço; também, muitas vezes a pressão da linha de suprimento disponível é baixa. Nestas hipóteses, a válvula operadora é localizada em algum ponto acima do fundo do poço, de acordo com a pressão média de fluxo, correspondente à vazão desejada (Velloso, 1992).

3.1.3 *Fallback*

Há dois modos de se definir o *fallback*, segundo citado no trabalho de Santos (1997):

FB1 O *fallback* de líquido é calculado como a razão entre a massa de líquido que ficou como filme na parede da tubulação após os estágios de elevação e produção, e a massa inicial da golfada de líquido. Calculando desta forma, o *fallback* de líquido aumenta com o número de ciclos, indicando que a espessura do filme na parede da tubulação aumenta a cada ciclo, tendendo a se estabilizar.

$$FB1 = \frac{m_{filme}}{m_{LiqInicial}} \quad (3.1)$$

FB2 O *fallback* de líquido é calculado como a diferença das massas de líquido inicial da golfada e produzida na superfície dividido pela massa inicial da golfada. A redução no valor de *fallback*

de líquido indica que o volume produzido na superfície aumenta a cada ciclo, tendendo a se estabilizar.

$$FB2 = \frac{m_{LiqInicial} - m_{LiqProduzida}}{m_{LiqInicial}} \quad (3.2)$$

A Figura 3.2 mostra o comportamento do *fallback* nos primeiros ciclos transientes de produção do GLI:

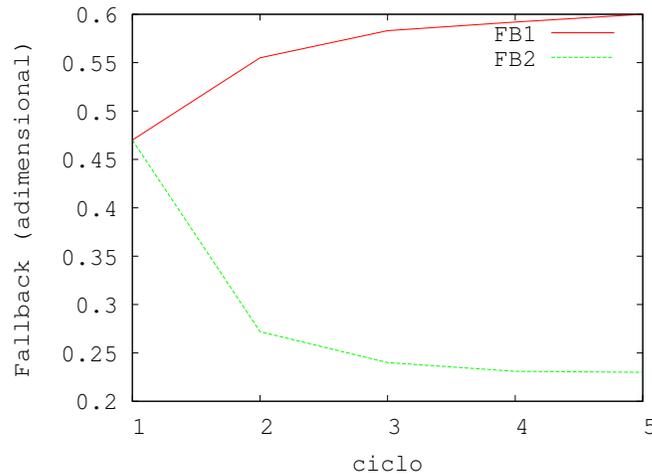


Figura 3.2: *Fallback* nos primeiros ciclos de produção (Santos, 1997)

3.1.4 Ciclo de *gas-lift* intermitente

Neste método a produção de óleo ocorre intermitentemente, ou seja, por ciclos. A cada ciclo, o gás é injetado na coluna de produção, e eleva até a superfície a carga de líquido acumulada na coluna, que foi alimentada previamente pelo reservatório. O ciclo do GLI pode ser dividido em cinco estágios: injeção, elevação, produção, descompressão e alimentação, como se mostra na Figura 3.3. Alguns deles podem acontecer simultaneamente (Carvalho, 2004).

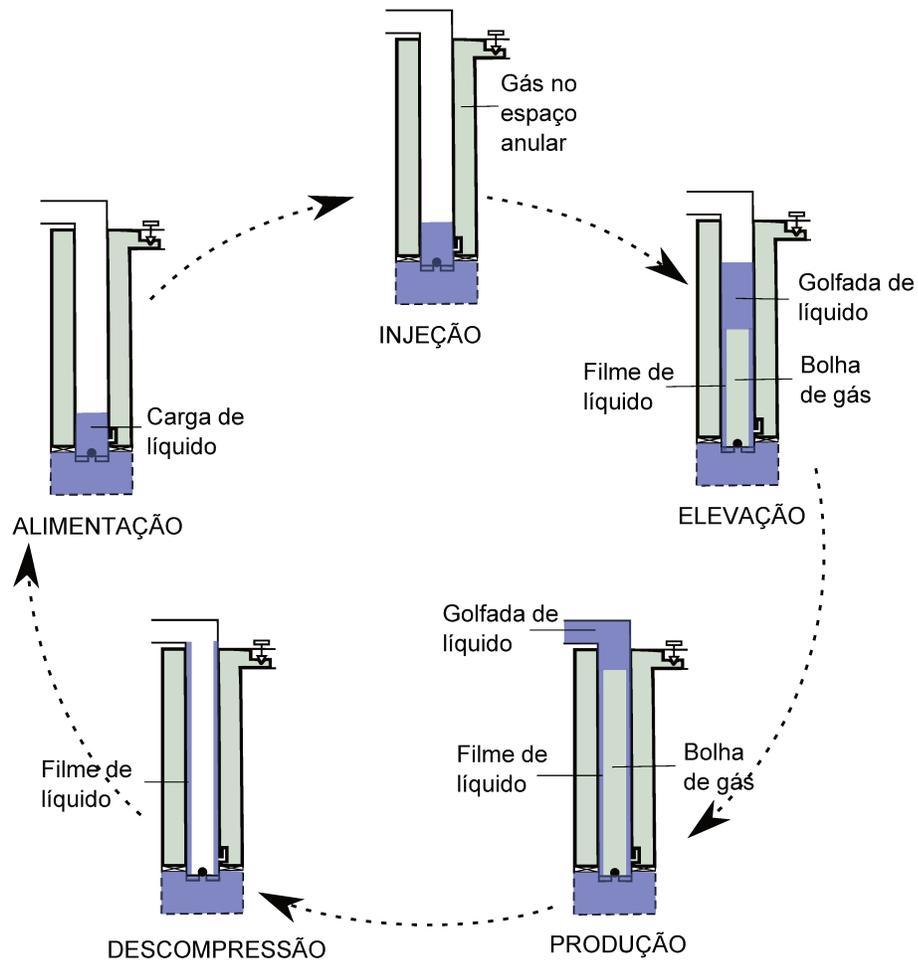


Figura 3.3: Sequência de estágios de um ciclo de intermitência do método de elevação GLI convencional (Santos, 1997)

Injeção

O gás a alta pressão proveniente da linha de suprimento de gás é injetado no topo do revestimento através da válvula motora, durante um intervalo de tempo chamado de tempo de injeção. Como a válvula operadora, no fundo, está fechada, o gás é acumulado e comprimido no espaço anular entre a coluna e o revestimento.

Elevação

O gás é descarregado na coluna de produção através da abertura da válvula operadora localizada no fundo do espaço anular, elevando uma carga de líquido, previamente acumulada na coluna, na forma de golfada. O gás em ascensão penetra parcialmente na golfada, escorrendo líquido a seu redor, que fica para trás como um filme de líquido aderido na parede da coluna ou em forma de

névoa de líquido, entranhada no gás. Este fenômeno é conhecido como *fallback*.

Produção

Este estágio começa quando a golfada de líquido atinge a superfície, sendo transferida do poço para a linha de produção, seguida de uma produção secundária chamada de *afterflow*, durante a qual se produz parte do filme de líquido e a névoa de líquido.

Descompressão

Após o líquido ser produzido, o gás atrás dele escoar para a linha de produção, ocorrendo a descompressão no interior da coluna.

Alimentação

Na medida em que a pressão no interior da coluna de produção volta a diminuir com a expulsão do gás, alcança-se um ponto no qual a pressão no fundo do poço é menor do que a pressão do reservatório; então, a válvula de pé se abre e inicia-se a alimentação de uma nova carga de líquido. O líquido do filme remanescente desce pela parede da coluna até o fundo, ajudando a completar a nova carga de líquido.

3.1.5 Válvula operadora e sua dinâmica

No *gas-lift* intermitente usa-se o espaço anular do poço, entre o revestimento e a coluna de produção, para o armazenamento do gás de injeção, fornecendo-se o volume necessário de gás através de uma válvula temporizada na superfície, ligada à linha de suprimento de gás comprimido. O gás armazenado no espaço anular é injetado na coluna no momento apropriado através de uma válvula, chamada “operadora” ou “de *gas-lift*”. A válvula operadora estudada neste trabalho é do tipo “fole não compensada” (válvula intermitente tipo “*standard*”), uma representação da válvula se mostra na Figura 3.4. A atuação desta válvula é função da combinação entre a pressão no revestimento e a pressão na coluna de produção.

Esta classe de válvula operadora requer um acréscimo mínimo de pressão do revestimento acima da pressão de abertura inicial para se abrir totalmente. Deste modo, será possível injetar uma grande vazão de gás dentro da coluna, abaixo da golfada a ser lançada para a superfície. Por essa razão, de um modo geral, as válvulas operadoras não possuem mola. Também deverá permanecer

totalmente aberta até o instante do fechamento, de tal modo que a sua pressão de fechamento real seja igual à pressão de fechamento teórica, deduzida a partir das equações de balanço (Velloso, 1992).

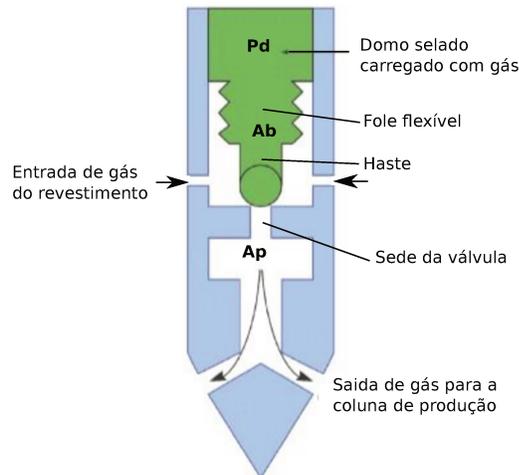


Figura 3.4: Representação esquemática de uma válvula operadora de *Gas Lift* de fole carregado, sem mola e não compensada.

Abertura da válvula operadora: Na posição fechada da válvula, as forças que tendem a abrir,

F_o , ou manter fechada, F_c a válvula operadora são dadas por:

$$F_o = P_c(A_b - A_p) + P_t A_p \quad (3.3)$$

$$F_c = P_d A_b \quad (3.4)$$

onde:

A_b área efetiva do fole da válvula operadora

A_p área da sede da válvula operadora

P_d pressão de carga do domo da válvula operadora

P_t pressão à jusante da válvula operadora (na coluna)

P_c pressão à montante da válvula operadora (no revestimento)

No instante da abertura da válvula, o equilíbrio de forças entre F_o e F_c estabelece que:

$$P_d A_b = P_c (A_b - A_p) + P_t A_p \quad (3.5)$$

Organizando os termos, se deduz a expressão para determinar a pressão a montante da válvula operadora, requerida para sua abertura (linha vermelha da Figura 3.5):

$$P_{co} = \frac{P_d - P_{to} R}{1 - R} \quad (3.6)$$

onde:

P_{co} pressão a montante da válvula operadora, no instante de sua abertura

R razão entre as áreas da sede e do fole da válvula operadora, $R = A_p/A_b$

A condição de escoamento é $P_c \geq P_t$.

Fechamento da válvula operadora: Na posição aberta da válvula, admite-se que a pressão atuante sobre o obturador na haste da válvula é próxima à pressão do revestimento e, portanto, a força que tende a manter a válvula aberta é dada por:

$$F_o = P_c (A_b - A_p) + P_c A_p \quad (3.7)$$

No instante do fechamento da válvula operadora, o equilíbrio de forças na haste da válvula determina que:

$$P_d A_b = P_{cc} (A_b - A_p) + P_{cc} A_p \quad (3.8)$$

$$P_{cc} = P_d \quad (3.9)$$

onde:

P_{cc} pressão a montante de válvula operadora, no instante de seu fechamento

A condição de fechamento da válvula se cumpre quando a pressão do revestimento em queda se igualar a pressão de carga do domo. A Figura 3.5 mostra a dinâmica do ciclo GLI em função de P_t e P_c , identificando os momentos de abertura e fechamento das válvulas operadora e motora. A linha de abertura da válvula operadora é determinada pela Equação 3.6. Uma discussão mais detalhada sobre a dinâmica da válvula operadora considerada, e de outros tipos de válvula também empregados no GLI, é encontrada em Brown e Jessen (1962) e Carvalho (2004).

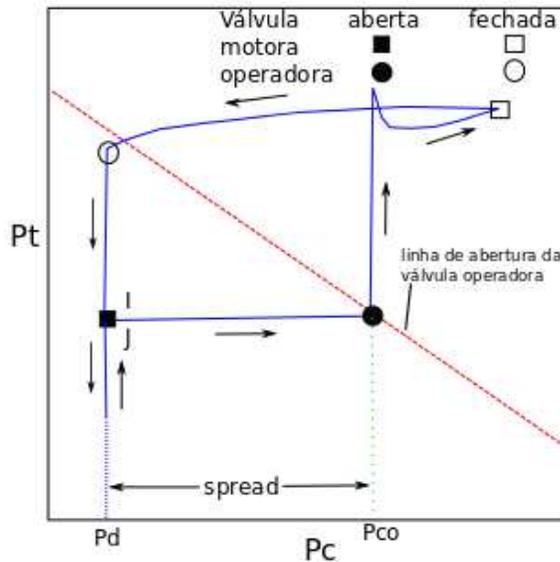


Figura 3.5: Dinâmica do ciclo GLI (Carvalho, 2004)

3.1.6 Amplitude da válvula operadora

Observando as equações (3.5) e (3.8), verifica-se que o lado esquerdo da igualdade é um parâmetro que depende apenas das características geométricas da válvula, da carga do fole fixada na operação de configuração da válvula e da temperatura de trabalho. Desde que $P_{cc} > P_{10}$, a comparação das equações (3.6) e (3.9) nos permite concluir que $P_{co} > P_{cc}$, ou seja, a pressão de abertura da válvula é maior do que a sua pressão de fechamento teórica, denominando-se “amplitude” ou “*spread*” a diferença entre essas duas pressões. As válvulas com esta característica se chamam válvulas não compensadas.

Logo, podemos escrever:

$$S = P_{co} - P_{cc} \quad (3.10)$$

onde:

S amplitude da válvula operadora

A amplitude de uma válvula de GLI permite o armazenamento de gás no revestimento, devido à diferença entre as pressões de abertura e fechamento da válvula operadora. Mas a manipulação desse critério deve ser cuidadosa, já que um excessivo *spread* pode levar a um excessivo volume de gás sendo usado por ciclo, normalmente observado em poços com baixa pressão de fundo, com diâmetro de revestimento grande e diâmetro da coluna de produção pequena, devido à grande transferência de gás para a coluna de produção no tempo que fica aberta a válvula operadora. Portanto, é recomendável ajustar a amplitude da válvula operadora dependendo das características do poço; assim, quanto maior o volume do revestimento deve-se reduzir o *spread*. A porta da válvula deverá ser selecionada de tal modo que se obtenha a amplitude desejada para cada caso (Velloso, 1992).

3.1.7 Válvula motora e temporização

A válvula motora na cabeça do poço controla a injeção de gás da linha de suprimento de gás ao revestimento. Ela é configurada segundo se mostra na Figura 3.6, mediante o ajuste do tempo de ciclo t_c (tempo entre duas aberturas da válvula) e tempo de injeção t_{inj} (tempo no qual a válvula permanece aberta) (Liao *et al.*, 1995), com base nas características do poço (geometria, parâmetros operacionais etc.) e do reservatório (fluidos produzidos, pressão estática, índice de produtividade etc.).

A pressão do domo da válvula operadora é outro parâmetro de controle da temporização do ciclo GLI, a qual está fortemente influenciada pelas características do reservatório e pela dinâmica da válvula operadora, que deve ser considerada para a produção estável nos ciclos de GLI. (Carvalho, 2004). A temporização da válvula motora é um método prático de controle, pelo fato de ser realizada na superfície, sem necessidade de interromper a produção ou intervir no poço.

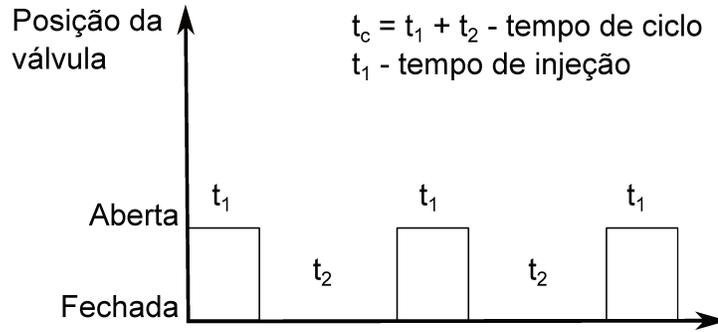


Figura 3.6: Operação da válvula motora

3.2 Fundamentação teórica sobre o bombeio pneumático Zadson

Nesta seção são detalhados os principais conceitos referentes ao estudo do bombeio pneumático Zadson.

3.2.1 Completação do poço

A completção de um poço com BPZ consiste de duas colunas concêntricas (coluna externa e coluna intermediária), equipadas com válvulas de retenção (inferior e superior) nas respectivas extremidades inferiores. A coluna intermediária tem uma “cauda” de diâmetro menor no fundo do poço com a finalidade de diminuir o *fallback* no início da elevação (Figura 3.7).

Mais próximo à superfície se tem a opção de instalar uma terceira coluna concêntrica (coluna interna), por onde a golfada de líquido escoar em direção à linha de produção. Além disso, há um conjunto de válvulas de controle de fluxo do gás instalado na superfície, junto à árvore de natal (Gomez, 2008).

3.2.2 Sistema de superfície

O método BPZ apresenta uma completção específica onde é instalada uma adaptação na árvore de natal para receber dois pontos de injeção (conexão para as válvulas V1 e V2) e um ponto de exaustão para coletar o gás produzido pelo reservatório e liberado no anular do revestimento.

Está presente um sistema de controle de fluxo do gás, composto por um conjunto de três válvulas (V1, V2 e V3) e um controlador responsável pelo acionamento das válvulas em intervalos de

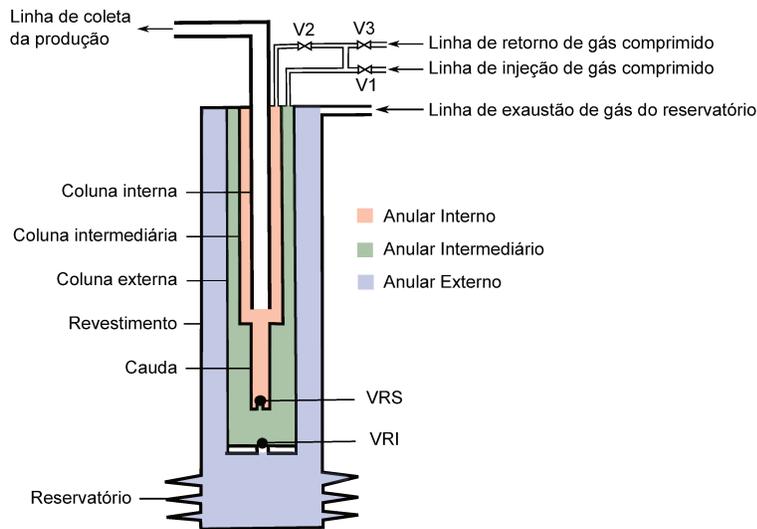


Figura 3.7: Esquema da completção de um poço para BPZ, com três colunas (Santana *et al.*, 2005b)

tempo pré-programados. Vale observar que as válvulas V1 e V2, quando abertas, têm função de permitir a injeção do gás comprimido no poço. Já a válvula V3, quando aberta, tem a função de permitir a depressurização do sistema de forma a permitir a realimentação do poço produtor pelo reservatório para o início de um novo ciclo.

Além disso, é necessário um sistema de fornecimento do gás comprimido, o qual consiste de um tanque de armazenamento de gás e um compressor de gás responsável pela injeção do gás no sistema (Gomez, 2008).

3.2.3 Ciclo de operação

Neste método, similar ao *gas lift* intermitente, a produção ocorre intermitentemente, mediante sequências de pressurização e depressurização de gás, para elevar uma golfada de líquido à superfície. O ciclo do BPZ segundo ENGEPEP (2003) pode ser dividido em quatro estágios: acumulação, pressurização e elevação, aproveitamento e depressurização, como se mostra na Figura 3.8.

Acumulação

Nessa etapa o anular externo e interno estão descomprimidos, abre-se a válvula V3 para descomprimir o anular intermediário, permitindo o fluido do reservatório escoar para o poço através da válvula de retenção inferior, a qual permite somente o fluxo ascendente, acumulando um vo-

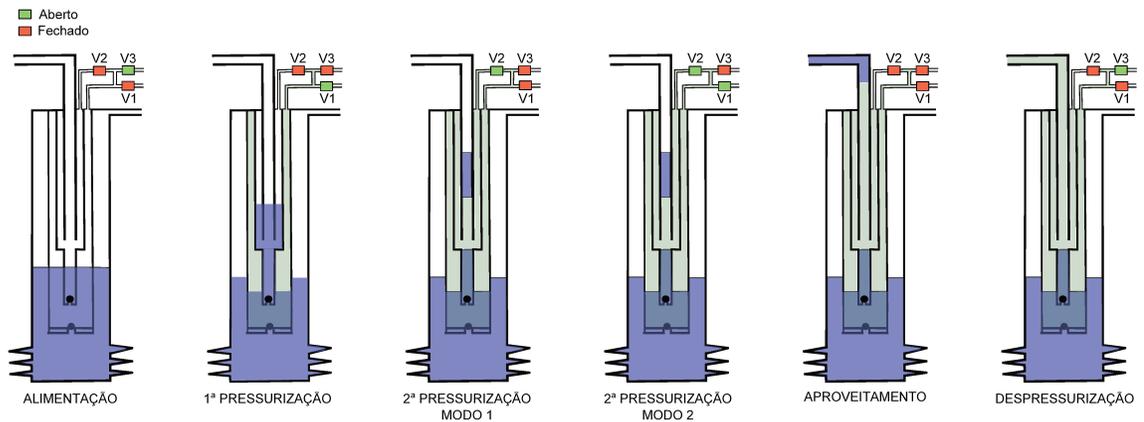


Figura 3.8: Sequência de estágios de um ciclo de intermitência do método de elevação BPZ, poço de 3 colunas (Santana *et al.*, 2005a)

lume de fluido nas colunas. Nesta etapa as válvulas V1 e V2 permanecem fechadas. O tempo de acumulação é, portanto, o volume acumulado depende do IP do poço.

Pressurização e elevação

A pressurização começa com a abertura da válvula V1 (com a V3 fechada). O gás entra pressurizado no anular intermediário até atingir a pressão na qual consegue deslocar o fluido armazenado através da válvula de retenção superior, a qual abre permitindo a acumulação do fluido no anular interno, enquanto a válvula de retenção inferior fecha. A partir desse momento se tem dois modos para prosseguir com a pressurização do anular interno.

Modo 1: Desse modo, fecha-se a válvula V1 e abre-se a válvula V2, o gás pressurizado no anular intermediário agora vai pressurizar o anular interno, escoando através de uma linha que comunica os dois anulares, fechando a válvula de retenção superior o fluido contido no anular interno é deslocado para a coluna interna e elevado em forma de golfada até a linha de produção (Figura 3.9).

Modo 2: Se a pressão no anular intermediário não é suficiente para elevar o fluido, são abertas simultaneamente as válvula V1 e V2, realizando a elevação similar ao modo 1.

Aproveitamento da energia

Logo depois da golfada de fluido atingir superfície, todas as válvulas são fechadas por um curto período de tempo com o objetivo de realizar um melhor aproveitamento da energia durante a

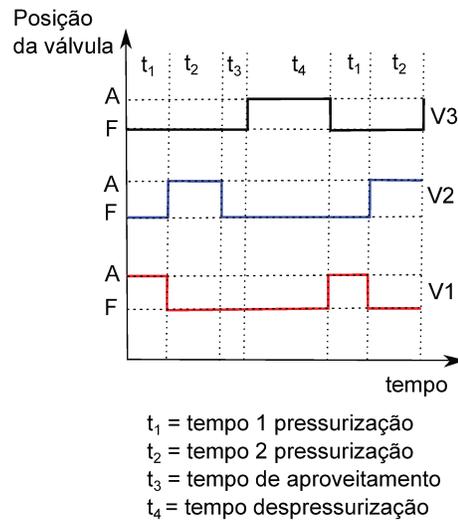


Figura 3.9: Sequência de acionamento das válvulas V1, V2 e V3, nas etapas do ciclo BPZ, operando no modo 1

despressurização do gás (ENG, 2012)².

