

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Odair Geraldo
dos Santos e aprovada
pela comissão julgadora em 23/06/1997


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
como Requisito Parcial para à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

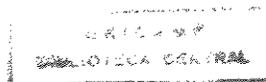
Métodos Pneumáticos Intermitentes : análise e comparação

Autor : Odair Geraldo dos Santos
Orientador: Sérgio Nascimento Bordalo
Co-orientador : Francisco José Soares Alhanati

Junho/97

7245677
Sa59m

32435/BC



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sa59m Santos, Odair Geraldo dos
Métodos pneumáticos intermitentes: análise e
comparação / Odair Geraldo dos Santos. --Campinas, SP:
[s.n.], 1997.

Orientadores: Sérgio Nascimento Bordalo, Francisco
José Soares Alhanati.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia do petróleo. 2. Escoamento. 3.
Petróleo - Extração. 4. Indústria petrolífera. I. Bordalo,
Sérgio Nascimento. II. Alhanati, Francisco José Soares.
III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	71/Unicamp
	59m
V	Ex
C. de inv.	32435
N.º	281/57
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	13/12/97
N.º CPD	

CM-00104138-B

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

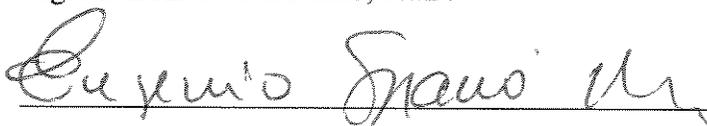
A dissertação “Métodos Pneumáticos Intermitentes : análise e comparação”, elaborada por Odair Geraldo dos Santos e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 23 de junho de 1997

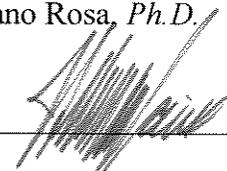
Banca Examinadora:



Sérgio Nascimento Bordalo, *Ph.D.*



Eugênio Spano Rosa, *Ph.D.*



José Alberto dos Reis Parise, *Ph.D.*

Agradecimentos

À PETROBRÁS, pelo apoio e suporte recebidos ; e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em particular ao Dr. Sérgio N. Bordalo e Dr. Francisco J.S. Alhanati, pelo apoio e orientação prestadas no decorrer do trabalho ; e, de modo carinhoso, ao Mestre e amigo, Attilio Alberto Triggia, cujas sugestões, em determinados momentos do trabalho, iluminaram o caminho a seguir.

E, de forma muito especial, à minha família - minha esposa Márcia e meus filhos Guilherme e Nayara, que, resignada mas sempre solidária, acompanhou-me neste empreendimento

Resumo

SANTOS, Odair Geraldo. *Métodos Pneumáticos Intermitentes: análise e comparação*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 246 p. Dissertação (Mestrado).

Regras práticas para a seleção entre os métodos pneumáticos contínuo e intermitente, baseadas na pressão estática e índice de produtividade do reservatório, estão disponíveis na literatura ; o que não ocorre, porém, para a seleção entre os diferentes métodos intermitentes de elevação já disponíveis. O objetivo do presente trabalho é produzir, para condições diversas de reservatório, um mapa de seleção entre quatro tipos de instalações intermitentes : *Gas Lift* Intermitente Convencional, *Gas Lift* Intermitente com Pistão, *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação e *Pig Lift*.

Este trabalho apresenta as vazões de óleo e gás, obtidas de simuladores computacionais, para um poço base com 1500 metros de profundidade, revestimento de 5 1/2" e uma coluna de 2 3/8", sujeito a vários valores de pressão estática e índice de produtividade. Estuda-se, também, a influência de alguns parâmetros, tais como: diâmetro da válvula de *gas lift* e comprimento da coluna de líquido, entre outros.

Os modelos utilizados nas simulações foram desenvolvidos tendo como base o modelo de Liao, que consiste de um conjunto de sistemas de equações diferenciais ordinárias temporais que governam os vários estágios do ciclo de produção. Cuidados foram tomados para gerar ciclos fechados para garantir que os efeitos do *fall-back* de líquido seriam considerados.

Os resultados mostram, em alguns casos, um inesperado melhor desempenho do método *Gas Lift* Intermitente Convencional. Observou-se que o impacto do *fall-back* não é tão adverso como mostrado por estudos anteriores, desde que parte do filme de líquido deixado para trás é incorporado à golfada de líquido no próximo ciclo e produzido na superfície; este efeito não pode ser identificado em experimentos ou simulações computacionais que reproduzam apenas um ciclo de produção, como aqueles encontrados na literatura.

Palavras Chave

- Engenharia de petróleo, Escoamento, Petróleo - Extração, Indústria petrolífera

Abstract

SANTOS, Odair Geraldo. *Métodos Pneumáticos Intermitentes: análise e comparação*.
Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas,
1997. 246 p. Dissertação (Mestrado).

Practical rules for the selection between continuous gas-lift (CGL) and intermittent gas-lift (IGL), based on the reservoir static pressure and productivity index, are available in the literature; however, almost no guidelines exist for the selection among different IGL designs. The goal of the present work is to close this gap by comparing the performances of four IGL designs, namely, conventional IGL, IGL with plunger, IGL with chamber, and the novel pig-lift, under diverse reservoir conditions; producing a map of suggested designs for each condition.