Despressurização

As válvulas V1 e V2 fecham, apenas a válvula V3 se abre para permitir a despressurização do anular intermediário; o anular interno e a coluna interior são despressurizados durante a elevação da golfada. Desta forma, as pressões em todo o conjunto se reduzem ao mínimo, e quando a pressão no anular intermediário chega a ser inferior que a pressão exercida pelo reservatório na válvula de retenção inferior, a válvula de retenção inferior abre, permitindo uma nova acumulação de fluido no interior do sistema (Santana *et al.*, 2005b).

Um terceiro modo pode-se utilizar com a elevação similar ao bombeio mecânico, as etapas de acumulação, aproveitamento e despressurização permanecem iguais a os modos 1 e 2, enquanto a pressurização é alterada, utilizando apenas a válvula V1 a qual abre e pressuriza o anular intermediário até o momento que o gás atinge a válvula de retenção superior, nesse momento fecha e começa a despressurização e alimentação do líquido no anular intermediário. Nos primeiros ciclos, o nível de líquido nas colunas intermediária e interna aumenta até atingir superfície e preencher completamente as colunas. A partir desse momento, o líquido carregado no fundo do poço é produzido na superfície, comportamento similar ao bombeio mecânico.

A Tabela 3.1 mostra a sequencia de acionamentos das válvulas V1, V2 e V3, nas etapas do ciclo

²Este curto período foi proposto pela ENGEPEP, A idéia não ficou bem clara, mas o propósito parece ser o aproveitamento mais eficiente da energia obtida com a despressurização do gás. Trata-se de um procedimento empírico.

do BPZ, para os 3 modos de operação.

Tabela 3.1: Sequência de acionamentos das válvulas V1, V2 e V3, nas etapas do ciclo do BPZ

Válvula	Pressurização1	Pressurização 2	Aproveitamento	Despressurização
Modo 1				
V1	A	F	F	F
V2	F	A	F	F
V3	F	F	F	A
Modo 2				
V1	A	A	F	F
V2	F	A	F	F
V3	F	F	F	A
Modo 3				
V1	A	-	F	F
V2	F	-	F	F
V3	F	-	F	A

Capítulo 4

Análise dimensional e semelhança

Neste capítulo é descrita a análise dimensional realizada por Sobolewski (2008), com a qual se pretendeu dimensionar os aparatos experimentais e parâmetros do poço modelo para GLI. Contudo, outro procedimento descrito no Capítulo 5, foi finalmente utilizado, conseguindo uma melhor estimativa, utilizando conceitos de mecânica dos fluidos, correlações e parâmetros utilizados em trabalhos anteriores.

4.1 Condições sobre o projeto

Define-se protótipo como o aparato experimental feito em escala real, e modelo como o aparato experimental feito em uma escala reduzida a partir do protótipo.

Neste trabalho se construiu um modelo de um poço que utiliza GLI como método de elevação, com o objetivo de representar os fenômenos físicos que acontecem na escala real e obter resultados experimentais aplicáveis ao protótipo. Isto é necessário já que não se tem as condições físicas e financeiras para a construção de um aparato em escala real no LabPetro³ (LabPetro, 2013).

Para que os resultados obtidos no modelo tenham validade no protótipo, é necessário que as condições de semelhança sejam satisfeitas. De acordo com isso, fez-se a análise dimensional utilizando o Teorema II de Buckingham.

A experiência indica que pode ser muito difícil de se obter semelhança completa em casos tão complexos quanto o objeto deste trabalho. Assim, alguns critérios são selecionados para que algumas informações de interesse específicas possam ser traduzidas da escala do modelo para a escala do protótipo, mesmo com certas ressalvas.

³LabPetro: O Laboratório Experimental de Petróleo "Kelsen Valente" foi construído com os recursos da parceria estratégica entre a UNICAMP e Petrobras, tem como meta atender as demandas atuais de pesquisa e serviços do CEPETRO na área de escoamento de petróleo, na medida em que está equipado para manusear, com segurança e sem riscos ambientais, óleos de características diversas, inclusive pesados, além de fluidos simuladores de petróleos.

4.2 Análise dimensional para o GLI

Para descrever todos os fenômenos envolvidos no sistema de *gas-lift* intermitente há um grande número de variáveis envolvidas, e o estudo de como todas essas variáveis interferem no sistema é algo extremamente complexo. Conforme análise da literatura, as variáveis que podem descrever de forma satisfatória o sistema se apresentam na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Grandezas envolvidas na análise do GLI

n	Grandeza	Simbolo	Dimensões (MLT)
1	Profundidade do poço	H_w	L
2	Diâmetro do revestimento	D_c	L
3	Diâmetro da coluna de produção	D_t	L
4	Pressão na cabeça do poço	P_{wh}	$ML^{-1}T^{-2}$
5	Pressão estática do reservatório	P_R	$ML^{-1}T^{-2}$
6	Índice de produtividade	IP	$M^{-1}L^4T$
7	Pressão de injeção de gás	P_{gi}	$ML^{-1}T^{-2}$
8	Profundidade da válvula operadora	H_v	L
9	Densidade do gás	ρ_g	ML^{-3}
10	Densidade do óleo	ρ_o	ML^{-3}
11	Diâmetro da sede da válvula operadora	D_s	L
12	Pressão no domo da válvula operadora	P_d	$ML^{-1}T^{-2}$
13	Volume de injeção de gás por ciclo	V_{giC}	L^3
14	Vazão proveniente do reservatório ao poço	q_o	L^3T^{-1}
15	Tempo de ciclo	t_c	T
16	Tempo de injeção	t_{inj}	T
17	Diâmetro da válvula de pé	D_v	L
18	Comprimento inicial da carga de líquido	h_{li}	L
19	Pressão do gás a jusante da válvula operadora	P_t	$ML^{-1}T^{-2}$
20	Pressão do gás a montante da válvula operadora	P_c	$ML^{-1}T^{-2}$
21	Aceleração da gravidade	g	LT^{-2}

Há 21 variáveis envolvidas na análise. Conforme a Tabela 4.1, o número de unidades fundamentais presentes no problema são três: massa (M), comprimento (L) e tempo (T).

Portanto, o número de grupos adimensionais presentes no sistema será:

$$(n - m) = 21 - 3 = 18$$

O núcleo adotado é composto de H_w , P_R e ρ_o , pois a magnitude dessas propriedades é conhecida no experimento, elas são independentes, e representativas de cada dimensão básica, como se mostra pela determinante da matrix diferente de zero.

$$\Delta = \begin{matrix} & H_w & P_R & \rho_o \\ M & 0 & 1 & 1 \\ L & 1 & -1 & -3 \\ T & 0 & -2 & 0 \end{matrix} = -2 \neq 0$$

Seguindo procedimento do Teorema II de Buckingham, os fenômenos físicos envolvidos no GLI podem ser descritos pelos grupos adimensionais apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Grupos adimensionais envolvidos no GLI

n	Grupo	Grandezas
1	Π_1	$D_c H_w^{-1}$
2	Π_2	$D_t H_w^{-1}$
3	Π_3	$P_{wh} P_R^{-1}$
4	Π_4	$\rho_o^{1/2} P_R^{1/2} I P H_w^{-2}$
5	Π_5	$P_{Ginj} P_R^{-1}$
6	Π_6	$H_v H_w^{-1}$
7	Π_7	$\rho_g \rho_o^{-1}$
8	Π_8	$D_s H_w^{-1}$
9	Π_9	$P_d P_R^{-1}$
10	Π_{10}	$V_{Ginj} H_w^{-3}$
11	Π_{11}	$q_o \rho_o^{1/2} H_w^{-2} P_R^{-1/2}$
12	Π_{12}	$t_c P_R^{1/2} H_w^{-1} \rho_o^{-1/2}$
13	Π_{13}	$t_{inj} P_R^{1/2} H_w^{-1} \rho_o^{-1/2}$
14	Π_{14}	$D_v H_w^{-1}$
15	Π_{15}	$h_{li} H_w^{-1}$
16	Π_{16}	$P_{t1} P_R^{-1}$
17	Π_{17}	$P_{c2} P_R^{-1}$
18	Π_{18}	$(g \rho_o H_w) P_R^{-1}$

4.3 Modelo e protótipo

O protótipo escolhido foi o poço base utilizado nos trabalhos de Carvalho (2004) e Santos (1997), os quais utilizaram os dados do poço base praticamente iguais, devido a serem representativos de um poço típico com método de elevação a GLI. Desse modo, as simulações realizadas pelos dois autores tomam como base os parâmetros da Tabela 4.3, sendo assim, torna-se mais plausível a

comparação das análises experimentais com os trabalhos realizados.

Tabela 4.3: Principais características do poço empregado como protótipo

Variável	Magnitude
Profundidade do canhoneio -[m]	1500
Revestimento de produção ^a -[mm]	140
Pressão estática do reservatório -[bar]	83,5
Índice de produtividade (IP) - [(m ³ /d)/(bar)]	1,02
Grau API do óleo	40
Densidade relativa do gás (Ar=1)	0,70
Densidade relativa da água produzida (Água=1)	1,07
RGL -[m ³ /m ³]	0
BSW -[%]	50
Pressão na cabeça do poço -[bar]	6,9
Pressão do compressor -[bar]	68,6
Temperatura da superfície -[°C]	26,6
Coluna de produção ^a -[mm]	60
OD da válvula operadora -[mm]	38,1
Razão (área da porta/área do fole)	0,2
Pressão no domo da válv. Operadora ^b - [bar]	57,9
Profundidade da válvula operadora - [m]	1480

a -diâmetro nominal

b -nas condições padrão

Os parâmetros utilizados como base no dimensionamento do modelo estão descritos na Tabela 4.4. Devido a limitação da altura do laboratório, a profundidade do poço do modelo foi fixada em 15 m. A cabeça do poço modelo está aberta para a atmosfera, logo, a pressão na cabeça do poço é a pressão atmosférica. A temperatura na superfície foi considerada como 26,6 °C e os fluidos utilizados foram água e ar, representando o óleo e gás de injeção respectivamente.

Tabela 4.4: Características base do poço modelo

Variável	Magnitude
Profundidade do canhoneio -[m]	15
Grau API do fluido (se usará água)	10
Densidade relativa do gás (Ar=1)	1
Densidade relativa da água produzida (Água=1)	1,00
Pressão na cabeça do poço - [bar]	1,01
Temperatura da superfície - [°C]	26,6

Para garantir a similaridade entre o modelo e o protótipo deve-se garantir a igualdade dos grupos adimensionais, $\Pi_p = \Pi_m$, onde o subscrito p se refere ao protótipo e m ao modelo. Dessa forma, mediante a igualdade de cada um dos grupos adimensionais, foram calculados os parâmetros para o poço modelo, como se apresenta na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Principais características do poço modelo

Variável	Magnitude
Profundidade do canhoneio $-[m]$	15
Revestimento de produção ^a $-[mm]$	1,37
Pressão estática do reservatório $-[bar]$	12,2
Índice de produtividade (IP) $-[(m^3/d)/(bar)]$	$2,41 \cdot 10^{-4}$
Grau API do fluido	10
Densidade relativa do gás (Ar=1)	1
Densidade relativa da água produzida (Água=1)	1,00
RGL $-[m^3/m^3]$	0
BSW	0
Pressão na cabeça do poço $-[bar]$	1,01
Pressão do compressor $-[bar]$	10,1
Temperatura da superfície $-[^\circ C]$	26,6
Coluna de produção ^a $-[mm]$	0,60
OD da válvula operadora $-[mm]$	0,38
Razão (área da porta/área do fole)	0,2
Pressão no domo da válv. Operadora ^b $-[bar]$	8,5
Profundidade da válvula operadora $-[m]$	14,8

4.4 Considerações sobre a análise dimensional

Com a redução de escala obtida na análise dimensional, torna-se improvável manter todas as variáveis do modelo. A magnitude dos diâmetros dos modelos é impraticável no estudo, pois não há disponibilidade de materiais com esses diâmetros no mercado, e com diâmetros pequenos podem ocorrer diversos efeitos que não ocorreriam no protótipo como padrões de fluxo inapropriados e isso afetaria os resultados de forma a torná-los inúteis para o propósito do trabalho. Também, a pressão estática do reservatório calculada é grande demais para a profundidade do poço.

O grande número de grandezas que influenciam o GLI e o escoamento não permanente característico deste método de elevação, tornam a análise dimensional complexa. Assim, um estudo dimensional mais aprofundado deverá ser feito, o qual poderá ter como base alguns dos grupos

adimensionais obtidos neste Capítulo, ou utilizar combinações destes grupos adimensionais que gerem novos grupos com maior afinidade ao comportamento do GLI.

Assim, outro procedimento descrito no Capítulo 5, foi utilizado para o dimensionamento dos aparatos experimentais e o cálculo das principais variáveis que influenciam o GLI, baseados nos conceitos da mecânica dos fluidos, correlações e parâmetros utilizados em trabalhos anteriores.

Capítulo 5

Projeto do poço modelo para GLI

Neste Capítulo, é apresentado o dimensionamento dos aparatos experimentais e o cálculo das principais variáveis que influenciam o GLI, baseados nos conceitos da mecânica dos fluidos, correlações e parâmetros utilizados em trabalhos anteriores. Foi utilizado um procedimento empírico, uma vez que não se tem um simulador físico com suas características.

5.1 Considerações a respeito do projeto dos aparatos

Como o elemento limitante no poço modelo é a magnitude dos diâmetros, pode-se adotar um valor de diâmetro e, a partir dele, calcular as variáveis restantes do sistema, ou ainda, adotar um valor de diâmetro e manter os parâmetros calculados no tópico anterior. Devido à inconsistência de alguns valores obtidos da análise adimensional, as variáveis restantes foram recalculadas, partindo-se do diâmetro da coluna, e mantendo-se as variáveis base do poço modelo: Profundidade do canhoneio, fluidos, pressão de cabeça do poço e temperatura de superfície, segundo a Tabela 4.4.

5.2 Diâmetro da coluna de produção

No simulador físico, foram utilizadas três colunas de produção com diferentes diâmetros, mas não há similaridade completa com o poço protótipo, devido à impossibilidade de se manter a relação D_t/H_w , para a profundidade do canhoneio utilizada ($H_w = 15\text{ m}$). Os diâmetros adotados foram: 1", 1 1/2" e 2".

5.3 Diâmetro de revestimento

Para o cálculo do diâmetro do revestimento foi utilizado a relação D_c^i/D_c^e , sendo o diâmetro interno para o revestimento e o diâmetro externo para a coluna de produção, algumas das relações

aplicadas em campo para poços utilizando GLI são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores para relação entre diâmetros nominais de revestimento e de coluna de produção aplicados em campo

$D_c^e(pol)$	$D_c^i(pol)$	$D_t^e(pol)$	D_c^i/D_t^e
5,5	5,012	2,375	2,11
5,5	5,012	2,875	1,74
7	6,538	2,375	2,75
7	6,538	2,875	2,27

i - interno, e - externo
t - coluna de produção, c - revestimento

Com base na Tabela 5.1, os possíveis diâmetros para o revestimento dos poços modelo se apresentam na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Valores para o diâmetro do revestimento dos poços modelo

D_c^i/D_t^e	$D_t^i(pol)$	$D_t^e(pol)$	$D_c^i(pol)$
1,74	1	1,327	2,31
	1,5	1,902	3,32
	2	2,374	4,14
2,11	1	1,327	2,80
	1,5	1,902	4,01
	2	2,374	5,01
2,27	1	1,327	3,02
	1,5	1,902	4,32
	2	2,374	5,4
2,75	1	1,327	3,65
	1,5	1,902	5,23
	2	2,374	6,54

5.4 Volume que representa o revestimento

A Equação 5.1 representa o cálculo do volume do revestimento até a profundidade da válvula operadora:

$$V_c = \pi \left(\frac{D_c^i{}^2 - D_t^e{}^2}{4} \right) H_{vo} \quad (5.1)$$

onde:

V_c : volume do revestimento

H_{vo} : profundidade da válvula operadora a partir do topo da coluna de produção: 14,75m

D_c : diâmetro do revestimento

D_t : diâmetro da coluna de produção

O volume do revestimento calculado para os três diâmetros de coluna de produção se mostra na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Valores para o diâmetro e volume do revestimento dos poços modelo

$D_t^e(pol)$	D_c^i/D_t^e	$D_c^i(pol)$	$V_c(m^3)$	$V_c(L)$
1,327	1,74	2,31	0,02682	26,8
	2,11	2,80	0,04543	45,4
	2,27	3,02	0,05490	54,9
	2,75	3,65	0,08659	86,6
1,902	1,74	3,32	0,05510	55,1
	2,11	4,01	0,09334	93,3
	2,27	4,33	0,11278	112,8
	2,75	5,24	0,17788	177,9
2,374	1,74	4,14	0,08585	85,8
	2,11	5,01	0,14541	145,4
	2,27	5,39	0,17569	175,7
	2,75	6,54	0,27712	277,1

No aparato experimental decidiu-se trabalhar com dois tanques que representem o volume do revestimento em lugar de utilizar colunas de revestimento, devido à facilidade na instalação e controle do processo. Com base na Tabela 5.3, foram escolhidos dois volumes de revestimento, revestimento pequeno de 30 L e revestimento grande de 90 L. Isto permite ter o volume de revestimento como parâmetro a ser estudado.

Os diâmetros de revestimento representativos são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Valores para o diâmetro do revestimento dos poços modelo

$D_t(pol)$	$V_c(L)$	$V_c(m^3)$	$D_c^i(pol)$
1,327	30	0,03	2,40
	90	0,09	3,72
1,902	30	0,03	2,76
	90	0,09	3,96
2,374	30	0,03	3,11
	90	0,09	4,20

5.5 Pressão do reservatório

O critério para estimar a pressão estática do reservatório foi através do adimensional $PePh$, apresentado por Santos (1997), definido como a razão entre a pressão estática do reservatório (P_R) e a pressão hidrostática devida à coluna de fluido, calculada na profundidade da pressão estática, como se mostra na Equação 5.2.

$$PePh = \frac{P_R}{\rho_L g H_w} \quad (5.2)$$

onde:

P_R : pressão estática do reservatório (pressão absoluta)

ρ_L : massa específica do líquido

g : aceleração da gravidade- $9,81 \text{ m/s}^2$

H_w : profundidade do canhoneio

A Figura 5.1 apresenta os valores de pressão estática do reservatório para uma faixa de $PePh$ de (0-1), nota-se que o valor mínimo para a pressão absoluta no reservatório é de 1 atm e a pressão máxima é de 2,45 atm.

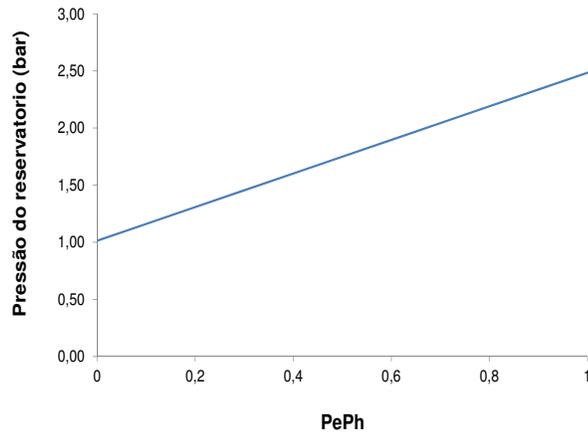


Figura 5.1: Magnitudes para as pressões do reservatório

5.6 Pressão no fundo da coluna de produção

A pressão no fundo da coluna de produção pode ser aproximada por uma coluna hidrostática de líquido:

$$P_{wf} = P_{wh} + \rho_l g h_{wf} \quad (5.3)$$

onde:

P_{wf} : pressão no fundo da coluna de produção

P_{wh} : pressão na cabeça de produção- 101,3 kPa

h_{wf} : nível de líquido a partir do canhoneio

As magnitudes para as pressões no fundo da coluna se apresentam na Figura 5.2.

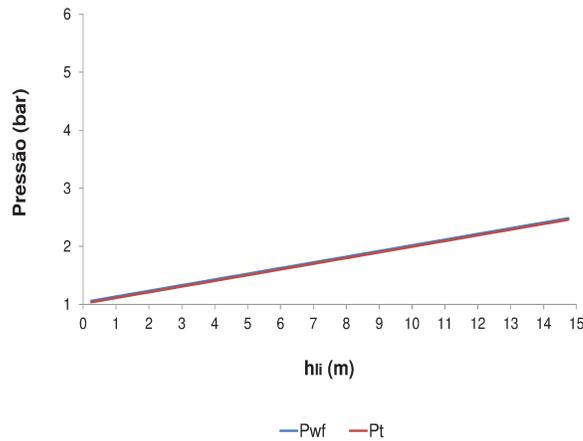


Figura 5.2: Magnitude de pressões no fundo da coluna e na profundidade da válvula operadora

5.7 Pressão na coluna de produção na profundidade da válvula operadora

A pressão a jusante da válvula operadora pode ser aproximada por uma coluna hidrostática de líquido:

$$P_t = P_{wh} + \rho g h_{li} \quad (5.4)$$

Onde:

h_{li} : nível de líquido à partir da válvula operadora - $h_{li} = h - H_{gv}$

H_{gv} : altura da válvula operadora à partir do canhoneio

As magnitudes para as pressões a jusante da válvula operadora para $H_{gv} = 0,25m$ se apresentam na Figura 5.2.

5.8 Pressão de abertura da válvula operadora na coluna de produção

A pressão a jusante da válvula operadora, no instante da sua abertura, P_{to} , foi considerada igual a P_t , $P_{to} \approx P_t$.

5.9 Pressão de abertura da válvula operadora no revestimento

A pressão a montante da válvula operadora, no instante de sua abertura, P_{co} , foi considerada conforme a relação descrita no trabalho de Carvalho (2004):

$$0,45 \leq \frac{P_{to}}{P_{co}} \leq 0,62 \rightarrow 1,61 \leq \frac{P_{co}}{P_{to}} \leq 2,22 \quad (5.5)$$

Considerando a Seção 5.8, tem-se

$$1,61P_{to} \leq P_{co} \leq 2,22P_{to} \quad (5.6)$$

O valor médio adotado para P_{co} é:

$$P_{co} = \frac{P_{co,max} + P_{co,min}}{2} \quad (5.7)$$

A Figura 5.3 mostra a faixa de valores para P_{co}

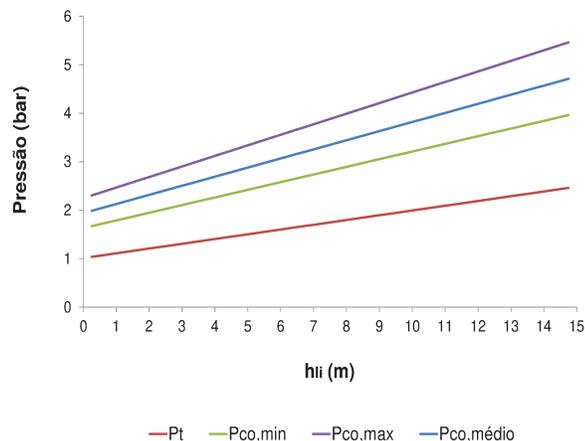


Figura 5.3: Magnitude para as pressões de abertura a montante da válvula operadora

5.10 Diâmetros da válvula operadora

No projeto, se utilizaram os valores de três diâmetros de sede da válvula operadora, 19/64", 13/32" e 1/2", tomados do trabalho de White (1963), utilizado como referência porque foi feito com uma coluna de 28 m, altura de coluna encontrada na literatura mais próxima à utilizada no laboratório do presente trabalho (15 m).

A Tabela 5.5 mostra a razão entre as áreas da sede e do fole da válvula operadora $R = A_p/A_b$, para $A_b = 0,77 \text{ in}^2$ (Área comum para o fole da válvula operadora (Velloso, 1992)).

Tabela 5.5: Valores de diâmetro de sede e Razão R da válvula operadora para $A_b = 0,77 \text{ in}^2$

Diâmetro de sede	R
19/64"	0,069
13/32"	0,168
1/2"	0,255

5.11 Pressão de domo na válvula operadora

A pressão de carga do domo da válvula operadora foi calculada pela equação do balanço de forças na válvula:

$$P_d = P_{co}(1 - R) + P_{to}R \quad (5.8)$$

Os valores para as pressões no domo se apresentam na Figura 5.4 para as três razões de R.

5.12 Válvula operadora

A Figura 5.5 representa o esquema para funcionamento da válvula operadora. As medidas de pressão são tomadas a montante e jusante da válvula. A pressão P_t equivale à pressão da coluna e P_c equivale à pressão do revestimento.

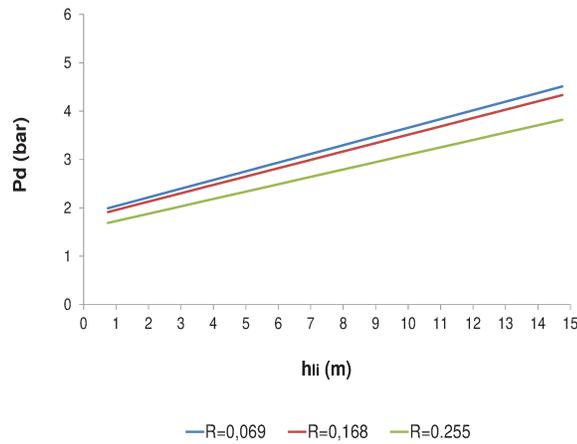


Figura 5.4: Magnitude para as pressões no domo da válvula operadora

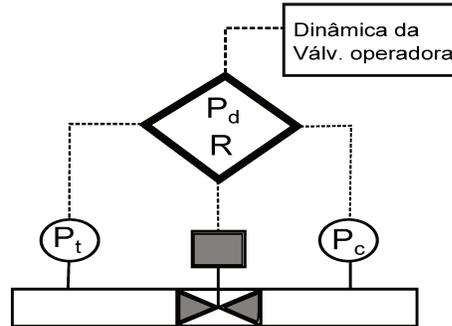


Figura 5.5: Esquema representativo para a válvula operadora na construção experimental

Na malha de controle utiliza-se o valor medido da pressão P_t e da pressão P_c , enquanto os parâmetros P_d e R são definidos inicialmente para o programa. Assim, a malha de controle, com a obtenção das medidas de pressão no tempo, executa o acionamento da válvula de acordo com as Equações (3.6) e (3.9), correspondentes à dinâmica de uma válvula operadora real. A vantagem de simular a válvula operadora com esse mecanismo deve-se ao fato de se poder variar a pressão do domo e a razão de áreas R com facilidade⁴.

5.13 Pressão de injeção

Para que aconteça o escoamento desde o compressor para o revestimento, a pressão de injeção a montante da válvula motora deve ser maior do que a pressão do domo, e da pressão de abertura da válvula operadora.

⁴A válvula utilizada no experimento simula uma válvula operadora com fole não compensada, obedecendo às equações para abertura e fechamento.

$$P_{inj} > P_{co} \quad (5.9)$$

Logo:

$$P_{inj} = BP_{co}, B > 1 \quad (5.10)$$

Analisando-se o trabalho de Carvalho (2004), um valor aplicável para o fator adimensional B é:

$$B = 1,054$$

Os valores da pressão de injeção calculados para $R = 0,255$ se mostram na Figura 5.6.

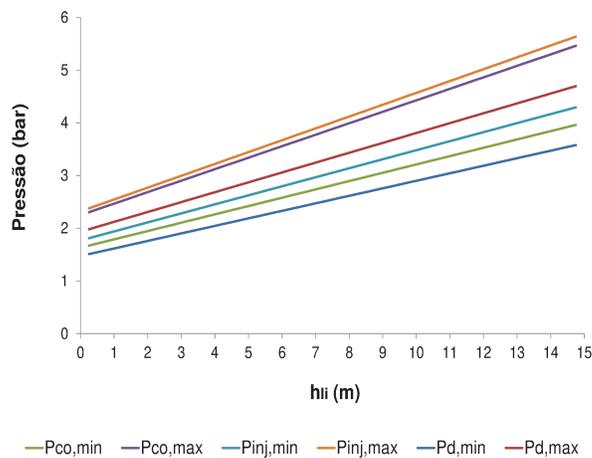


Figura 5.6: Magnitude das pressões de injeção para $R=0,255$

Nota-se que a pressão de injeção está em uma faixa de 1,81 a 5,64 bar, pelo qual foi especificado um compressor com capacidade para 9,7 bar, suficiente para a faixa de trabalho dos testes, e tendo opção de aumentar a elevação das colunas de produção.

5.14 Volume de gás requerido por ciclo de GLI

O volume de gás requerido para a abertura da válvula operadora pode ser calculado através do balanço de massa do gás no espaço anular, entre o início da injeção e o instante da abertura da válvula operadora (Carvalho, 2004), conforme a seguinte expressão:

$$V_{injC,vo} = \alpha \frac{(P_{co} - P_d) T_{sc} V_c}{P_{sc} T_c Z_c} \quad (5.11)$$

Onde:

$V_{injC,vo}$: volume padrão de gás requerido para a abertura da válvula operadora

T_{sc} : 15,6 °C⁵

P_{sc} : pressão do gás a condição padrão, 1 atm

T_c : temperatura média do gás no revestimento

P_c : pressão média do gás no revestimento

Z_c : fator de compressibilidade médio do gás no revestimento ≈ 1

α : constante - $\alpha = \frac{\exp(\lambda H_c) - 1}{\lambda H_c} \approx 1$

λ : constante - $\lambda = \frac{Mg}{Z_c R T_c}$

Os valores de volume injetado em função da altura inicial da golfada se apresentam na Figura 5.7, calculados para R=0,255 e para volume do anular de 30 e 90 L.

⁵STP - *Standard Temperature and Pressure* - comumente usado no sistema de unidades Britânico e Norte-Americano Ar a 60 °F e 14,696 psia (15,6 °C, 1 atm)

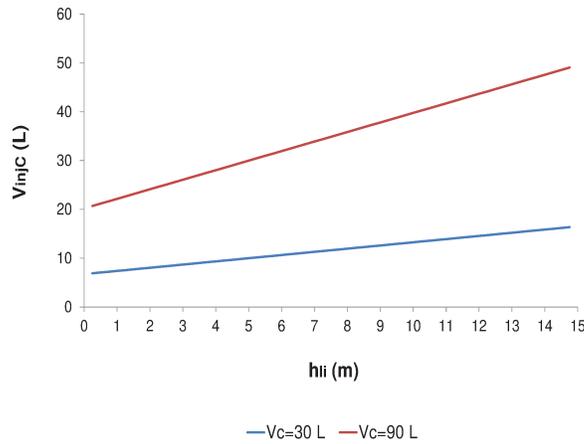


Figura 5.7: Volume de gás injetado em função da altura da golfada

5.15 Volume da caixa de alimentação de líquido

O volume da caixa de alimentação de líquido foi projetado para suportar 20 ciclos com a máxima carga de líquido (15 m, correspondente à coluna totalmente preenchida), estimando-se de acordo as Equações (5.12) e (5.13). Os valores para o volume da caixa de alimentação de líquido com base no diâmetro das colunas de produção se apresentam na Tabela 5.6.

$$V_R = n_c V_{max} \quad (5.12)$$

$$V_{max} = h_{max} \frac{\pi D_t^2}{4} \quad (5.13)$$

Onde, $h_{max} = 15 \text{ m}$

Tabela 5.6: Valores para o volume da caixa de alimentação de líquido

$D_t(\text{in})$	$V_{max}(\text{m}^3)$	$V_R(\text{m}^3)$
1	0,0076	0,2
1,5	0,0171	0,3
2	0,0304	0,6

Com base na Tabela 5.6, o reservatório foi projetado para um volume de 1 m^3 , o qual garante a

execução de suficientes ciclos de GLI, utilizando qualquer uma das três colunas de produção.

5.16 Estimativa do índice de produtividade

A primeira etapa de testes foi projetada para escoamento monofásico, de tal modo, a equação para o índice de produtividade está dada por:

$$IP = \frac{Q_w}{(P_R - P_{wf})} \quad (5.14)$$

Das Seções 5.6 e 5.5⁶ podemos deduzir a Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Valores máximos e mínimos para as pressões no fundo P_{wf} da coluna e no reservatório P_R

Pressão	min (bar)	max (bar)
P_{wf}	1,01	2,39
P_R	1,01	2,48

Por conseguinte, se definem ΔP máximo e mínimo

$$\Delta P_{min} = (P_{Rmax} - P_{wfmáx}) = 2,48 - 2,39 = 0,09 \text{ bar}$$

$$\Delta P_{max} = (P_{Rmax} - P_{wfmín}) = 2,48 - 1,01 = 1,47 \text{ bar}$$

Logo,

$$IP_{min} = \frac{q_w}{\Delta P_{max}}$$

$$IP_{max} = \frac{q_w}{\Delta P_{min}}$$

⁶O valor máximo de P_{wf} é dado para uma carga inicial de líquido de 14 m.

Os casos foram analisados para os diâmetros de 1”, 1,5” e 2”.

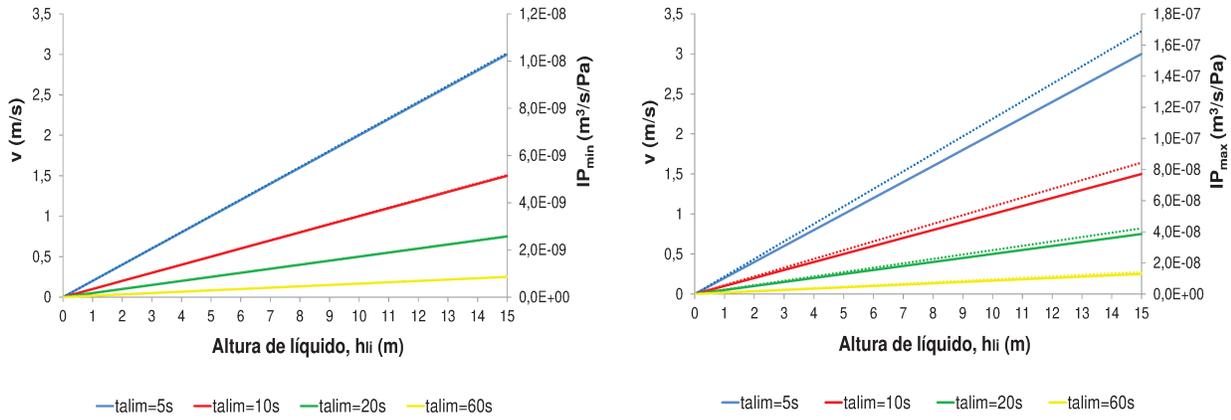


Figura 5.8: Valores de velocidade de alimentação e o IP em função da altura de líquido e tempo de alimentação

5.17 Tempo de injeção para abertura da válvula operadora

O cálculo do tempo de elevação da golfada foi feito com base nas equações da válvula solenóide utilizada para representar a válvula motora.

Para ar e gases, o fabricante proporciona a Equação 5.15, formula experimental para o cálculo da vazão.

$$Q_{inj} = K_v F_g F_{sg} \quad (5.15)$$

Onde:

$$F_g = 19,66 \sqrt{\Delta P (2P_1 - \Delta P)}$$

$$F_{sg} = \frac{1}{\sqrt{\gamma_a}}$$

P_1 pressão absoluta de entrada (Kgf/cm²) = pressão manométrica mais pressão atmosférica de 1,033 Kgf/cm².

P_2 pressão absoluta de saída (Kgf/cm²) = pressão manométrica mais a pressão atmosférica de 1,033 Kgf/cm².

ΔP queda de pressão através da válvula (Kgf/cm²)

K_v coeficiente de descarga da válvula $K_v = 2,4$

γ_a peso específico $\gamma_a = 1,00$

O tempo de injeção para abertura da válvula operadora é definido pela Equação 5.16.

$$t_{inj,vo} = \frac{V_{injC,vo}}{Q_{inj}} \quad (5.16)$$

Com a válvula operadora calibrada com $R = 0,255$

Revestimento	$t_{inj,vo}(s)$
30L	0,66
90L	1,98

5.18 Tempo de elevação e produção da golfada

O procedimento para estimar o tempo de elevação para ciclos estáveis de GLI é apresentado no trabalho de Carvalho (2004), chegando à Equação 5.17.

$$t_{elev} = (H_w - H_{wv}) \left[\frac{(P_{bolha} - P_{wh})A_t - \rho_L h_{li} A g}{0,5 C_f \rho_L S_s} \right]^{-1/2} \quad (5.17)$$

onde:

P_{bolha} pressão da bolha de gás abaixo da golfada, $P_{bolha} = (P_{to} + P_{co})/2$;

C_f coeficiente de atrito do líquido, $C_f \approx 0,005$;

S_s área lateral da golfada, $S_s = \pi D_t h_{li}$.

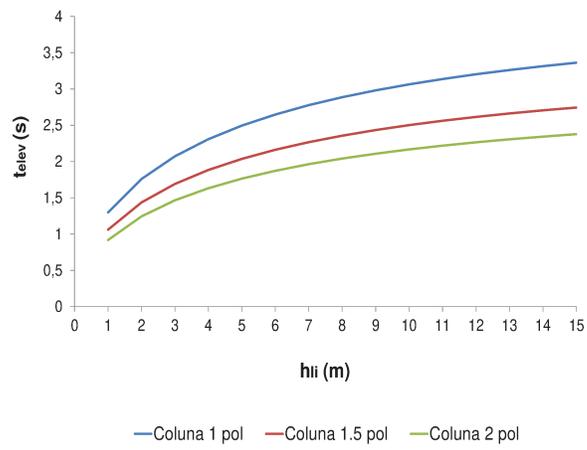


Figura 5.9: Tempo de elevação e produção da golfada para as colunas de 1, 1.5 e 2 pol

Capítulo 6

Projeto do poço modelo para BPZ

Neste Capítulo, é apresentado o projeto do poço modelo para BPZ, baseado em relações geométricas e características operacionais, tomando-se como base as informações mostradas na Tabela 6.1, correspondentes a um poço típico para BPZ com três colunas, utilizado em campo (Gomez, 2008).

Tabela 6.1: Principais características de um poço convencional BPZ (Gomez, 2008)

Poço de campo	
Pressão de reservatório	1000 psi
IP	0,4 bpd/psi
Vazão	240 bpd
TVD	1000 m
Revestimento	7"
Completação BPZ	
Coluna externa	
Diâmetro externo (D_{ee})	4 1/2" - 114,3 mm
Diâmetro interno (D_{ei})	4" - 101,6 mm
Coluna Intermediária	
Diâmetro externo (D_{me})	3 1/2" - 88,9 mm
Diâmetro interno (D_{mi})	3" - 76,2 mm
Coluna Interna	
Diâmetro externo (D_{ie})	2 1/2" 63,5 mm
Diâmetro interno (D_{ii})	2" 50,8 mm

A Figura 6.1, mostra os principais elementos do poço típico para BPZ, com três colunas: colunas externa, intermediária, interna e cauda, válvulas de retenção inferior e superior, válvulas do sistema de superfície, entre outras.

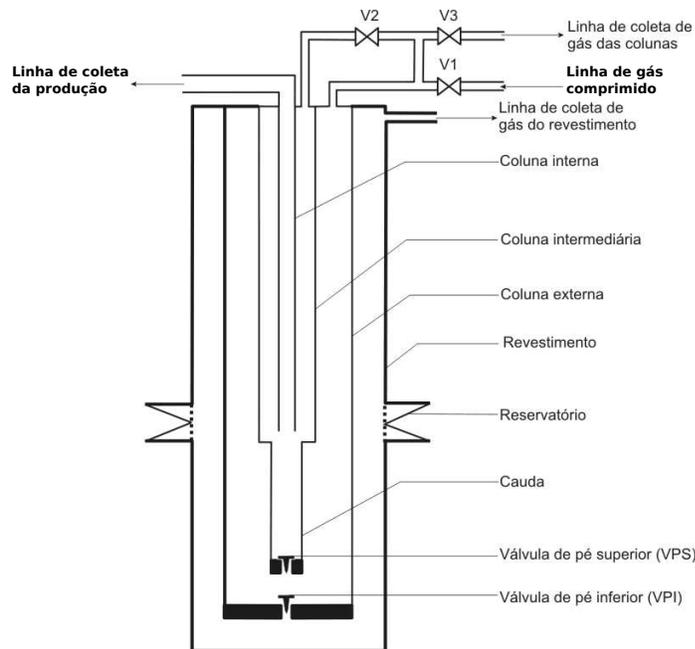


Figura 6.1: Representação esquemática do poço protótipo para BPZ com três colunas (Santana *et al.*, 2005b)

6.1 Determinação de níveis de acumulação para o protótipo

Da mesma forma que no *gas-lift* intermitente, os experimentos realizados para BPZ foram feitos com alimentação monofásica, portanto, foi calculado o índice de produtividade segundo a Equação 5.14, e a pressão de fundo de poço pela Equação 5.3.

Partindo-se dessas duas equações, utilizando-se os dados do poço base da Tabela 6.1 e estabelecendo-se a pressão de cabeça de poço em 1 atm, foi calculada uma altura hidrostática de 270,91 m.

O nível de líquido não deve superar a cauda da coluna intermediária, portanto, foi calculado o comprimento da cauda assumindo que o fundo dela se encontra à mesma profundidade do fundo do poço, pelo qual ela deve ter um comprimento mínimo do valor da altura hidrostática mais um fator de segurança de operação de 10%; assim a cauda foi estimada com comprimento de $H_c = 300$ m. Esse dado está de acordo com os registrados em poço de campo.

As áreas dos anulares entre as colunas estão dadas por:

- Área da secção transversal entre a coluna externa e a cauda

$$A_{ec} = \frac{\pi(D_{ei}^2 - D_{ie}^2)}{4}$$

- Área da secção transversal da cauda

$$A_i = \frac{\pi D_{ii}^2}{4}$$

- Área da secção transversal da coluna intermediária menos a espessura da coluna interna

$$A_m = \frac{\pi D_{mi}^2}{4} - \frac{\pi(D_{ie}^2 - D_{ii}^2)}{4}$$

Os valores das áreas do poço base estão dadas na Tabela 6.2. É importante notar que o diâmetro da cauda foi considerado igual ao diâmetro da coluna interna.

Tabela 6.2: Valores de áreas no poço protótipo BPZ

Área	valor(cm ²)
A_{ec}	49,40
A_i	20,27
A_m	45,6

Para um sistema de gas-lift intermitente costuma-se ter um nível de líquido de acumulação de 50% do H_c , o que corresponde no protótipo a uma altura $h_n = 150$ m. Esse mesmo valor foi considerado para o protótipo BPZ.

O nível de líquido atingido no anular intermediário h_{nm} está dado pela equação:

$$h_{nm} = \frac{V_m}{A_m} + H_c \quad (6.1)$$

Onde:

V_m : volume acumulado no anular intermediário - $V_m = V_{ec} - V_{ca}$

V_{ec} : volume acumulado entre a coluna externa e a cauda, o mesmo volume que se desloca para a coluna intermediária e depois para a coluna interna para sua produção - $V_{ec} = A_{ec}h_n$

V_{ca} : volume vazio da cauda acima do nível de líquido - $V_{ca} = A_i h_{ca}$, $h_{ca} = h_c - h_n$

Os níveis de acumulação para o protótipo foram definidos a partir do nível normal operativo h_n , ao qual foi aplicado um fator de 33,33% para definir o valor máximo e mínimo, depois se calculou o nível de líquido no anular intermediário mediante a Equação 6.1. Eles são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Níveis de acumulação no poço protótipo BPZ

Margem de acumulação	Nível na cauda (m)	Nível na coluna intermediária (m)
Normal operativo	150	395,83
Mínimo operativo	100	319,44
Máximo operativo	200	472,22
Máximo com alerta	300	625

O diagrama do poço protótipo pode ser observado na Figura 6.2.

6.2 Projeto do poço modelo para BPZ

Altura

Utilizando uma escala 100:1 com o poço protótipo, a profundidade do poço modelo foi definido em $H_w = 10$ m.

Diâmetros das colunas

Para estimar os diâmetros das colunas no modelo foi utilizada a Relação 6.2, utilizando diâmetros externos das colunas.

$$\left(\frac{D_c}{D_t}\right)_{\text{protótipo}} = \left(\frac{D_c}{D_t}\right)_{\text{modelo}} \quad (6.2)$$

As relações de diâmetro no protótipo são mostradas na Tabela 6.4.

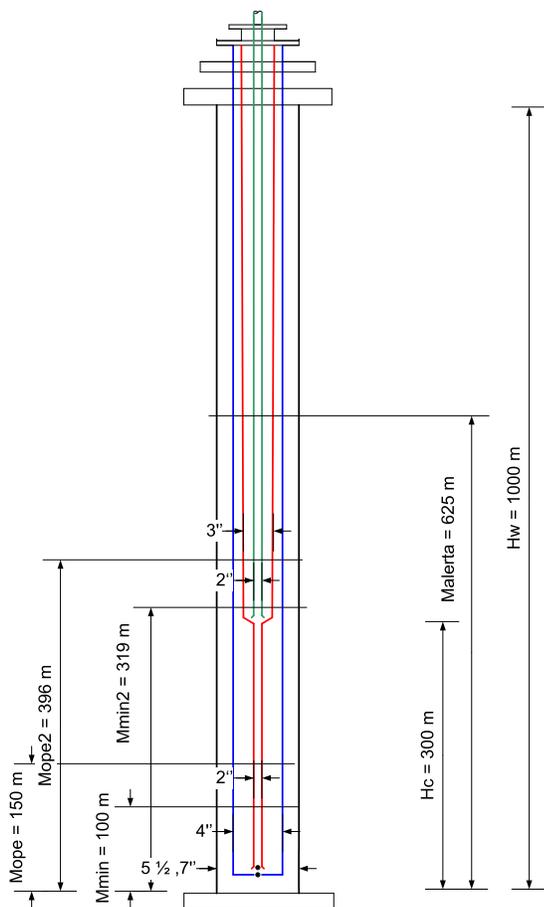


Figura 6.2: Dimensões do poço protótipo BPZ com níveis de acumulação

Tabela 6.4: Relação de diâmetros do poço protótipo BPZ

Relação	Valor
$\left(\frac{D_R}{D_e}\right)$	1,55
$\left(\frac{D_e}{D_m}\right)$	1,29
$\left(\frac{D_m}{D_i}\right)$	1,4

Partindo de um diâmetro externo da coluna interna de $D_i = 25 \text{ mm}$, de acordo com as relações acima, se obtém os diâmetros a utilizar na coluna modelo, como se apresenta na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Relações de diâmetros do poço modelo BPZ mais próximas ao protótipo com base na disponibilidade de mercado

Relação	Valor	Diâmetros do modelo
$\left(\frac{D_R}{D_e}\right)$	1,6	$D_R = 80\text{ mm}$
$\left(\frac{D_e}{D_m}\right)$	1,25	$D_e = 50\text{ mm}$
$\left(\frac{D_m}{D_i}\right)$	1,6	$D_m = 40\text{ mm}$

Decidiu-se utilizar tubos de acrílico, para poder observar o comportamento fluidodinâmico dentro da coluna BPZ. Esses tubos se encontram no mercado com espessura de 3 e 5 mm; optou-se por utilizar de 5 mm para melhor estabilidade da coluna, cada tubo tem comprimento de 2 m e para juntar os dutos se utilizaram luvas de 5 mm de espessura. Com essas características não foi possível utilizar os diâmetros da configuração calculada acima.

Recalculando os diâmetros, tendo em conta as outras variáveis, obtiveram-se os diâmetros externos das colunas que foram utilizados no poço modelo, mostrados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Relações de diâmetros do poço modelo BPZ

Relação	Valor	Diâmetros do modelo
$\left(\frac{D_R}{D_e}\right)$	1,29	$D_R = 90\text{ mm}$
$\left(\frac{D_e}{D_m}\right)$	1,40	$D_e = 70\text{ mm}$
$\left(\frac{D_m}{D_i}\right)$	2	$D_m = 50\text{ mm}$

As dimensões da completção do poço modelo se apresentam na Tabela 6.7 e na Figura 6.3.

Tabela 6.7: Diâmetros das colunas do poço modelo BPZ

Completação do poço modelo	
Revestimento	
Diâmetro externo (D_{Re})	90 mm
Diâmetro interno (D_{Ri})	80 mm
Coluna externa	
Diâmetro externo (D_{ee})	70 mm
Diâmetro interno (D_{ei})	60 mm
Coluna intermediária	
Diâmetro externo (D_{me})	50 mm
Diâmetro interno (D_{mi})	40 mm
Coluna interna	
Diâmetro externo (D_{ie})	25 mm
Diâmetro interno (D_{ii})	19 mm

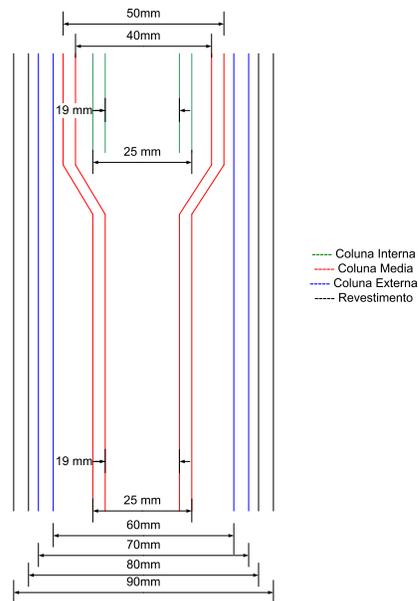


Figura 6.3: Diâmetros das colunas do poço modelo BPZ

Cauda

Na escala 100:1 o comprimento da cauda para o protótipo é $h_p = 3 m$.

Válvulas de retenção inferior e superior

A completação do poço BPZ requer duas válvulas de retenção, a inferior localizada no fundo da coluna externa, e a superior no fundo da cauda da coluna intermediária, as quais permitem o fluxo apenas na direção do escoamento. No poço modelo se utilizaram duas válvulas com as mesmas dimensões, que se mostram na Tabela 6.8, o diagrama das válvulas pode ser observado na Figura 6.4.

Tabela 6.8: Dimensões de válvula de retenção vertical superior e inferior

Bitola Diâmetro Gauge	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1"	43	86	38

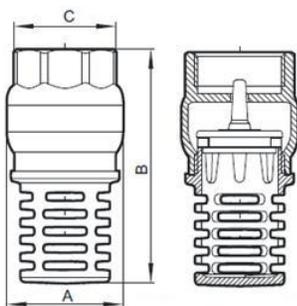


Figura 6.4: Válvula de retenção do poço modelo BPZ

Luvas

Para a construção das colunas foram utilizadas secções de tubos de 2 metros de comprimento, conectados mediante luvas. É importante ressaltar o projeto das luvas porque elas têm influência no escoamento, na estabilidade da coluna e na perda de carga. A Figura 6.5, mostra as características e medidas das luvas.

Deve-se ressaltar que apesar do pequeno espaço entre as colunas média e externa (2 mm), e entre as colunas externa e revestimento (2 mm), nas conexões dos tubos, onde é instalada uma luva, a perda de carga é suportada pela pressão que proporciona o compressor, suficiente para superá-las (Max: 9.7 bar), inclusive para uma pressão máxima na coluna de aproximadamente 1 bar, estando ela totalmente cheia.

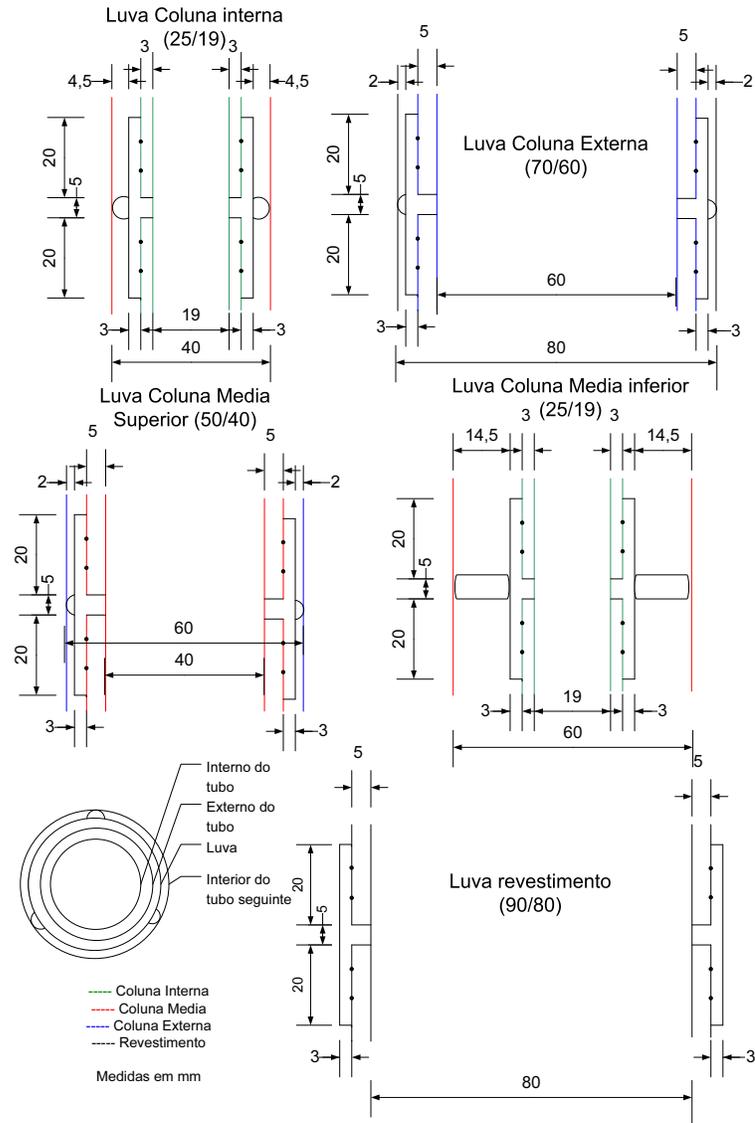


Figura 6.5: Luvas para conexão das colunas BPZ

Alimentação de líquido na coluna BPZ

A coluna BPZ tem possibilidade de alimentação pelo canhoneado inferior, localizado embaixo da válvula de retenção inferior, ou pelo canhoneado superior, localizado a uma altura H_{al} desde o fundo da coluna, acima da válvula de retenção superior, como se mostra na Figura 6.6. No canhoneado superior, o revestimento sempre ficará cheio até o nível do canhoneado. A altura $H_{al} = 0,6\text{ m}$ foi estimada à partir de informações fornecidas pela Petrobras para um poço base de BPZ.

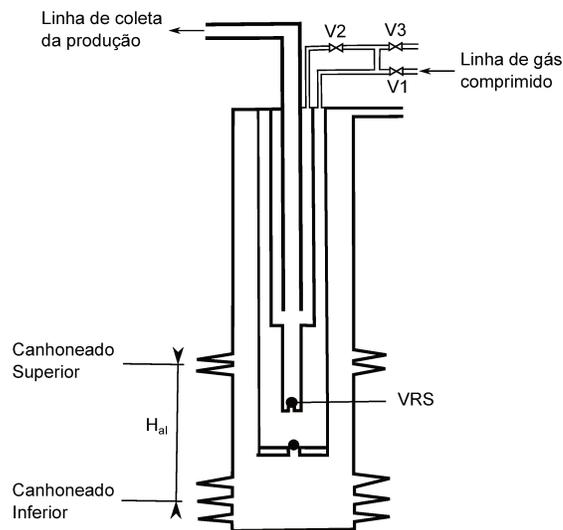


Figura 6.6: Esquema dos canhoneados na coluna BPZ

Determinação de níveis de acumulação para o modelo

Com base na Equação 6.1, os níveis de acumulação no poço modelo se apresentam na Tabela 6.9.

A Figura 6.7 indica as dimensões do poço modelo para BPZ, e os níveis de acumulação do líquido nas colunas, sendo M_{op} , M_{min} e M_{max} os níveis de acumulação na coluna externa. Respetivamente M_{op2} , M_{min2} e M_{max2} os níveis de líquido na coluna intermediária, depois da primeira pressurização em um ciclo de operação.

Tabela 6.9: Níveis de acumulação no poço modelo BPZ

Margem de acumulação	Nível na cauda (m)	Nível na coluna intermediária (m)
Normal operativo	1,5	5,45
Mínimo operativo	1	4,4
Máximo operativo	2	6,49
Máximo com alerta	3	8,58

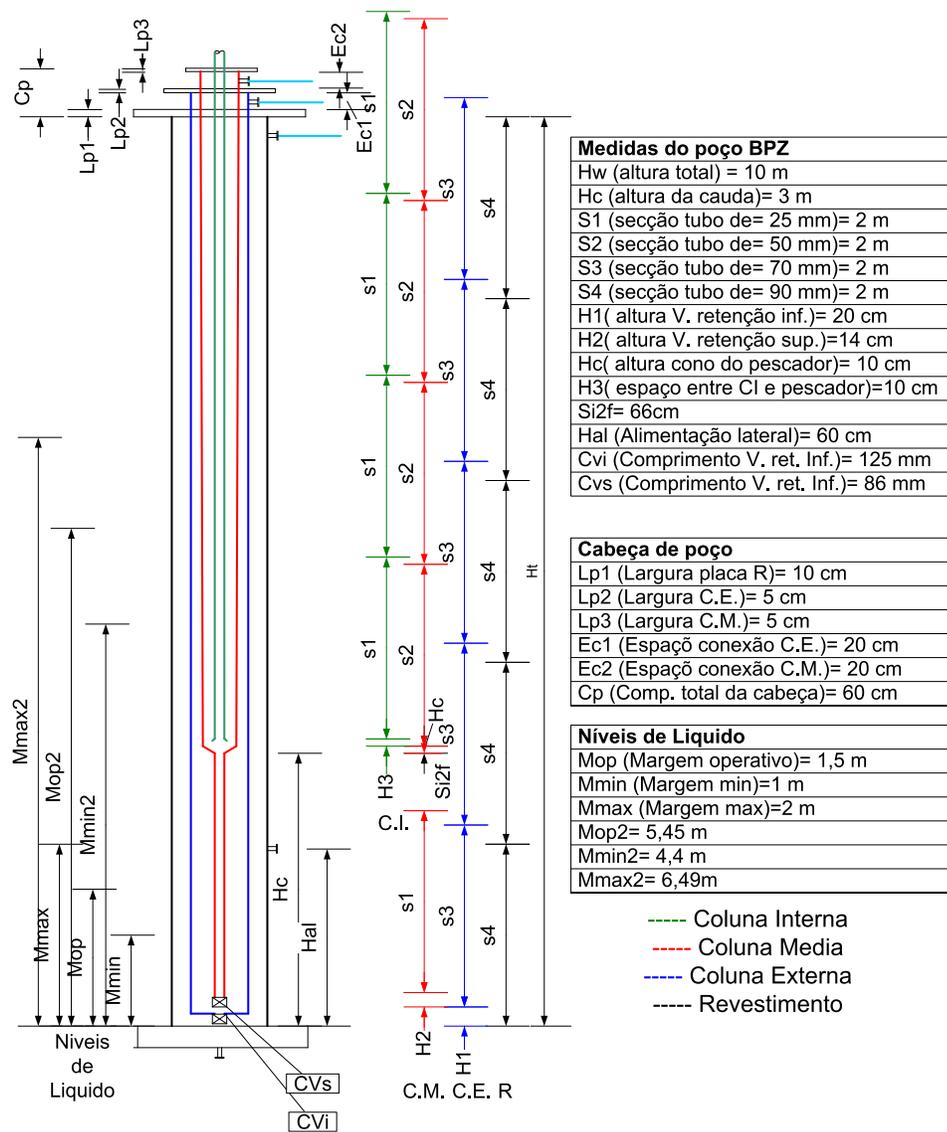


Figura 6.7: Dimensões do poço modelo BPZ com níveis de acumulação

Capítulo 7

Descrição do simulador físico

O simulador físico para GLI convencional e BPZ é constituído por quatro subsistemas, o primeiro representa a coluna de produção do GLI convencional, o segundo subsistema representa a coluna do BPZ, o terceiro subsistema representa o acoplamento poço-reservatório e o quarto subsistema representa a injeção de gás comprimido.

A Figura 7.1 descreve a montagem do aparato de simulação para GLI convencional e BPZ em escala reduzida. As linhas de escoamento são representadas através de cores, conforme segue:

Verde	sistema de injeção de ar comprimido;
Azul	sistema de alimentação de água;
Preta	sistema de linhas de produção.

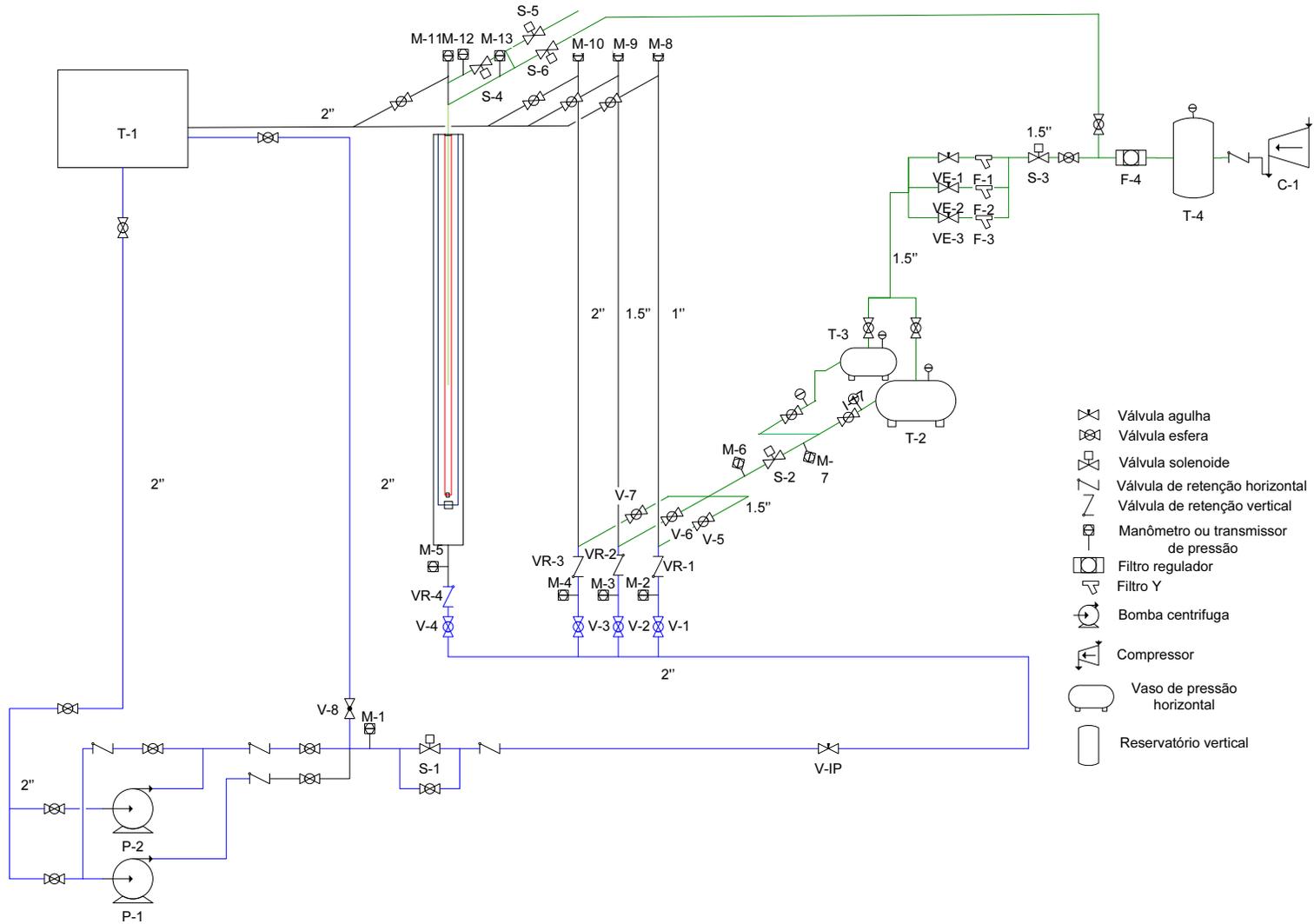


Figura 7.1: Diagrama do simulador físico de *gas lift* intermitente e bombeio pneumático Zadson

7.1 Subsistema acoplamento poço-reservatório

No subsistema de acoplamento poço-reservatório, há o tanque T1 com capacidade para 1000 litros (Figura 7.2 a), aberto à atmosfera, o qual tem a possibilidade de alimentar duas bombas P1 de 3 HP e P2 de 1.5 HP com o objetivo de aumentar a pressão estática do reservatório em caso que se deseje aumentar a profundidade das colunas. A jusante das bombas tem uma linha auxiliar de retorno para T1, a qual divide o fluxo em direção ao poço alimentado, assim controlando a abertura da válvula V-8, se controla a vazão que chega no poço. O escoamento do líquido desde T1 até o fundo do poço ocorre em tubulação com diâmetro de 2''. Ao nível do fundo do poço se tem o transmissor de pressão M1 registrando a pressão estática do reservatório, e também se tem a válvula de globo V-IP, que tem a função de controlar o IP do poço mediante o controle de abertura da válvula, representando o controle da resistência ao escoamento.

Os testes aconteceram em um poço por vez. Logo, para selecionar o poço a ser alimentado há as válvulas V1, V2, V3 para os poços GLI os quais tem diâmetro de 1'', 1.5'' e 2'' respectivamente, e V4 para BPZ. As válvulas VR1, VR2, VR3, VR4 são válvulas de retenção vertical que representam as válvulas de pé dos poços, com o objetivo de permitir o fluxo só em direção ao poço, importante aspecto para completações de poços de GLI, onde o gás não é recomendável que haja contato com a formação. A jusante das válvulas VR1, VR2, VR3, VR4 tem os transmissores de pressão M2, M3, M4 para GLI e M5 para BPZ, os quais indicam a pressão no fundo do poço (Figura 7.2 b).

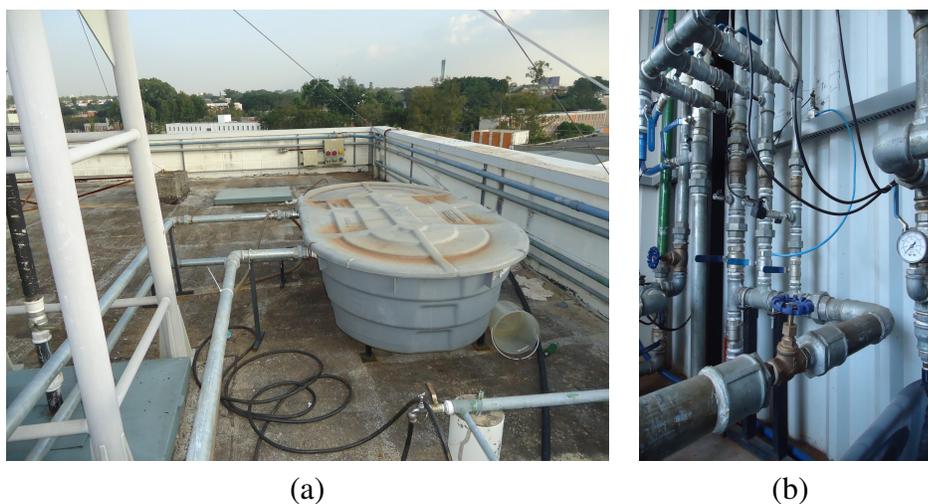


Figura 7.2: Subsistema Acoplamento poço-reservatório, (a) Tanque reservatório T1, (b) Acoplamento poço-reservatório

7.2 Subsistema de injeção de gás

Para se conseguir as pressões de injeção, se dispõe do compressor C1, o qual abastece o tanque pulmão T4 com pressão máxima de trabalho de 8.27 bar, e capacidade de 200 L, volume suficiente para garantir o volume de gás injetado para vários ciclos seguidos. Para ter pressão de injeção constante se instalou o regulador de pressão F4 à saída do tanque (Figura 7.3 a).

Gas-lift intermitente

Há a válvula solenoide S-3, que representa a válvula motora (Figura 7.3 b), a qual controla a injeção de gás nos tanques T2 de 90 L ou T3 de 30 L (Figura 7.4 a), os quais representam dois tamanhos de revestimento para os poços de GLI; Na linha entre S3 e os tanques de revestimento há uma configuração em paralelo dos filtros Y: F1,F2,F3 seguidos das válvulas agulhas, VE1, VE2, VE3 na mesma configuração a qual tem como função controlar a vazão de injeção de gás, e eliminar umidade do ar. A válvula solenoide S2 representa a válvula operadora, a qual controla a injeção do gás nas colunas de produção para realizar a elevação. Há também localizados dois transmissores de pressão, M7 e M6 a montante e jusante de S2, para registrar a pressão do revestimento e da coluna na altura da válvula operadora respectivamente (Figura 7.4 b). Toda a tubulação do sistema de gás é de 1.5''.



(a)



(b)

Figura 7.3: Subsistema de injeção de gás, (a) Sistema de compressão de gás (b) Válvula motora



(a)



(b)

Figura 7.4: Subsistema de Injeção de gás para GLI, (a) Tanques que representam os revestimentos, (b) Válvula operadora

BPZ

Para a injeção no poço BPZ há duas conexões, uma para o anular intermediário onde o gás é injetado pela válvula solenoide S6, e outra conexão no anular interno onde o gás é injetado pela válvula solenóide S4. Há mais uma válvula solenóide S5 para realizar a despressurização da coluna (Figura 7.5).



(a)



(b)

Figura 7.5: Subsistema de Injeção de gás para BPZ, (a) Válvulas de compressão e descompressão do BPZ, (b) Conexões do anular externo e intermediário do BPZ

7.3 Subsistema de coluna de produção

As colunas de produção⁷ para GLI tem diâmetros de 1'', 1.5'' e 2'', com um comprimento de 14,66 m vertical. Para registrar a pressão de cabeça de poço tem-se os transmissores de pressão M8, M9, M10 respectivamente (Figura 7.6).



Figura 7.6: Colunas de produção de GLI e BPZ

Por outro lado, há a coluna de BPZ em acrílico, como se mostra na Figura 7.7, também com um comprimento⁸ de 14,16 m e diâmetro de revestimento de 90 mm. Para registrar a pressão de cabeça de poço tem-se o transmissor de pressão M11.

7.4 Sistema de automação

Utilizou-se uma placa micro-controlada baseada no processador MSP430G2442 para controlar o funcionamento dos sistemas de GLI e BPZ. Este dispõe de entradas para registrar pressões e

⁷Durante o tempo da injeção de ar, uma observação visual permite determinar se a golfada de líquida está sendo impulsionada pela energia de expansão e o escoamento do gás ou se o gás penetra completamente através da golfada. Depois que a golfada é produzida e se estabiliza o poço, o líquido do *fallback*, ou porção da golfada não produzida, pode ser determinada diretamente pela altura na seção vertical do poço teste.

Por tal motivo, no futuro, se projeta a instalação de uma seção em acrílico em uma das colunas GLI, especialmente na altura da válvula operadora.

⁸O comprimento da coluna BPZ foi aumentado do projetado (10 m) para 14,66 m por motivos de dificuldade na montagem da coluna no espaço do LabPetro. Essa diferença não afeta os resultados dos testes. Ao contrário, entre maior altura se espera uma melhora nos resultados em comparação com o poço protótipo.

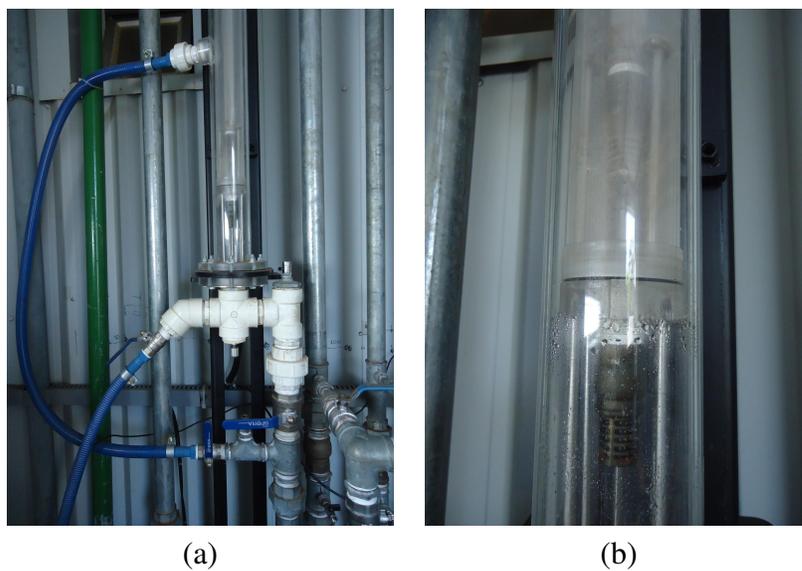


Figura 7.7: Subsistema de coluna de produção, (a) Alimentação da coluna BPZ, (b) Válvulas de retenção superior e inferior

outras variáveis do laboratório⁹, e de saídas para comandar o acionamento das válvulas solenóides (Figura 7.8).



Figura 7.8: Controlador lógico programável dos sistema GLI e BPZ

Esta placa micro-controlada permite o controle da abertura e fechamento de relés que são usa-

⁹No momento se dispõe de transmissores de pressão e válvulas solenóide em diferentes pontos do aparato de simulação, mas no projeto se espera a instalação de sensores de nível, medidores volumétricos para líquido e gás e válvulas de precisão.

dos para controlar o acionamento das válvulas solenóides e fornece leituras de 0 a 1023 (10 bits) de 8 entradas de tensão utilizadas para medir as correntes (de 4 a 20 mili-amperes) emitidas pelos transmissores de pressão e proporcionais às pressões medidas (de 0 a 10 bar). O controle dos relés e a leitura das entradas é realizado através de comandos recebidos através de uma entrada USB que implementa uma serial RS232C. Um programa desenvolvido em C para o ambiente Windows implementa a lógica dos métodos de GLI e BPZ, de acordo com o funcionamento do ciclo GLI explicado na Seção 3.1.4 e do ciclo BPZ na Seção 3.2.3. O método BPZ tem a opção de executar o primeiro e o segundo modo. O terceiro modo é também possível de se executar especificando-se o tempo da segunda pressurização com valor de zero.

Assim, é possível realizar testes no aparato de simulação para vários ciclos de operação e analisar variáveis como *fallback*, tempo para restauração da carga, volume de gás injetado, entre outros, em relação ao número de ciclos até atingir a estabilidade.

A Figura 7.9 mostra uma imagem do ambiente gráfico do controlador, no qual é preciso definir algumas variáveis de entrada para fazer correr os métodos de elevação, tendo a opção de coletar dados a cada 0,4 s e gerar um arquivo com extensão *.txt* para a análise dos testes.

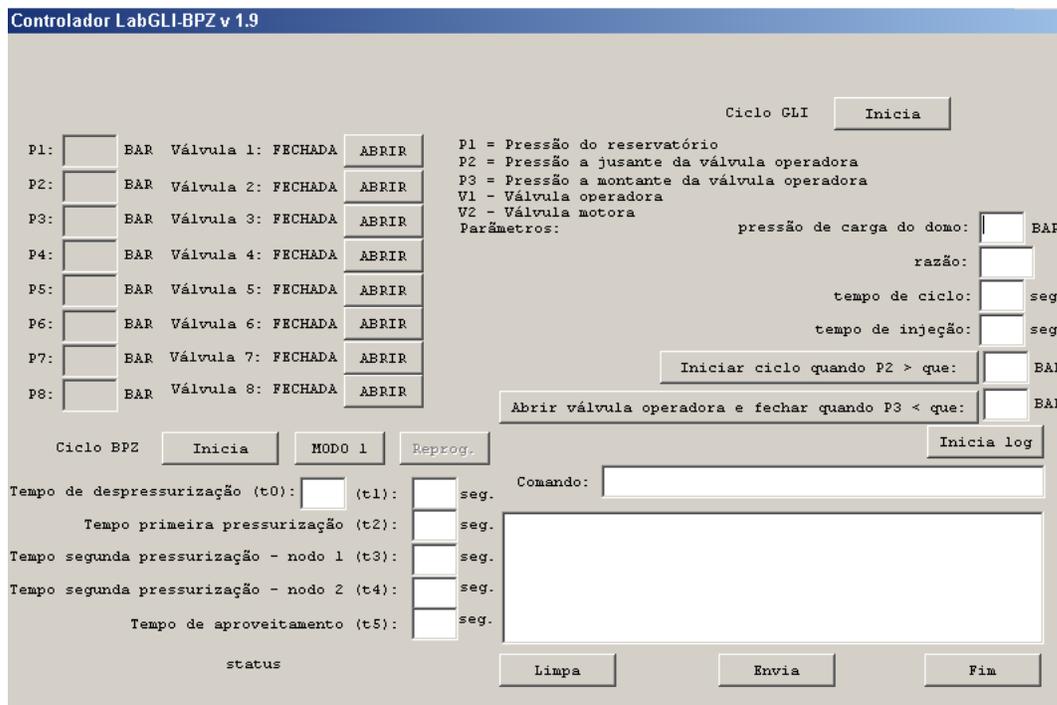


Figura 7.9: Software controlador GLI-BPZ

Para a execução do método GLI é preciso definir:

- nível de alimentação inicial¹⁰
- tempo de injeção
- tempo de ciclo
- pressão do domo e a relação R da válvula operadora ¹¹

Para a execução do método BPZ é preciso definir:

- t0 (tempo despressurização inicial)¹²
- t1 (tempo despressurização)
- t2 (tempo primeira pressurização)
- t3 (tempo segunda pressurização modo 1)
- t4 (tempo segunda pressurização modo 2)
- t5 (tempo de aproveitamento)

Ajuste da faixa de pressão nos transmissores

A placa de aquisição tem uma opção para ajustar a faixa de pressão dos transmissores de pressão. Os transmissores operam numa faixa de 0 a 10 bar, fornecendo uma saída de corrente correspondente de 4 a 20 mA, a qual é traduzida em um sinal para o computador discretizado de 0 a 1023 unidades. Assim, quando o transmissor registra uma pressão de 10 bar, emite uma corrente de 20 mA que será reenviada como um sinal com valor de 1023.

No circuito se tem a opção de reduzir a corrente máxima I_{max} dependendo da medida máxima de pressão que se pretenda registrar no transmissor de pressão. Desta forma se aproveita a faixa completa de sinal 0 - 1023 em cada transmissor o que aumenta a precisão na medida.

O procedimento de ajuste é o seguinte:

¹⁰Estando o poço vazio, abre-se a válvula para sua alimentação de líquido do reservatório, aumentando o nível na coluna, quando atinge o *nível de alimentação inicial* especificado, a válvula motora abre, dando começo ao primeiro ciclo.

¹¹Devem-se especificar esses parâmetros já que se está simulando a válvula operadora mediante uma válvula solenóide, segundo explicado na Seção (5.12)

¹²Para a execução de um teste a coluna inicialmente se encontra vazia. Assim, o tempo para alimentação do primeiro ciclo é maior em relação aos ciclos seguintes.

- Definir a pressão máxima;
- Calcular a corrente máxima segundo a equação do transmissor $I_{max} = 1,6 * P_{max} + 4$;
- Ajustar a resistência correspondente ao medidor de acordo com a corrente máxima;
- Utilizando uma bateria conectada a um multímetro, aplicar a mínima corrente e usar o comando <ponto_a #transmissor valor_corrente> para informar ao software que este é o ponto 'a' da reta que define a relação entre leitura e corrente;
- Utilizando uma bateria conectada a um multímetro, aplicar a máxima corrente e usar o comando <ponto_b #transmissor valor_corrente> para informar ao software que este é o ponto 'b' da reta que define a relação entre leitura e corrente;

Com isto, fica definida a equação de ajuste para a pressão máxima no transmissor, segundo:

$$N = aI + b$$

onde:

$$a = \frac{1023}{I_{max} - 4} \quad b = \frac{-4092}{I_{max} - 4}$$

Para verificar o ajuste feito nos transmissores de pressão se insere o código **exibe_constantes**, o qual exibe os valores das constantes **a** e **b** e correntes máximas (I_{max}).

Outros comandos disponíveis no software:

exibe_pressão exibe o valor das pressões dos transmissores de pressão

exibe_corrente exibe o valor das correntes medidas nos transmissores de pressão

Capítulo 8

Comportamento dinâmico do poço modelo nos ciclos de GLI

Na primeira parte deste capítulo são apresentados os testes de caracterização do poço modelo GLI, testes realizados para um ciclo, nos quais se analisaram parâmetros como: pressão de injeção, pressão do domo e carga de líquido. Na segunda parte, descreve-se a influência dos tempos de ciclo e tempo de injeção na estabilidade dos ciclos.

8.1 Caracterização do poço modelo GLI

O objetivo dos testes foi determinar a influência de parâmetros GLI (diâmetro de coluna, pressão de carga de líquido, pressão a montante da válvula operadora no momento de abertura, pressão de fechamento da válvula operadora) sobre a percentagem de recuperação para um ciclo de GLI.

As pressões mostradas nos resultados são medidas e exibidas em pressão manométrica

Procedimento

- Carregar o líquido na coluna até uma pressão especificada (foram feitos para duas cargas de líquido: 0,3 e 0,5 bar medidas na altura da válvula operadora, correspondente a 3 e 5,1 m de coluna de líquido)
- Carregar o revestimento até uma pressão especificada (utilizou-se o revestimento de 90 Litros)
- Indicar a pressão de fechamento da válvula operadora
- Abrir a válvula operadora
- Fechar a válvula operadora quando atinge a pressão de fechamento.

- Leitura da pressão na coluna na altura da válvula operadora depois de estabilizar.

A percentagem de recuperação e o *fallback* foram calculados pelas Equações 8.1 e 8.2.

$$v_p/v_i = \frac{V_i - V_f}{V_i} * 100\% \quad (8.1)$$

$$FB = 100 - v_p/v_i \quad (8.2)$$

Onde:

V_i : volume inicial na coluna - $V_i = \frac{P_{ti}A_t}{\rho g}$

V_f : volume final na coluna - $V_f = \frac{P_{tf}A_t}{\rho g}$

P_{ti} : pressão inicial na coluna

P_{tf} : pressão final na coluna

8.1.1 Influência da pressão de injeção

Conforme observado na Figura 8.1, o aumento da pressão de injeção resultou em maiores percentagens de recuperação, concordando com White (1963), que realizou testes em colunas de 93 ft, e diâmetros de coluna desde $1/2$ até $2^{7/8}$ in. Isto se deve à maior velocidade da golfada, que leva a pouca penetração do gás, diminuindo assim o *fallback*¹³.

O aumento do diâmetro da coluna leva à diminuição da percentagem de recuperação. Desse modo, para uma coluna de diâmetro maior precisa-se aumentar a relação P_{co}/P_{to} para manter a mesma percentagem de recuperação que em uma de menor diâmetro. Contudo, conforme observado na Figura 8.2, a coluna de menor diâmetro consegue ter maior volume produzido apenas até uma determinada P_{co} , ponto máximo de produção. A partir desse ponto a coluna de maior diâmetro passa ter a maior produção em função de P_{co} . Assim, se percebe que cada diâmetro de coluna apresenta uma faixa P_{co}/P_{to} recomendável, onde se obtém os melhores desempenhos. Importante notar que a faixa P_{co}/P_{to} estipulada por outros autores, onde se obtiveram resultados de simulação compatíveis com ensaios experimentais, como no trabalho de Carvalho (2004): $0,45 \leq P_{to}/P_{co} \leq 0,62$, comparado com os dados de Nelly *et al.* (1973) e Santos *et al.* (2001), se fizeram para um único

¹³Testes com Pcc = 0,3 bar.

poço-base, com características similares entre eles; por tanto, é de se esperar que diferentes características de poço apresentem diferentes faixas P_{co}/P_{to} de operação.

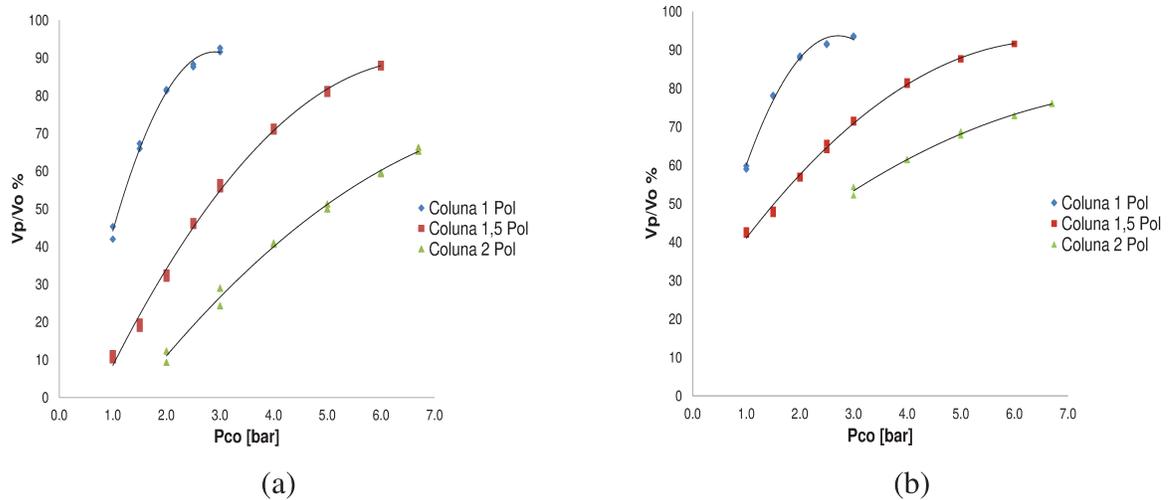


Figura 8.1: Percentagem de recuperação por pressão de injeção a montante da válvula operadora, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar

Tabela 8.1: Características de poços GLI utilizados em trabalhos anteriores

Característica	Diâmetro de revestimento ^a [mm]	Diâmetro de coluna ^a [mm]
Neely, Montgomery e Vogel	178	62
Santos	140	60
Carvalho	140	60

a -diâmetro nominal

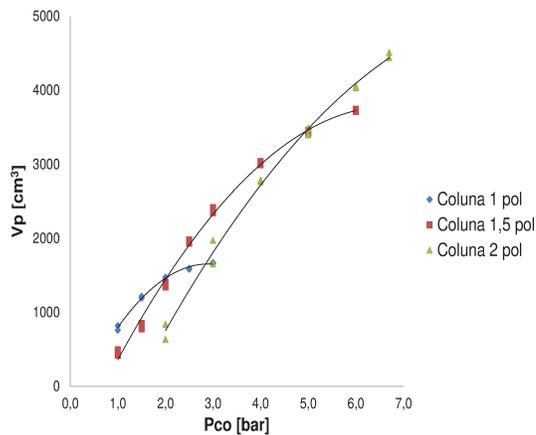


Figura 8.2: Volume de recuperação por pressão de injeção a montante da válvula operadora para carga de 0,3 bar

8.1.2 Influência da pressão de fechamento da válvula operadora

O aumento da pressão de fechamento¹⁴ levou à diminuição da percentagem de recuperação, devido ao menor volume de gás injetado na coluna.

As Figuras 8.3, 8.4 e 8.5 podem ser utilizadas para prever um valor aproximado da percentagem de recuperação, especificando a pressão de injeção e pressão de fechamento, para uma carga de líquido desejada. O cálculo da razão R da válvula operadora se faz conforme a Equação 3.6. Deve-se ter um cuidado na especificação dos valores acima mencionados, levando em conta que o *fallback* varia com o número de ciclos, como pode se observar na Figura 3.2 no trabalho de Santos (1997), onde FB2 é definido como a razão entre a diferença das massas de líquido inicial e produzida na superfície e a massa inicial da golfada. Assim, a redução do *fallback* de líquido indica que o volume produzido na superfície aumenta a cada ciclo¹⁵. Desse modo, é de se esperar uma percentagem de recuperação maior na estabilidade dos ciclos, em relação com a prevista para o primeiro ciclo.

¹⁴A pressão de fechamento pode-se considerar igual à pressão do domo da válvula operadora, segundo a Equação 3.9. Contudo, ela tem efeito na injeção de gás na análise de vários ciclos.

¹⁵Nos testes não foi utilizado injeção de gás através da válvula motora, a elevação ocorreu apenas com o gás acumulado no revestimento; assim, é de se esperar que a condições normais de operação, com injeção de gás no revestimento, e por tanto, maior volume de gás por ciclo, se obtenham maiores percentagens de recuperação.

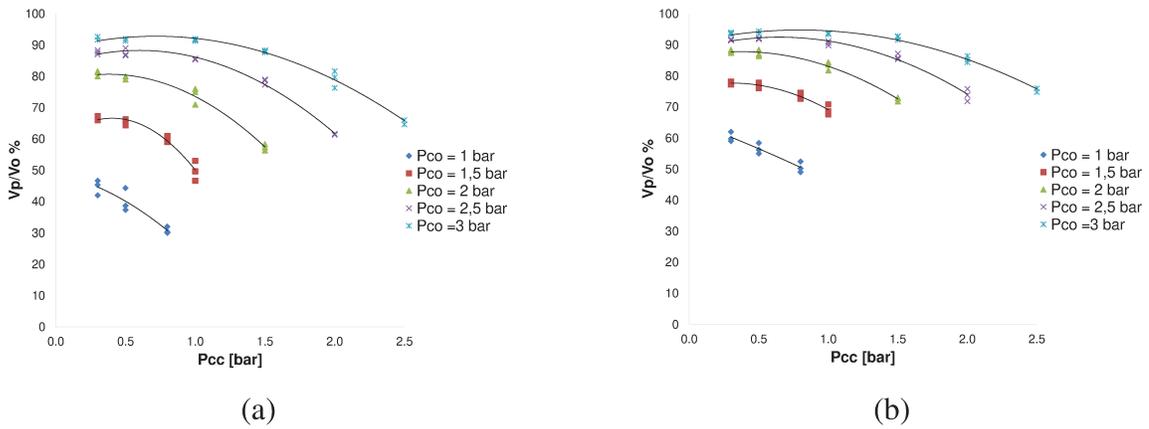


Figura 8.3: Percentagem de recuperação por pressão de fechamento para coluna de 1 pol, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar

A influência da pressão de injeção na percentagem de recuperação diminui conforme aumenta a carga de líquido, como se observa na Figura 8.4, o aumento da pressão de injeção de 1,5 bar, para uma pressão de fechamento $P_{cc} = 0,3 \text{ bar}$, resulta em um aumento de 25% da percentagem de recuperação para a carga de 0,3 bar, enquanto para a carga de 0,5 bar aumenta 15%.

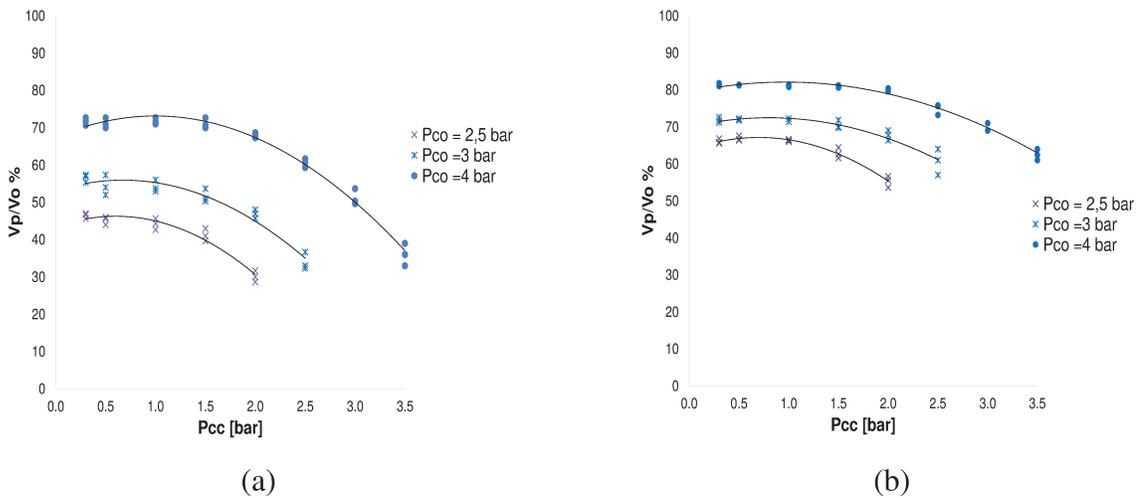


Figura 8.4: Percentagem de recuperação por pressão de fechamento para coluna de 1,5 pol, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar

Na Figura 8.3 se observa que, na medida em que aumenta a pressão de fechamento P_{cc} , a influência da pressão de injeção sobre a percentagem de recuperação aumenta. Contudo, conforme aumenta-se o diâmetro da coluna, essa influência diminui, resultando no mesmo ganho da percentagem de recuperação com o aumento de P_{cc} .

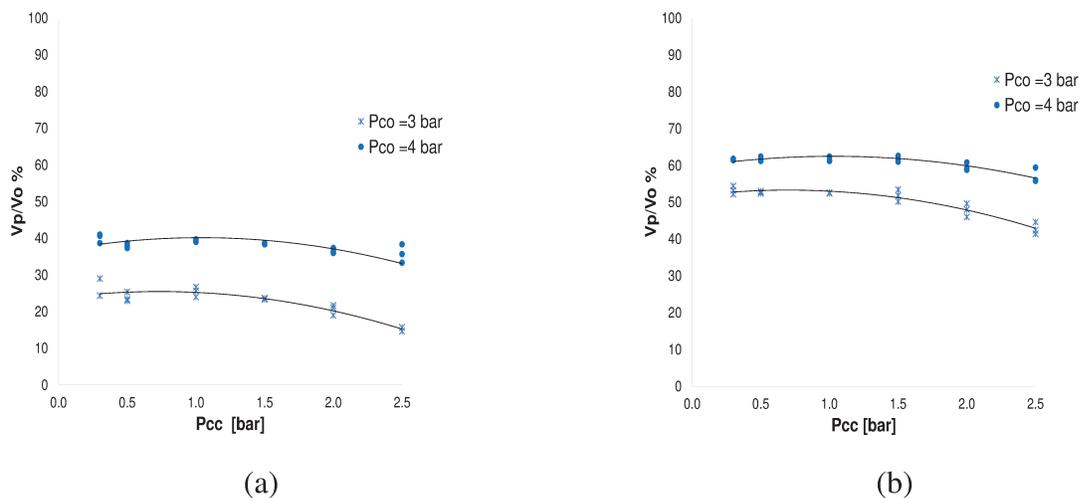


Figura 8.5: Percentagem de recuperação por pressão de fechamento para coluna de 2 pol, (a) Carga de 0,3 bar, (b) Carga de 0,5 bar

8.1.3 Influência da carga de líquido na coluna

O aumento da carga de líquido (comprimento da golfada) resulta em aumento da percentagem de recuperação para um ciclo (Figura 8.6). Este comportamento foi observado por White (1963), onde o aumento do fator adimensional S/D (*submergence/depth*) provocava o aumento do fator N/S (*production/submergence*). No entanto, para cargas maiores, o tempo de alimentação aumenta, diminuindo o volume total de líquido produzido em vários ciclos, desta forma deve se procurar um ponto intermediário para obter o máximo volume total produzido.

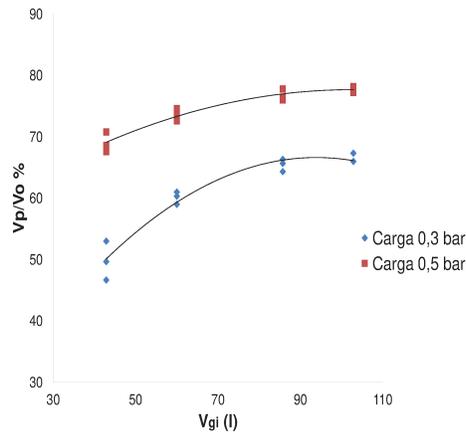


Figura 8.6: Percentagem de recuperação por volume de gás injetado, Coluna de 1 Pol para duas cargas de líquido, pressão de injeção $P_{co} = 1,5 \text{ bar}$

8.2 Estabilidade

Nesta seção foram feitos testes com diferentes temporizações (t_c, t_{inj}), com o qual foi possível traçar um mapa operacional para o aparato de simulação do GLI, dentro do qual se acham ciclos estabilizados.

Os parâmetros utilizados foram: $P_{inj} = 1,5 \text{ bar}$, $P_{to} = 0,29 \text{ bar}$, a válvula operadora foi calibrada com $P_d = 0,5 \text{ bar}$ e $R = 0,71$.

O estado das válvulas motora e operadora nas figuras de pressão em função do tempo, está dado (Figura 3.6):

Estado	Valor
Aberta	0,1
Fechada	0

Um ciclo estável se mostra na Figura 8.7, identificado pela sincronização da válvula operadora com a válvula motora, e a estabilidade do *fallback* ao longo dos ciclos, assim a abertura da válvula operadora ocorre para o mesmo tamanho de golfada de líquido.

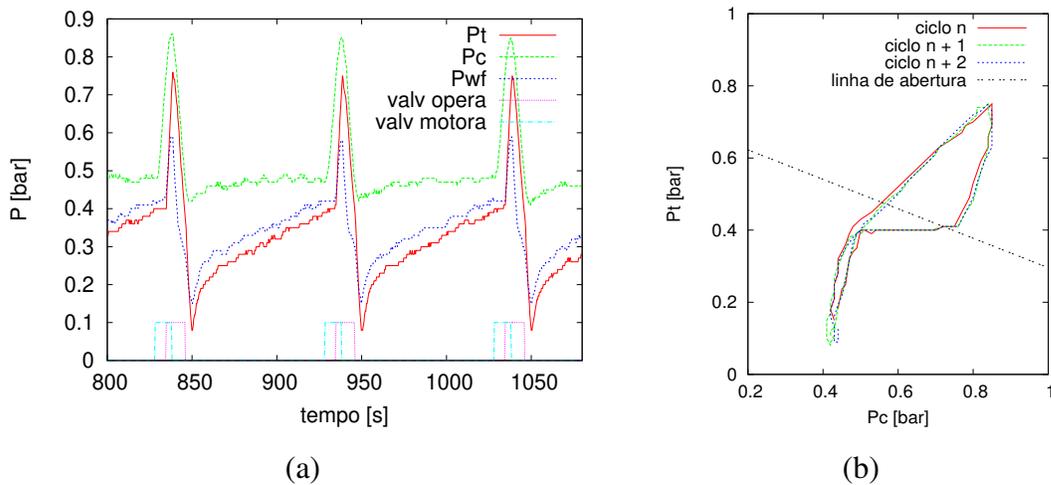


Figura 8.7: Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 100$ s, $t_{inj} = 10$ s, $P_d = 0,5$ bar

A alimentação do líquido na coluna logo depois da elevação da golfada é rápida devido à contribuição do líquido proveniente do reservatório e o *fallback*, líquido que não conseguiu atingir a superfície e escorrega até o fundo da coluna. Depois de terminar de escorregar o líquido, a alimentação passa a depender apenas do reservatório.

A Figura 8.7 (b), mostra P_c vs P_t para 3 ciclos estabilizados, observando-se sua similaridade, característico de ciclos estáveis onde os ciclos se sobrepõem. Pode-se acompanhar as etapas de um ciclo com a Figura 8.8, onde se observou similaridade com o comportamento obtido por Carvalho (2004), mostrado na Figura 3.5. Começando pela alimentação na qual aumenta P_t , com P_c permanecendo aproximadamente constante e igual a P_d .

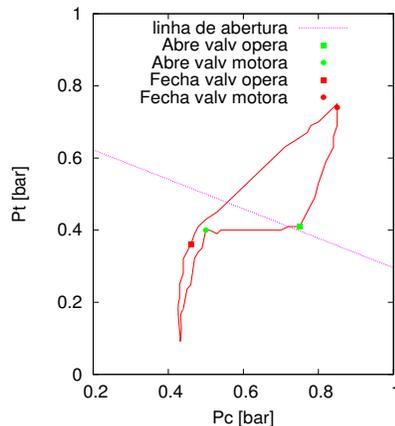


Figura 8.8: Ciclo de operação GLI

Segue um aumento rápido de P_c devido à abertura da válvula motora com P_t constante, quando P_c atinge a linha de abertura definida pela equação da válvula operadora, esta abre e ocasiona o aumento de P_t devido à passagem do gás para a coluna.

Depois, a válvula motora fecha, causando a diminuição de P_c devido ao esvaziamento do revestimento e conseqüentemente diminuição de P_t . A despressurização do revestimento acontece muito rápido, despressurizando a coluna ao mesmo tempo.

Em seguida a válvula operadora fecha, ocorrendo a etapa de despressurização onde a P_t diminui e começa o ciclo novamente.

A Figura 8.9 expõe com detalhe o comportamento das pressões no momento da elevação da golfada de líquido, conseguindo-se observar o comportamento das pressões no tempo e os momentos da abertura e fechamento das válvulas operadora e motora.

Importante observar como as pressões se acompanham durante as etapas de elevação e despressurização.

P_t antes da elevação da golfada é menor que P_{wf} , devido à coluna de líquido entre elas, no momento da injeção de gás na coluna P_t aumenta superando P_{wf} devido ao passo do gás para a coluna, P_{wf} também aumenta em menor medida, isto indica que a válvula de pé fica parcialmente aberta, assim a injeção de gás na coluna reflete em P_{wf} , já que se a válvula de pé fecha-se completamente P_{wf} teria que permanecer constante, mas nesse caso a pressão de injeção de gás na coluna não é suficiente para contrapor à pressão do reservatório que tende a manter a válvula de pé fechada.

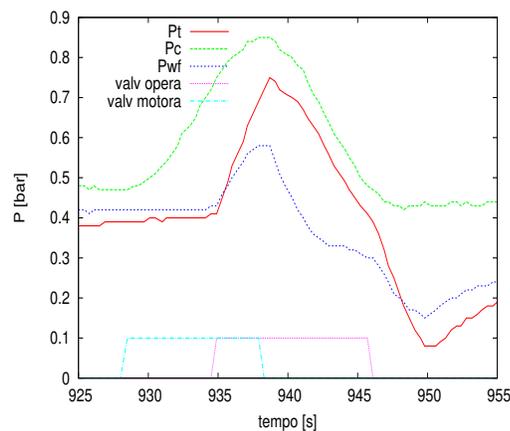


Figura 8.9: Comportamento das pressões no momento da elevação da golfada de líquido

A Figura 8.10 mostra o mapa operacional das colunas GLI de diâmetro 1 in com a válvula operadora calibrada com $P_d = 0,5 \text{ bar}$. A precisão dos limites traçados está limitada pela discretização

dos tempos t_c , t_{inj} utilizados nos testes. Assim, na proximidade dos limites a estabilidade dos ciclos é incerta.

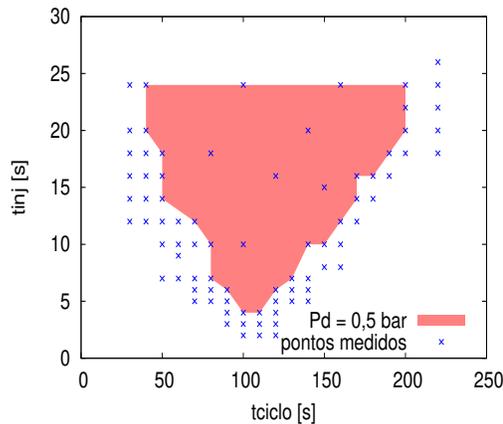


Figura 8.10: Mapa operacional $Pd = 0,5 \text{ bar}$

Neste mapa se conseguem distinguir 3 zonas de instabilidade:

Tempo de ciclo curto

A instabilidade se apresenta pelo descompasso das válvulas operadora e válvula motora, A válvula motora abre, permitindo a injeção de gás no revestimento. Contudo, a pressão na coluna de produção não é suficiente para abrir a válvula operadora, tendo que se aguardar um tempo para a alimentação da coluna. Assim, a válvula operadora abre depois de terminado o tempo de injeção, o que baixa a eficiência da elevação, já que uma adequada operação acontece quando a injeção de gás no revestimento coincide com a elevação da golfada e permanece até a chegada da golfada na superfície (Brill e Doerr, 1967). Para os seguintes ciclos, aumenta-se o descompasso das válvulas e são elevadas cargas de líquido menores a cada ciclo, como mostrado na Figura 8.11.

Tempo de ciclo longo

A pressão na coluna no momento da injeção aumenta com os ciclos, causando um maior *fall-back* a cada ciclo, devido a que o gás não consegue elevar de forma adequada a coluna de líquido alimentada na coluna. A partir do 4 ciclo a pressão da coluna atinge a pressão do domo provocando

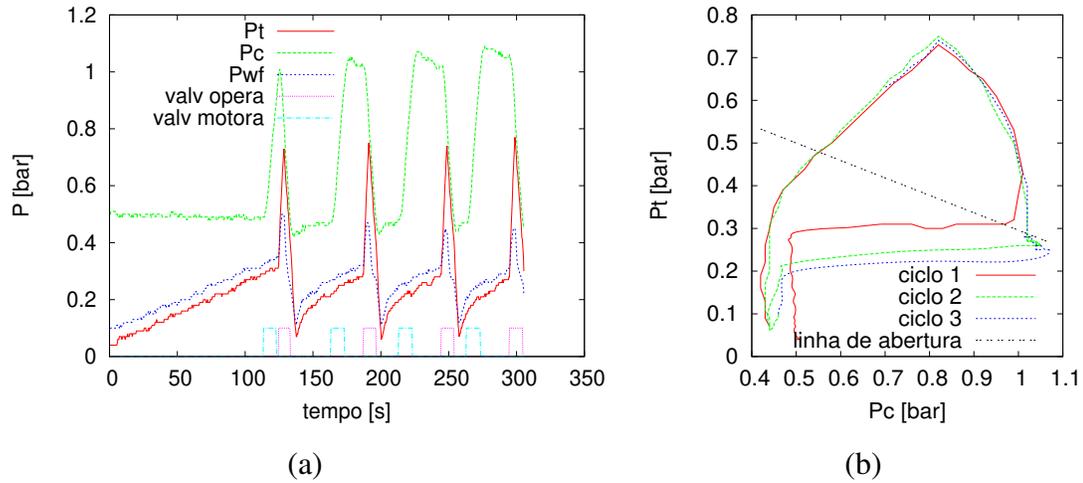


Figura 8.11: Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 50$ s, $t_{inj} = 10$ s, $P_d = 0,5$ bar

a abertura da válvula operadora repetidamente, sem o gás poder elevar a coluna de líquido. O funcionamento adequado para a abertura da válvula operadora deve ocorrer com o aumento da pressão do revestimento, e não da pressão da coluna com os ciclos.

A Figura 8.12 (b), mostra como passa de um ciclo adequado no primeiro ciclo, para ciclos inadequados para os seguintes ciclos, aprecia-se no ciclo 2 que um pequeno aumento de P_c causa a abertura da válvula operadora, enquanto no ciclo 3 a abertura da válvula operadora é causada pelo aumento da pressão na coluna, abrindo antes que a válvula motora, nos ciclos seguinte a válvula operadora vai abrir mais cedo e repetidamente a cada ciclo.

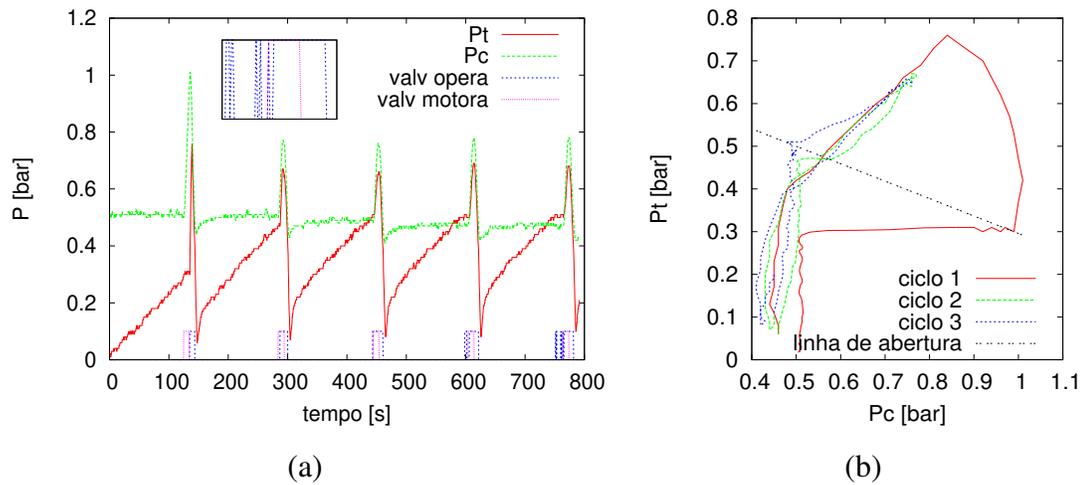


Figura 8.12: Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 160$ s, $t_{inj} = 10$ s, $P_d = 0,5$ bar

Tempo de injeção curto

De forma similar ao apresentado com tempo de ciclo longo, o *fallback* aumenta na coluna devido a que o pequeno volume de gás injetado não consegue elevar de forma adequada a golfada de líquido, atingindo um ponto em que a pressão na coluna iguala a pressão do domo, abrindo repetidamente a válvula operadora, antes da injeção de gás (Figura 8.13).

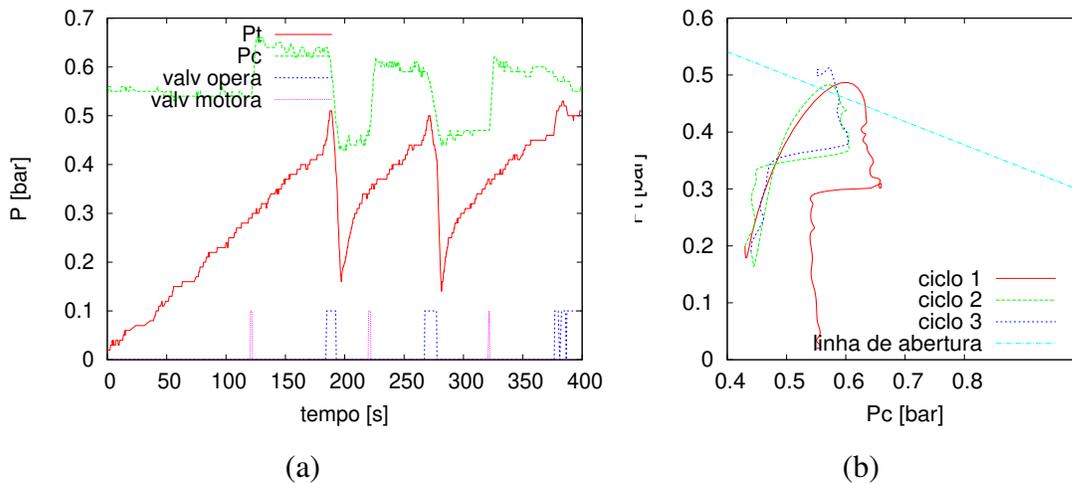


Figura 8.13: Dinâmica ciclos GLI para $t_c = 100\text{ s}$, $t_{inj} = 2\text{ s}$, $P_d = 0,5\text{ bar}$

Influência da pressão do domo na estabilidade

A Figura 8.14 exibe o mapa operacional da coluna GLI de 1 pol., aumentando a pressão do domo para $P_d = 0,6\text{ bar}$, mantendo os restantes parâmetros iguais que para $P_d = 0,5\text{ bar}$ ($P_{inj} = 1,5\text{ bar}$, $P_{to} = 0,29\text{ bar}$, a válvula operadora foi calibrada com $R = 0,71$). Observa-se a tendência de que um aumento da pressão do domo translada a área de estabilidade para direita, ou seja, maiores tempos de ciclo são necessários para ter ciclos estáveis.

Produção

Devido a que nesse momento o aparato experimental não dispõe do sistema de medição do volume produzido, se optou por medir o *fallback* para um ciclo, medindo-se a percentagem de recuperação segundo as equações da Seção 8.1. O procedimento foi repetido variando o tempo de

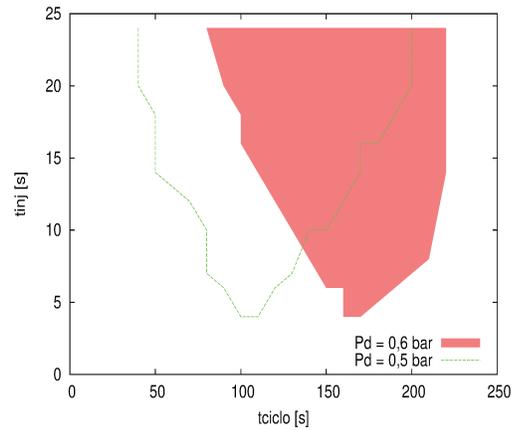


Figura 8.14: Mapa operacional $P_d = 0,6 \text{ bar}$

injeção. A Figura 8.15 mostra o aumento da percentagem de recuperação com o aumento do tempo de injeção, devido ao maior arraste de líquido pelo gás em ascensão. Por outro lado, tempos de injeção menores que um determinado valor não produzem a golfada de líquido. Porém, o tempo de injeção deve ser maior do que o tempo que gasta a golfada para atingir a superfície. Também se pode apreciar que maior carga leva à maior percentagem de recuperação, concordando com o observado na Figura 8.6.

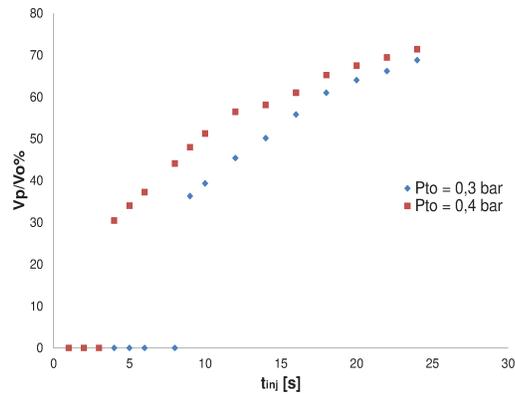


Figura 8.15: Percentagem de recuperação na coluna de 1 pol

Repetibilidade

A Figura 8.16 mostra a pressão a jusante da válvula operadora (P_t) para três testes feitos com os seguintes parâmetros: $P_{inj} = 1,5 \text{ bar}$, $P_{to} = 0,29 \text{ bar}$, válvula operadora calibrada com $P_d = 0,5 \text{ bar}$ e $R = 0,71$, e válvula motora temporizada em $t_c = 100 \text{ s}$, $t_{inj} = 10 \text{ s}$.

Para medição se utilizaram transmissores de pressão de 0-10 bar, calibrados para operar dentro de uma faixa de 0-3 bar. O sistema de aquisição coleta um dado a cada 0,4 s.

Nas etapas de injeção, elevação e descompressão os pontos são juntados por linhas retas; apenas na etapa de alimentação se utilizaram rotinas de interpolação, como o programa Gnuplot com a opção *smooth unique* e *bezier*. A opção *unique* faz os dados monótonos em x: pontos com os mesmos valores de x são substituídos por um único ponto com a média do valor de y. Os pontos resultantes são, então, ligados por segmentos de reta; de outra forma, a opção *bezier* aproxima os dados com uma curva de *bezier* de grau n (o número de pontos de dados), que liga os pontos das extremidades. O método escolhido é aquele que ajuste melhor os pontos experimentais. A Figura 8.16 mostra o ajuste dos pontos utilizando *smooth unique* para a etapa de alimentação.

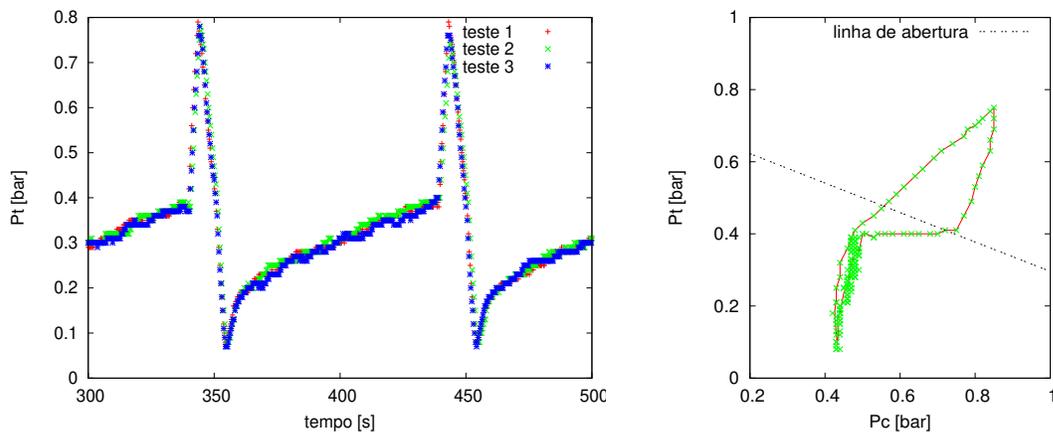


Figura 8.16: Repetibilidade dos testes e ajuste de pontos

Capítulo 9

Comportamento dinâmico do poço modelo nos ciclos de BPZ

O simulador físico do BPZ tem a possibilidade de operar em 3 modos, dependendo da sequência de pressurização e despressurização, segundo mostrado no Capítulo 3, Seção 3.2.3. Neste capítulo se apresenta o análise do comportamento das principais pressões que caracterizam um ciclo BPZ. Também, identifica-se a influência dos tempos de pressurização e despressurização com a pressão de fundo de poço (P_{wf}) e de cabeça de poço (P_{wh}).

A Figura 9.1 mostra o esquema da coluna para BPZ utilizada no simulador físico, indicando os principais elementos da coluna e as variáveis estudadas neste trabalho.

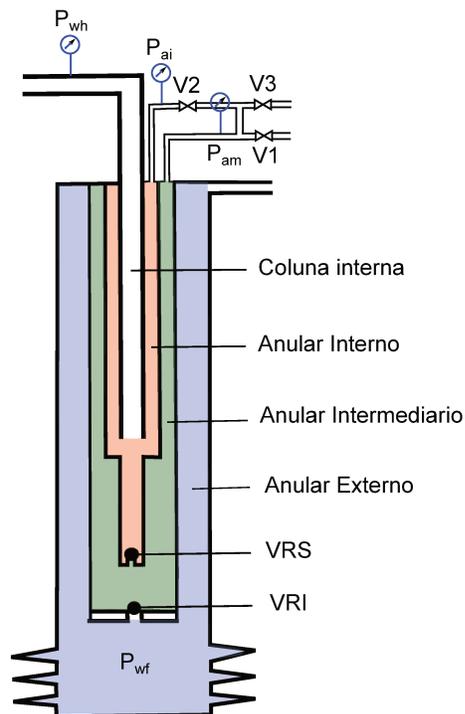


Figura 9.1: Esquema da coluna para BPZ utilizada no simulador físico

9.1 Primeiro modo de pressurização BPZ

Este modo se caracteriza por uma segunda pressurização com escoamento do gás do anular intermediário para o anular interno, com a válvula V2 aberta, e V1 e V3 fechadas.

9.1.1 Procedimento

- Ajustar a vazão em $39,3 \pm 6,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, a qual é medida registrando a pressão de fundo de poço no tempo para uma faixa de (0-0.3 bar), com a cabeça de poço aberta a atmosfera. A vazão permaneceu aproximadamente constante na faixa de P_{wf} ;
- Definir o tempo de despressurização inicial (t_0), o qual deve ser maior que o tempo de despressurização (t_1) dos seguintes ciclos, devido a que a coluna está inicialmente vazia;
- Definir o tempo de despressurização (t_1), tempo da primeira pressurização (t_2), e tempo da segunda pressurização (t_3);
- Regular a pressão de injeção constante em 1,5 bar;
- Abrir a válvula de alimentação de gás ;
- Abrir a válvula de alimentação da coluna, e dar início à operação quando o nível de líquido atinja uma altura especificada de 20 cm, a partir do transmissor de fundo de poço;
- Parar a operação depois de 7 ciclos de operação.

9.1.2 Análise dos resultados

A Figura 9.2 (a) apresenta o comportamento das principais pressões que caracterizam um ciclo de operação BPZ, operando no modo 1. Na alimentação com V3 aberta, a pressão de fundo de poço (P_{wf}) aumenta no tempo, registrando P_{wf-pre} no momento que começa a primeira pressurização, em que fecha V3 e abre V1, causando o aumento da pressão do anular intermediário (P_{am}) pela admissão de gás no anular e deslocando um volume de líquido para o anular interno.

Depois, na segunda pressurização, abre-se V2 e fecha-se V1. Assim, parte do gás acumulado no anular intermediário escoar para o anular interno, passando pela válvula V2. Com isso, a pressão do anular interno (P_{ai}) aumenta, enquanto a P_{am} diminui, procurando-se o equilíbrio das pressões, com uma pequena diferença entre elas, causada pelas perdas por fricção entre os dois transmissores. À

partir desse ponto, P_{ai} e P_{am} continuam diminuindo pela expansão do gás que desloca um volume de líquido do anular interno para a coluna interna e em seguida eleva a golfada. O momento em que o líquido atinge a superfície é identificado com o aumento da pressão da cabeça de poço (P_{wh}). A alimentação do líquido continua durante o tempo da primeira e segunda pressurização, devido a que a válvula de retenção superior (VRS) fecha. Assim, o líquido alimentado pelo reservatório se acumula no anular externo, que está aberto à atmosfera, isso se aprecia com o aumento de P_{wf} neste intervalo de tempo.

Na depressurização, V2 se fecha e V3 se abre, terminando de descomprimir o anular intermediário, enquanto o anular interno é descomprimido com a produção de gás depois da golfada de líquido. O anular intermediário volta a ser alimentado, com uma contribuição do volume acumulado no anular externo. Isto se pode observar com a diminuição de P_{wf} , e outra contribuição por parte do reservatório. Na figura 9.2 (b), se observa como se é repetido o ciclo, apreciando-se a etapa de alimentação com o aumento de P_{wf} .

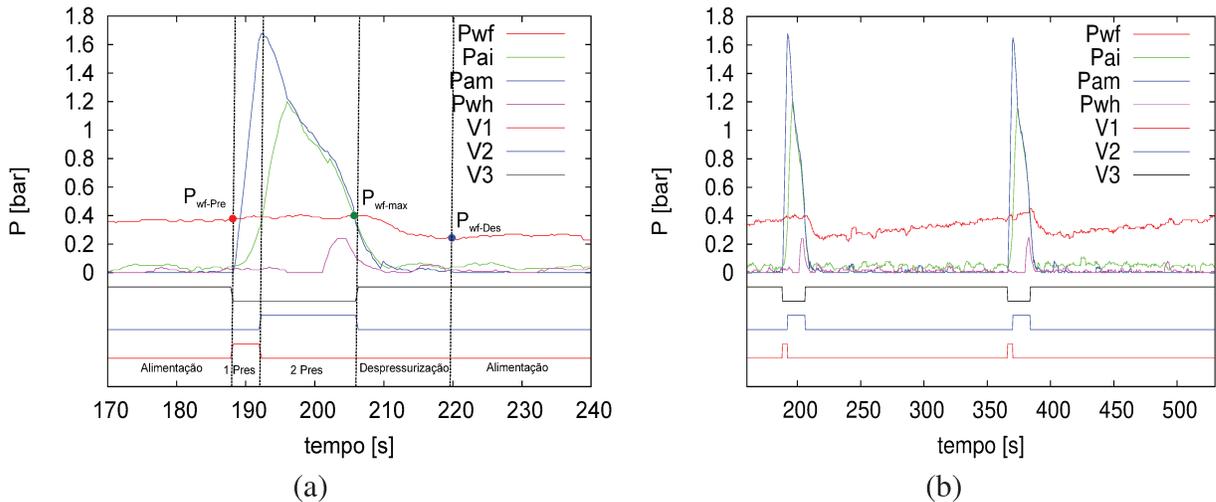


Figura 9.2: Dinâmica do BPZ modo 1, $t_1 = 160 s$, $t_2 = 4 s$, $t_3 = 14 s$

A estabilidade dos ciclos se observa na Figura 9.3 (a), onde a pressão de fundo de poço se mantém variando entre P_{wf-max} e P_{wf-des} , este comportamento estável foi registrado para $t_1 = 220 s$, $t_2 = 4 s$, $t_3 = 14 s$. Com o aumento do tempo de depressurização para $t_1 = 140 s$ (Figura 9.3 (b)), observa-se o aumento de P_{wf} a cada ciclo sem atingir estabilidade nos 7 ciclos medidos, devido a que o volume alimentado pelo reservatório é maior que o volume produzido.¹⁶

¹⁶Os testes foram realizados para 7 ciclos, nos quais não se atingiu a estabilidade em todos eles. Sugere-se realizar testes com maior número de ciclos para observar se aqueles testes chegam a atingir a estabilidade.

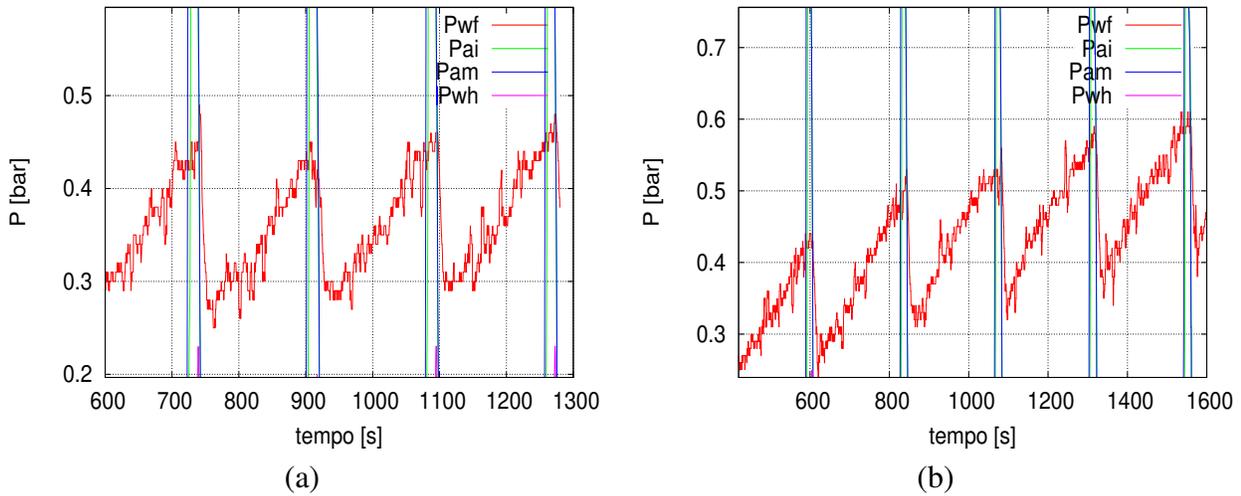


Figura 9.3: Estabilidade do BPZ modo 1, (a) estável, (b) irregular

A Figura 9.4 apresenta a influência do tempo de depressurização (t_1) e tempo da segunda pressurização (t_4) com a pressão de fundo de poço (P_{wf}) e de cabeça de poço (P_{wh}). A Figura 9.4 (a) mostra uma diminuição de P_{wh} com o aumento de t_1 , devido a que o aumento de t_1 leva a maiores cargas de líquido na coluna para a mesma quantidade de gás injetado (Figura 9.4 (b)), o qual diminui a velocidade da golfada, tendendo a aumentar o *fallback*. O nível no anular intermediário não atingiu a válvula de retenção superior (VRS) para nenhum dos tempos t_1 analisados. Para um tempo $t_1 = 160$ s, o nível permaneceu 38 cm acima da VRS. Tempos menores podem atingir VRS.

Maiores tempos da segunda pressurização (t_3) levaram ao aumento de P_{wh} até um ponto no qual P_{wh} tem tendência a permanecer constante. Neste sentido, deve-se procurar o tempo t_3 que minimize o consumo de gás. Entretanto, o efeito de t_3 na pressão de fundo do poço parece ser insignificante como se mostra na Figura 9.4 (d), isso pode ser devido a que a maioria dos tempos $t_3 = 14, 16$ e 18 s foram maiores ao tempo que leva a golfada a atingir a superfície igual a 10 s desde abertura da válvula V2 (tempo medido em vários testes). Com $t_3 = 10$ s a golfada de líquido não atinge a superfície durante o tempo da segunda pressurização, senão logo depois de V3 se abrir. Observou-se diminuição de P_{wh} em cada ciclo desde 0.16 bar no primeiro ciclo até 0.05 bar no ciclo 7. Pelo anterior, se recomenda utilizar tempos de segunda pressurização t_3 maiores que o tempo que gasta a golfada para atingir a superfície.

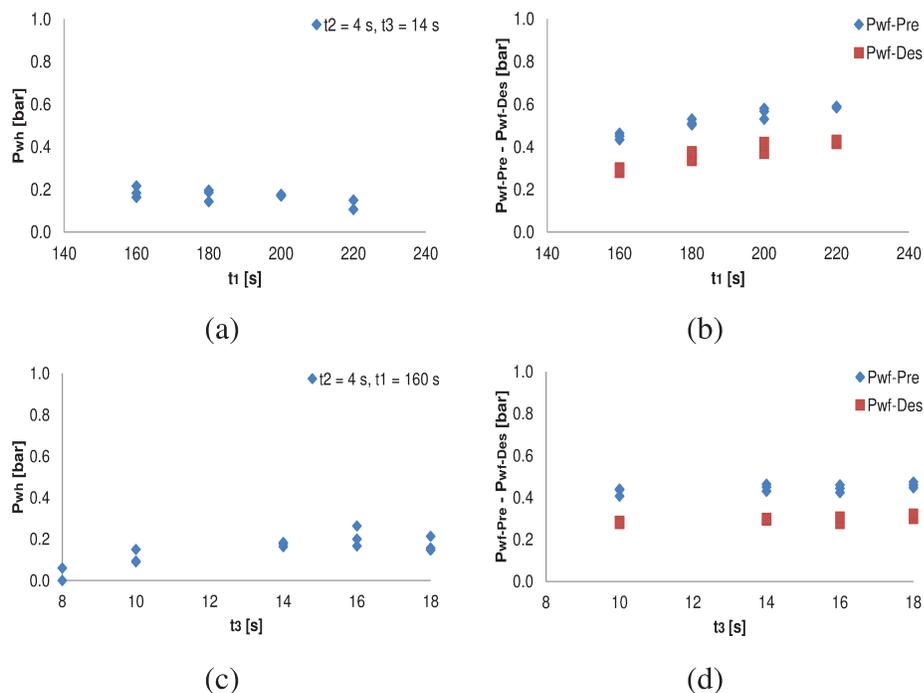


Figura 9.4: Influência de t_1 e t_4 na dinâmica do BPZ (modo 1)

9.2 Segundo modo de pressurização BPZ

Neste modo, a segunda pressurização acontece com as válvulas V1 e V2 abertas. Assim, maior tempo de injeção de gás é utilizado com relação ao primeiro modo. Este modo é utilizado quando a pressão utilizada no modo 1, não consegue fazer a elevação de forma eficiente.

9.2.1 Procedimento

- Ajustar a vazão em $39,3 \pm 6,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, a qual é medida registrando a pressão de fundo de poço no tempo para uma faixa de (0-0.3 bar), com a cabeça de poço aberta a atmosfera. A vazão permaneceu aproximadamente constante na faixa de P_{wf} ;
- Definir o tempo de depressurização inicial (t_0), o qual deve ser maior que o tempo de depressurização (t_1) dos seguintes ciclos, devido a que a coluna está inicialmente vazia;
- Definir o tempo de depressurização (t_1), tempo da primeira pressurização (t_2) e tempo da segunda pressurização (t_4);
- Regular a pressão de injeção constante em 1,5 bar;

- Abrir a válvula de alimentação de gás ;
- Abrir a válvula de alimentação da coluna, e dar início à operação quando o nível de líquido atinja uma altura especificada de 20 cm, a partir do transmissor de fundo de poço;
- Parar a operação depois de 7 ciclos de operação.

9.2.2 Análise dos resultados

A Figura 9.8 (a) apresenta o comportamento das principais pressões que caracterizam um ciclo de operação BPZ, operando no modo 2. As etapas de alimentação e primeira pressurização acontecem de forma semelhante ao modo 1. Na segunda pressurização abre-se V2, com V1 aberta, isso causa o aumento da pressão do anular interno (P_{ai}) até igualar P_{am} , devido à admissão de gás no anular interno. O gás escoa pelo anular interno, e desloca um volume de líquido do anular interno para a coluna interna e em seguida eleva a golfada. O momento em que a golfada de líquido atinge a superfície é identificado com o aumento da pressão da cabeça de poço (P_{wh}). Na despressurização, as válvulas V1 e V2 fecham e V3 abre, diminuindo todas as pressões; P_{wf} cai até P_{wf-des} , e a partir desse ponto, começa uma nova alimentação. Na figura 9.8 (b), se observa como se repete o ciclo.

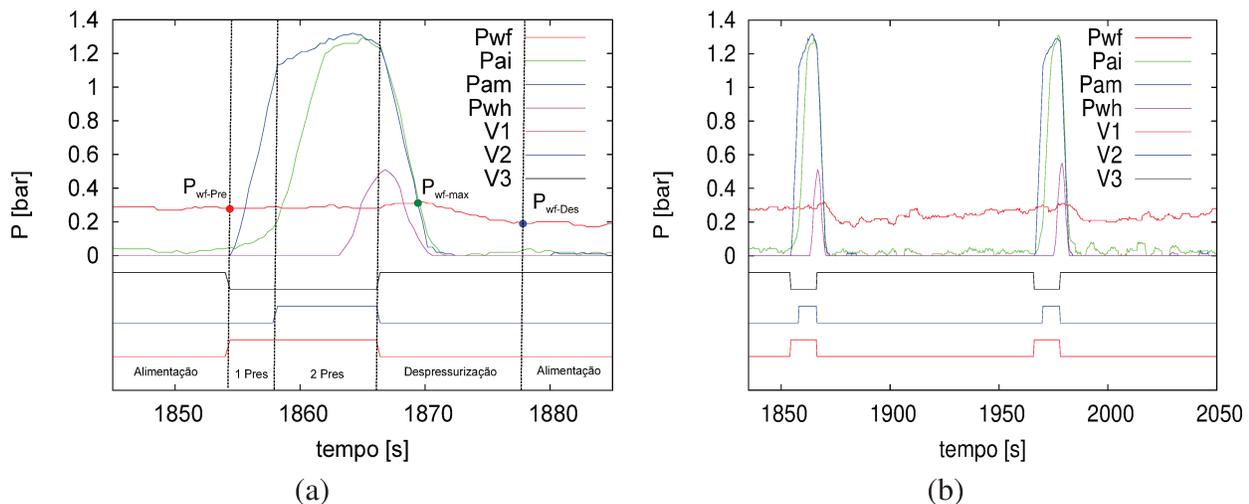


Figura 9.5: Dinâmica do BPZ modo 2, $t_1 = 100 s$, $t_2 = 4 s$, $t_4 = 8 s$

O comportamento de ciclos estáveis no modo 2, foi registrado para $t_1 = 100 s$, $t_2 = 4 s$, $t_4 = 8 s$. Com o aumento do tempo de despressurização $t_1 = 140 s$ (Figura 9.6 (b)), se observa o aumento de P_{wf} a cada ciclo sem atingir estabilidade nos 7 ciclos medidos, devido a que o volume alimentado pelo reservatório é maior que o volume produzido.

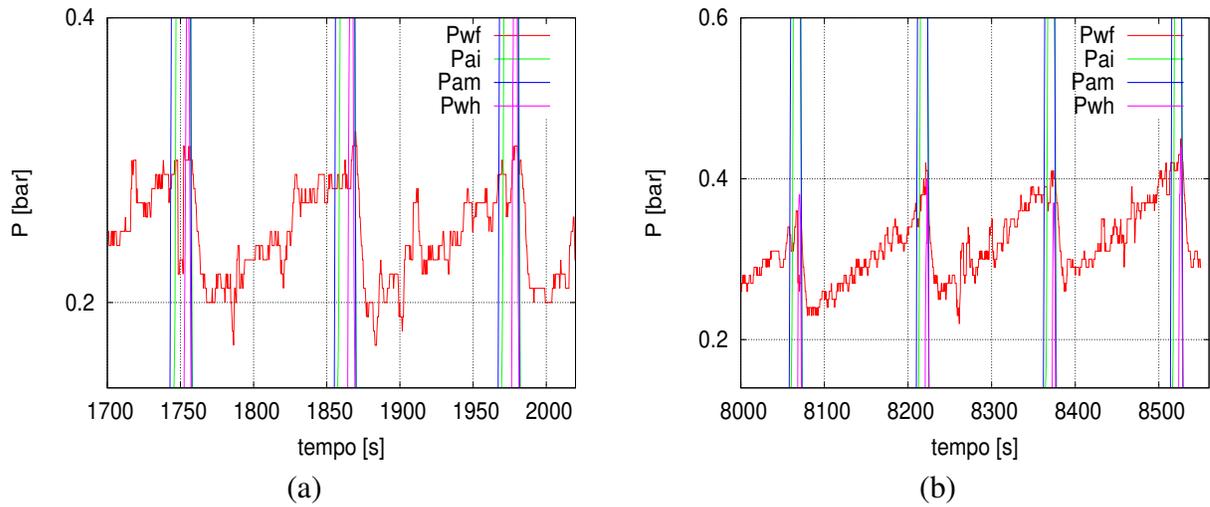


Figura 9.6: Estabilidade do BPZ modo 2

Com o aumento de $t_4 = 16\text{ s}$, para $t_1 = 120\text{ s}$, $t_2 = 4\text{ s}$, observam-se na Figura 9.7 dois picos de P_{wh} , o qual leva a pensar na produção de dois golfadas de líquido seguidas.

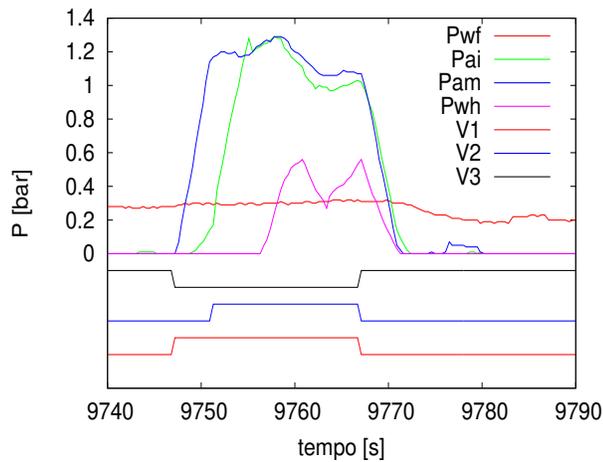


Figura 9.7: Comportamento das pressões para t_4 longos

A Figura 9.8 apresenta a influência do tempo de depressurização (t_1) e tempo da segunda pressurização (t_4) com a pressão de fundo de poço (P_{wf}) e de cabeça de poço (P_{wh}). A Figura 9.8 (a) mostra uma diminuição de P_{wh} com o aumento de t_1 , semelhante ao modo 1, o aumento de t_1 leva a maiores cargas de líquido na coluna para a mesma quantidade de gás injetado (Figura 9.8 (b)), o qual diminui a velocidade da golfada, tendendo a aumentar o *fallback*. Se observou que para

tempos de despressurização iguais ou menores a 80 s, o gás atinge a válvula de retenção superior (VRS), admitindo-se gás no anular interno, sendo uma operação inadequada do método de elevação (Santana *et al.*, 2005b).

Maiores tempos de segunda pressurização levaram ao aumento de P_{wh} até um ponto no qual P_{wh} tem tendência a permanecer constante. Nesse sentido, deve-se procurar o tempo t_4 que minimize o consumo de gás. É importante observar que, para o tempo $t_4 = 6$ s, P_{wh} diminuiu bastante, isto pode-se devido a que o tempo da golfada para atingir a superfície foi de aproximadamente 5 s desde a abertura de V2 (tempo medido em vários testes). Assim, se produz a descompressão antes ou no momento em que a golfada estava sendo produzida em superfície. Semelhante ao modo 1, o tempo da segunda pressurização deve estar sincronizado com o tempo que gasta a golfada para ser produzida.

O efeito de t_4 na pressão de fundo do poço parece ser insignificante como se mostra na Figura 9.8 (d), isso pode ser devido a que a segunda pressurização tem efeito sobre o anular interno e não sobre o anular intermediário no qual acontece a acumulação de líquido. Além disso, esse tempo é muito pequeno em relação com o tempo de alimentação.

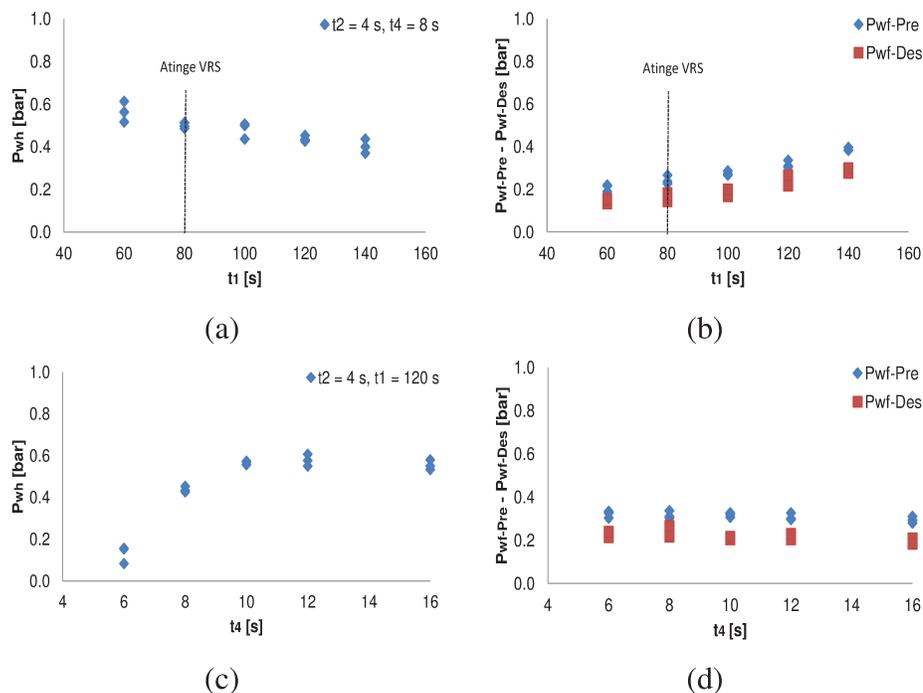


Figura 9.8: Influência de t_1 e t_4 na dinâmica do BPZ (modo 2)

9.3 Terceiro modo de pressurização BPZ

No terceiro modo, o anular interno e coluna interna são preenchidos completamente por líquido, enquanto o anular intermediário serve para acumulação de líquido, onde é despressurizado com a abertura de V3 para a alimentação de líquido e pressurizado com a abertura de V1 deslocando líquido que é produzido em superfície.

9.3.1 Procedimento

- Ajustar a vazão em $176,4 \pm 32,1 \text{ cm}^3/\text{s}$, a qual é medida registrando a pressão de fundo de poço no tempo para uma faixa de (0-0.3 bar), com a cabeça de poço aberta a atmosfera. A vazão permaneceu aproximadamente constante na faixa de P_{wf} ;
- Preencher o anular intermediário e a coluna interna completamente;
- Definir o tempo de despressurização¹⁷ (t1) e tempo de pressurização (t2);
- Regular a pressão de injeção constante em 1,5 bar;
- Abrir a válvula de alimentação de gás;
- Abrir a válvula de alimentação da coluna, e dar início à operação quando o nível de líquido atinja uma altura especificada;

9.3.2 Análise dos resultados

A Figura 9.9 (a), mostra o comportamento das pressões P_{wf} e P_{am} no tempo, assim como a atuação das válvulas V1 e V3 na sequência de compressão e despressurização. Observando-se P_{wf} no tempo, se pode acompanhar as etapas de alimentação e despressurização, notando-se que a alimentação acontece primeiro antes da pressurização (abertura de V1) em que o reservatório alimenta o anular externo e intermediário, depois uma segunda alimentação acontece durante a pressurização, em que é alimentado apenas o anular externo. Depois do término da pressurização (fecha-se V1), acontece a despressurização do anular intermediário, com o qual volume de líquido escoar do anular externo para o intermediário, observando-se com a diminuição de P_{wf} . Ao mesmo tempo, pode-se acompanhar a sequência do ciclo com a pressão P_{am} , aumentando com a pressurização (abre V1 e

¹⁷O tempo de despressurização é o tempo em que permanece V1 fechada e V3 aberta, no qual acontece a maior parte da alimentação de líquido

fecha V3) e diminuindo com a despressurização (fecha V1 e abre V3). Na figura 9.9 (b), se observa a estabilidade dos ciclos utilizando $t_1 = 40\text{ s}$ e $t_2 = 17\text{ s}$.

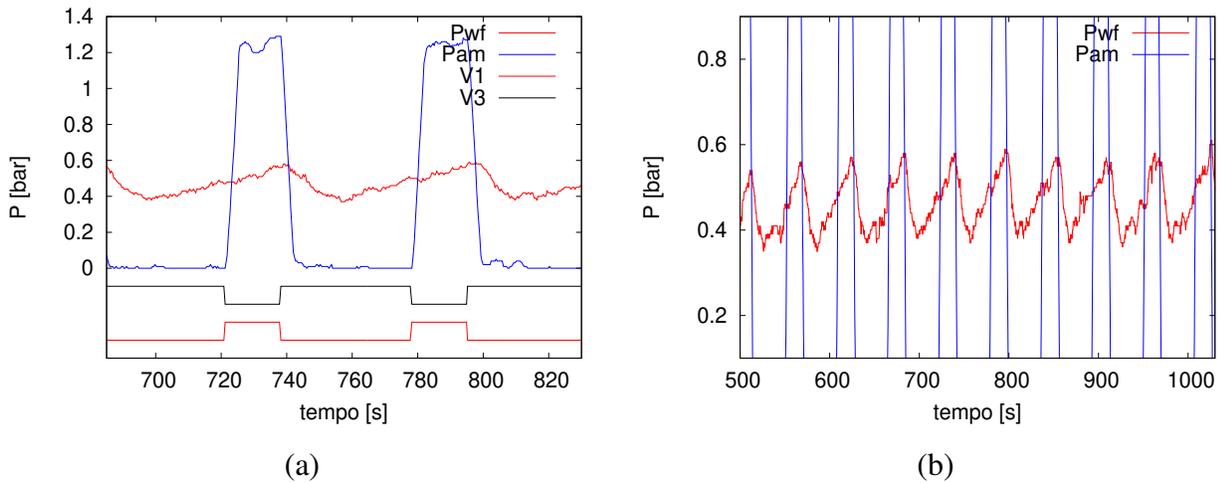


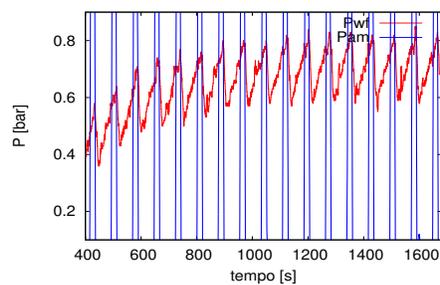
Figura 9.9: Dinâmica do BPZ modo 3

Com o aumento do tempo de despressurização $t_1 = 60\text{ s}$ (maior alimentação), o nível dinâmico do anular externo aumentou nos primeiros ciclos, até atingir a estabilidade (Figura 9.10 (a)), isto pode ser causado porque nos primeiros ciclos o volume produzido é menor que o alimentado, ficando parte de volume acumulado no anular externo, o que aumenta P_{wf} . Como a vazão de alimentação (q) é diretamente proporcional a $(P_R - P_{wf})$ (Equação 5.14), o aumento de P_{wf} causa a diminuição de q , assim o sistema encontra uma faixa de P_{wf} para o qual a vazão alimentada é igual à produzida.

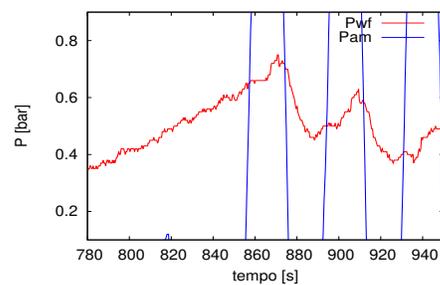
Com a diminuição do tempo de despressurização $t_1 = 20\text{ s}$, o nível dinâmico diminui no anular externo, devido a que o volume produzido é maior ao alimentado. Assim, continua-se diminuindo o nível até o gás injetado atingir a válvula de retenção superior (VRS), entrando gás no anular interno, o que representa um comportamento inadequado do método (Figura 9.10 (b)).

O aumento do tempo de pressurização $t_2 = 19\text{ s}$, levou à diminuição do nível dinâmico, efeito semelhante ao causado pela diminuição de t_1 , em quanto a diminuição de $t_2 = 12\text{ s}$, levou ao aumento do nível dinâmico, efeito semelhante ao causado pelo aumento de t_1 .

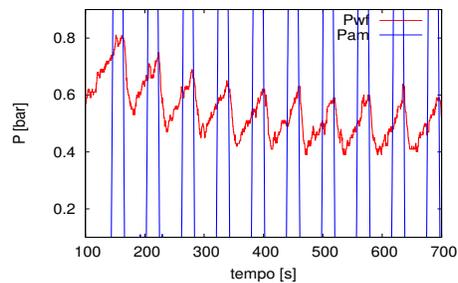
Pelo anterior, uma adequada operação do terceiro modo do BPZ, requer o conhecimento dos tempos de pressurização e despressurização que primeiro consigam a estabilidade dos ciclos, e segundo, minimizem o nível dinâmico, com o qual se esperam maiores vazões de líquido produzido.



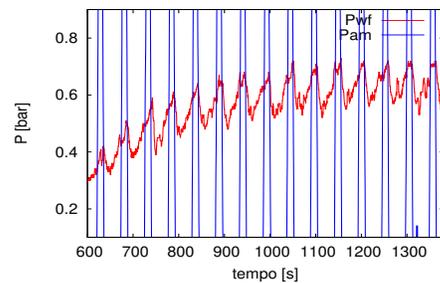
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9.10: Estabilidade dos ciclos para o terceiro modo de pressurização do BPZ, (a) tempo de alimentação longo, (b) tempo de alimentação curto, (c) tempo de injeção longo, (d) tempo de injeção curto.

Capítulo 10

Conclusões e recomendações

Foi projetado e construído um aparato para o estudo dos métodos de elevação *gas-lift* intermitente e bombeio pneumático Zadson. Os testes podem ser feitos no GLI com opção de 3 diâmetros de coluna de produção e 2 volumes de revestimento. Para o BPZ a configuração de 3 colunas concêntricas em acrílico permite visualizar a operação, com opção de se adaptar para a configuração de 2 colunas. O sistema de controle automatizado permite a execução de testes de longa duração, para a análise de vários ciclos seguidos, controlando as etapas do ciclo de operação e registrando as principais variáveis que influenciam os métodos e controlando a dinâmica das etapas do ciclo de operação.

10.1 Conclusões sobre o GLI

Os trabalhos mais recentes encontrados na literatura focam seus esforços no estudo de modelos mecanicistas, existindo poucos estudos experimentais para conferir conceitos formulados naqueles modelos. Nesse sentido, com a construção do simulador físico se pretende incentivar os estudos experimentais, em ordem, tanto de consolidar os conceitos referentes aos métodos de elevação, quanto de investigar aspectos relacionados aos modelos teóricos. Neste trabalho se sugerem alguns tópicos que podem ser objeto de estudo: produção de óleo no GLI, *fallback*, válvula operadora, velocidade da golfada e interface gás-líquido.

- Com a redução de escala tornou-se difícil manter todas as variáveis do modelo com base na análise dimensional. Assim, outro procedimento foi formulado empiricamente para o dimensionamento dos aparatos experimentais e o cálculo das principais variáveis que influenciam o GLI, baseados nos conceitos da mecânica dos fluidos, correlações e parâmetros utilizados em trabalhos anteriores.
- No aparato experimental do GLI, decidiu-se trabalhar com dois tanques que representem o

volume do revestimento em lugar de utilizar colunas de revestimento, devido à facilidade na instalação e controle do processo.

- A válvula operadora instalada consiste numa válvula solenóide e transmissores de pressão a jusante e montante. Ela segue a dinâmica do ciclo GLI, mediante as equações de abertura e fechamento, similar a uma válvula operadora de fole não compensada, mas não representa o comportamento de abertura e fechamento gradual apresentado em válvulas no campo. A abertura da válvula é instantânea e completa, assim como seu fechamento.
- O simulador físico do GLI tem a opção de simular uma variação das características geométricas e da pressão de domo da válvula operadora, com o objetivo de analisar esses parâmetros na dinâmica dos ciclos de operação.
- O aumento da pressão de injeção resultou em maiores percentagens de recuperação, devido à maior velocidade da golfada, que leva a pouca penetração do gás, diminuindo assim o *fallback*.
- O aumento do diâmetro da coluna leva à diminuição da **percentagem** de recuperação. Contudo, uma coluna de menor diâmetro consegue ter maior volume produzido apenas até uma determinada P_{co} , ponto máximo de produção. À partir desse ponto a coluna de maior diâmetro passa ter a maior produção em função de P_{co} .
- O aumento da pressão de fechamento para um ciclo levou à diminuição da percentagem de recuperação, devido ao menor volume de gás injetado na coluna. Para vários ciclos, deve-se avaliar o efeito sobre a injeção de gás.
- O aumento da carga de líquido (comprimento da golfada) resulta em aumento da percentagem de recuperação para um ciclo. No entanto, para cargas maiores, o tempo de alimentação aumenta, diminuindo o volume total de líquido produzido em vários ciclos, desta forma deve se procurar um ponto intermédio para obter o máximo volume total produzido.
- O comportamento do ciclo GLI no simulador físico, observado com base nas pressões de coluna e de revestimento, esteve de acordo com o comportamento teórico, tendo apenas uma alteração na descompressão do revestimento, que foi muito rápida, causada pela pequena profundidade do poço.

- Foi traçado um mapa de operação em função de t_c e t_{inj} , indicando a região onde se encontram ciclos estáveis e regiões de instabilidade que levam a problemas operacionais e até mesmo interrupção da produção. Realizando o procedimento para duas pressões de domo distintas se conseguiu distinguir que o aumento da pressão do domo translada a área de estabilidade à direita, ou seja, maiores tempos de ciclos são necessários para obterem-se ciclos estáveis. Com isto, pode-se desenhar o mapa operacional para o aparato experimental e selecionar a região de interesse a ser estudada.

10.2 Conclusões sobre o BPZ

- Encontra-se muita pouca informação disponível do bombeio pneumático Zadson na literatura. Sendo este um método de elevação artificial com vantagens atraentes como: poucos elementos móveis dentro do poço e sistema de válvulas de controle na superfície. Convertendo-o em um método competitivo com seus similares métodos de elevação intermitente, como o GLI.
- O projeto do poço modelo para BPZ foi baseado em relações geométricas e características operacionais, tomando como base as informações de um poço típico para BPZ com três colunas, utilizado em campo. É importante ressaltar o projeto da cauda, já que dela dependem os níveis de acumulação de líquido, que levam a um adequado funcionamento do método. Assim também de ressaltar o projeto das luvas, porque elas têm influência no escoamento, na estabilidade da coluna e na perda de carga.
- Para o sistema de injeção de gás se utilizaram 3 válvulas solenóide, programadas por tempos, segundo a sequência dos modos de pressurização.
- O simulador físico do BPZ permite operar nos três modos, de acordo com a especificação dos tempos de: despressurização, primeira pressurização, segunda pressurização (modo 1 e 2) e tempo de aproveitamento.
- Foi estudada a dinâmica do ciclo de operação BPZ, mediante a evolução das pressões (P_{wf} , P_{wh} , P_{am} , P_{ai}) ao longo das etapas do ciclo.
- Observou-se a estabilidade dos ciclos, na qual a pressão de fundo de poço se mantém oscilando entre P_{wf-max} e P_{wf-des} .

- Um estudo de sensibilidade mostrou para o primeiro e segundo modo, a diminuição de P_{wh} com o aumento de tempo de depressurização, devido a que o aumento do tempo de depressurização leva a maiores cargas de líquido na coluna para a mesma quantidade de gás injetado e, o aumento de P_{wh} com o aumento do tempo da segunda pressurização, até um ponto no qual P_{wh} tem tendência a permanecer constante. Neste sentido, deve-se procurar o tempo de segunda pressurização que minimize o consumo de gás.
- A diminuição do tempo de depressurização nos três modos pode levar ao ponto em que o gás atinge a válvula de retenção superior, entrando gás na coluna intermediária, operação inadequada do BPZ.
- O tempo da segunda pressurização para o primeiro e segundo modo, deve ser maior que o tempo que gasta a golfada em atingir a superfície. Do contrario, se diminui fortemente a pressão de cabeça do poço, e menor será o volume produzido por ciclo.
- No terceiro modo, com o aumento do tempo de depressurização (maior alimentação) ou diminuição do tempo de pressurização, o nível dinâmico do anular externo aumenta nos primeiros ciclos, até atingir a estabilidade. Devido a que, com o passar dos ciclos, se apresenta diminuição da vazão alimentada, com o aumento do nível dinâmico, até o ponto em que a vazão alimentada é igual à produzida.
- Uma adequada operação do terceiro modo do BPZ requer o conhecimento dos tempos de pressurização e depressurização que primeiro consigam a estabilidade dos ciclos, e segundo, minimizem o nível dinâmico, com o qual se esperam maiores vazões de líquido produzido.

10.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Sugere-se elaborar uma formulação de equacionamento adimensional com o qual se consiga traduzir os resultados obtidos no modelo para um poço em campo, e a execução de uma série de testes, com aquisição de dados para alimentar os simuladores computacionais presentes, com o propósito de validá-los e aprimorá-los.
- As válvulas de retenção superior e inferior da coluna BPZ são sensíveis a manutenção. Contudo, para ter acesso a elas, e poder trocá-las, só se consegue desmontando a coluna toda, o qual é um trabalho difícil e delicado. Assim, se recomenda uma modificação da estrutura

inferior da coluna, que possibilite acesso às válvulas e também sirva para realizar limpeza das colunas.

- Devido ao sistema da válvula operadora utilizada estar localizada a uma distância horizontal de aproximadamente 80 cm da coluna, esta seção de duto permanece ocupada por líquido, o que pode alterar o escoamento de gás no momento da injeção na coluna. Sugere-se fazer um estudo do efeito desta condição ou modificar a localização da válvula operadora, que deve estar conectada diretamente na coluna.
- A coluna BPZ foi construída em acrílico, com o objetivo de, em futuros estudos, se poder ser estudado os padrões de escoamento mediante filmagem.
- Este trabalho é uma primeira etapa dos estudos experimentais no departamento Engenharia de Petróleo da Unicamp para os métodos GLI e BPZ, na qual se deixa concluída a parte física básica (projeto e montagem do aparato de simulação) e operacional (implementação do sistema de aquisição e controle). Na sequência, deve-se incluir outros subsistemas acessórios para simular variações da pressão do reservatório e do índice de produtividade, e para medir o volume de líquido expelido no topo das colunas, bem como a quantidade de gás utilizada. Outras recomendações operacionais que surgiram durante a execução dos testes são:
 - Instalar uma válvula de precisão na alimentação de líquido para as colunas;
 - Mudar a localização do compressor, devido que no lugar que se encontra faz muito barulho, dificultando o trabalho;
 - Trocar a válvula reguladora de pressão localizada à jusante do tanque pulmão. A válvula utilizada apresentou variações de pressão com a variação de pressão no compressor, no sentido em que este tem uma regulagem para ligar e desligar;
 - Instalar um filtro na linha de água, especialmente por causa da coluna de BPZ, a qual se observou tornou encardida com a execução dos testes;
 - Trocar os transmissores de pressão com faixa de operação mais adequada, no sentido de melhorar a precisão na medida.
 - Trocar a válvula solenóide de descompressão da coluna BPZ, para uma normalmente fechada. A atualmente instalada, normalmente aberta, apresenta problemas de aquecimento.

Referências Bibliográficas

Engepet. 2012.

URL: <http://www.engepet.com.br/>

BRILL, J.P. e DOERR, T.C. An analytical description of liquid slug flow in small-diameter vertical conduits. **Journal of Petroleum Technology**, v. SPE 1526, 1967.

BROWN, K.E. **The technology of artificial lift methods, Chapter 3**, v. 2b. Penn Weel Books, 1980.

BROWN, K.E. e JESSEN, F.W. Evaluation of valve port size, surface choker and fluid fall-back in intermittent gas-lift instalation. **Journal of Petroleum Technology**, v. SPE 179, 1962.

BUCARAM, S.M. e PATTERSON, J.C. Managing artificial lift. **Society of Petroleum Engineers**, v. SPE 26212, 1994.

CARVALHO, Clodoaldo. **Produção de Petróleo por Elevação a Gás Intermitente: Simulação e Análise dos Métodos Convencional e Invertido**. 2004. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas.

CHACÍN, J.E. Selection of optimum intermittent lift scheme for gas lift wells. **Society of Petroleum Engineers**, v. SPE 27986, 1994.

ENGEPEP. **Manual BPZ**, Março 2003.

FOX, R.W.; PRITCHARD, P.J. e MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7 ed., 2012.

GOMEZ, Diego Alvim. **Análise do Escoamento Compressível de Gás natural em Espaços Anulares com Restrições para a Elevação de Petróleo**. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rio de Janeiro.

LABPETRO. Labpetro. 2013.

URL: <http://www.cepetro.unicamp.br/laboratorios/labpetro/>

- LIAO, T.; SCHIMIDT, Z. e DOTY, D.R. Investigation of intermittent gas lift by using mechanistic modeling. **Society of Petroleum Engineers**, v. SPE 29454, 1995.
- MACHADO, R T H. **Modelagem e Simulação Numérica do Mecanismo de Gás Lift Intermitente**. 1988. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto.
- NELLY, A.B.; MONTGOMERY, J.W. e VOGEL, J.V. A field test and analytical study of intermittent gas lift. **Society of Petroleum Engineers**, v. SPE 4538, 1973.
- SANTANA, P.L.; SANTOS, W.F. e ROCHA, W.F. Bpz pneumatic pumping: Process description, mathematical petroleum and simulation. In **5th International Seminar: Exploration and Production of Oil and Gas, Lima, Peru**. 2005a.
- SANTANA, P.L.; SILVA, A.S.; DE JESUS, J.M. e SANTOS, W.F. Modelagem matemática e desenvolvimento de software para simulação do método de elevação bpz. Relatório técnico, Universidade Federal de Sergipe, 2005b.
- SANTOS, O G. **Métodos Pneumáticos Intermitentes: análise e comparação**. 1997. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas.
- SANTOS, O.G.; BORDALO, S.N. e ALHANATI, F.J. Study of the dynamics, optimization and selection of intermittent gas-lift methods - a comprehensive model. **Petroleum Science & Engineering**, v. 32, 231–248, 2001.
- SCHIMIDT, Z.; DOTY, D.R.; LLOKONG, P.B.; FERNANDEZ, O.F. e BRILL, J.P. Hydrodynamic model for intermittent gas lifting of viscous oil. **Journal of Petroleum Technology**, v. SPE 10940, 1984.
- SOBOLEWSKI, R.N. Relatório de estudos especiais. Relatório técnico, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- STREET, J.R. e TEK, M.R. Dynamics of bullet shaped bubbles encountered in vertical gas liquid slug flow. **AIChE**, v. 11, 644, 1965.
- VELLOSO, N. **Elevação Pneumática "Gás Lift"**. Serviço de Recursos Humanos / Serec / Petrobras, Atualmente na biblioteca de Engenharia de Petróleo, 1992.
- WHITE, G.W. An analytical concept of the static and dynamic parameters of intermittent gas-lift. **Journal of Petroleum of Technology**, v. SPE 439, 1963.

Anexo I

Equipamento

Transmissores de pressão

A Tabela I.1 mostra as especificações dos transmissores de pressão.

Tabela I.1: Especificações dos transmissores de pressão

Parâmetro	Valor
Escala (bar, relativo)	0...10
Sobrepresão (bar, relativo)	20
Pressão de rotura (bar, relativo)	25
Precisão (% do V.F.E.)	≤ 0,25 típica; ≤ 0,5 máxima
Repetibilidade	≤ 0,25% do V.F.E.
Sinal de saída	4...20 mA

A calibração dos transmissores é mostrada na Figura I.1, onde se verifica que todos os transmissores com exceção do transmissor 3, estão corretamente calibrados segundo a equação $I(mA) = 1,6 * P(bar) + 4$, sendo $P(bar)$, pressão manométrica. Dessa forma, não se recomenda a utilização do transmissor 3.

Válvulas Solenóides

Foram utilizadas válvulas solenóide marca ASCO com as especificações da Tabela I.2.

Tabela I.2: Especificações das válvulas solenóide

Parâmetro	Ref. 8210 - 112	Ref. 8210D009
Conexão NPT	1/2"	3/4"
Orifício (mm)	16	19
KV	2,4	4,3
Tensão standart	C.C.(=): 12V – 24V, C.A.(~): 24V/ 60Hz – 120V/ 60Hz – 240V / 60Hz	
Operação	Normalmente Fechada (NF) ¹⁸	Normalmente Fechada (NF)

Bombas

A Tabela I.3 mostra as especificações das bombas do sistema reservatório.

Tabela I.3: Especificações dos transmissores de pressão

Bomba	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Potencia (HP)	Vazão (m^3/h)	RPM
P1	220/380	Trifásico de 60	3	2-10	3500
P2	220/380	Trifásico de 60	1,5	2-10	3500

Compressor

A Tabela I.4 mostra as especificações do compressor do sistema injeção de gás.

Tabela I.4: Especificações do compressor do sistema injeção de gás

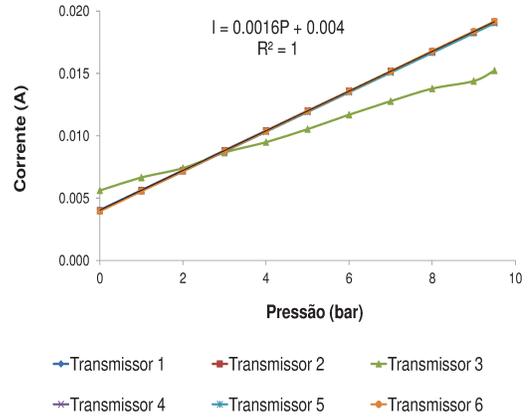
Compressor	CSI7.4/50
Deslocamento teórico	$5.4 \text{ pés}^3/\text{min}; 153 \text{ l/min}$
Pressão de operação	Mín: 6.9 bar; Max: 9.7 bar
Unidade compressora	No de Estágios: 1; No de pistões: 1
Motor	Potência 1.5 hp-1.12kW; Tensão(V): 110/220
RPM	2275

Válvula reguladora de pressão

Válvula reguladora de pressão de membrana com comando direto. Esta tem a função de manter a pressão constante. A pressão de trabalho é de 0-16 bar e dispõe de manômetro para a registro da pressão.



(a)



(b)

Figura I.1: Sistema de medição de pressão, (a) Transmissores de pressão, (b) Calibração dos transmissores de pressão

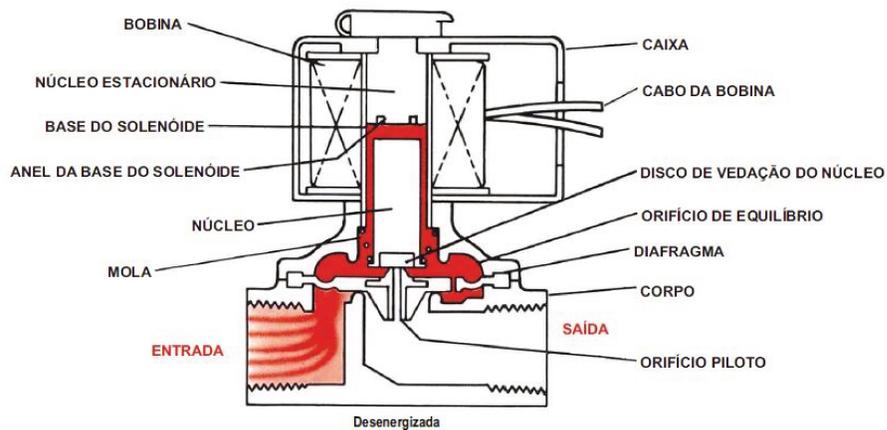


Figura I.2: Diagrama da válvula solenóide utilizada como válvula operadora e motora, tomada do manual Asco de válvula solenóide



Figura I.3: Bombas do subsistema poço-reservatório.



(a)



(b)

Figura I.4: Sistema de compressão de ar, (a) Compressor de Ar, (b) Válvula reguladora de pressão