This paper presents the oil production and gas consumption obtained from computer simulations of the above IGL designs for a typical well, 1500m deep, with a 5 1/2 in casing and a 2 3/8 in tubing, subjected to various static pressures and productivity indexes; the influence of the values of operational parameters, such as valve port and slug size, are also studied for each design.

The mechanicist models employed in the simulations were developed upon Liao; they consist of the sets of time-dependent differential equations that govern the various phases of the process cycle. Special care was taken to generate fully closed cycles to guarantee that fall-back effects were properly taken in account.

The results show, in some cases, an unexpected better performance of the conventional IGL over the other designs. It is observed that the impact of the fall-back in the well production is not as adverse as claimed by previous studies, because part of the liquid film left behind by the gas bubble in one cycle may be caught by the liquid slug in the next cycle and driven out. This process cannot be identified in experiments or computations that reproduce only one IGL cycle.

Key Words

- Petroleum Engineering, Fluid Flow, Petroleum - Production, Petroleum Industry

Índice

FOLHA DE ROSTO	i
FOLHA DE APROVAÇÃO	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	4
1.2. Metodologia	4
1.3. Abrangência	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Geral	6
2.2. Método <i>Gas Lift</i> Intermitente Convencional	6
2.3. Método <i>Gas Lift</i> Intermitente com Pistão	8
2.4. Método <i>Gas Lift</i> Intermitente com Câmara de Acumulação	9
2.5. Método <i>Pig Lift</i>	11
3. MÉTODOS PNEUMÁTICOS INTERMITENTES	12
3.1. Método <i>Gas Lift</i> Intermitente Convencional (GLI)	13
3.2. Método <i>Gas Lift</i> Intermitente com Pistão (GLIP)	17
3.3. Método <i>Gas Lift</i> Intermitente com Câmara de Acumulação (GLIC)	20
3.4. Método <i>Pig Lift</i> (PL)	23

4. MODELOS MATEMÁTICOS	26
4.1. Modelo I : <i>Gas lift</i> Intermitente Convencional	28
4.2. Modelo II : <i>Gas lift</i> Intermitente Com pistão	65
4.3. Modelo III : <i>Gas lift</i> Intermitente com Câmara de Acumulação	75
4.4. Modelo IV : <i>Pig Lift</i>	97
5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	116
5.1. Solução dos modelos	116
5.2. Parâmetros : de poço e de projeto - valores simulados	127
5.3. Principais variáveis do sistema	130
5.4. Validação dos simuladores	143
6. GLI - CICLO DE PRODUÇÃO ESTABILIZADO	146
6.1. O modelo para os ciclos subsequentes de produção	150
7. PARÂMETROS DE PROJETO - INFLUÊNCIA	156
7.1. Método : <i>Gas Lift</i> Intermitente convencional	156
7.2. Método : <i>Gas Lift</i> Intermitente com Câmara	176
7.3. Método : <i>Gas lift</i> intermitente com pistão	181
7.4. Método : <i>Pig Lift</i>	188
8. MÉTODO DE ELEVAÇÃO DE MELHOR DESEMPENHO	190
8.1. Condições operacionais	191
8.2. Vazão de líquido e gás	192
8.3. Ponto ótimo de operação : critério econômico.	195
8.4. O método <i>Gas Lift</i> Contínuo	203
8.5. Definindo o método de elevação para o poço base.	204
8.6. Análise tradicional	205
8.7. Estendendo a análise para outros valores de IP e PE	207

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	216
9.1. Conclusões	217
9.2. Recomendações	221
NOMENCLATURA	223
BIBLIOGRAFIA	228
APÊNDICE A : Vazão do filme de líquido para o fundo do poço	230
APÊNDICE B : Componente de fricção numa seção anular	235
APÊNDICE C : Relação entre o volume de gás para abrir a válvula de gas lift e o volume de gás de referência	237
APÊNDICE D : Procedimentos operacionais para o estágio de descompressão do método Pig Lift	241
APÊNDICE E : Pressão de uma coluna estática de gás	242
APÊNDICE F : Correlações empíricas	244

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Método Gas Lift Intermitente Convencional.	13
Figura 3.2 - Estágio de Elevação do método Gas Lift Intermitente Convencional.	14
Figura 3.3 - Estágio de Produção da Golfada no método Gas Lift Intermitente Convencional	15
Figura 3.4 - Estágio de Descompressão no método Gas Lift Intermitente Convencional.	15
Figura 3.5 - Estágio de Alimentação do método Gas Lift Intermitente Convencional.	16
Figura 3.6 - Método Gas Lift Intermitente com Pistão.	17
Figura 3.7 - Estágio de Elevação do método Gas Lift Intermitente com Pistão.	17
Figura 3.8 - Estágio de Produção da Golfada do método Gas Lift Intermitente com Pistão	18
Figura 3.9 - Estágio de Descompressão do método Gas Lift Intermitente com Pistão	19
Figura 3.10 - Estágio de Alimentação do método Gas Lift Intermitente com Pistão	19
Figura 3.11 - Método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.	20
Figura 3.12 - Estágio de Transferência do método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.	20
Figura 3.13 - Estágio de Elevação do método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.	21
Figura 3.14 - Estágio de Produção da Golfada do método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.	21
Figura 3.15 - Estágio de Descompressão do método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.	22
Figura 3.16 - Estágio de Alimentação do método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.	22
Figura 3.17 - Método Pig Lift.	23
Figura 3.18 - Estágio de Transferência do método Pig Lift.	23
Figura 3.19 - Estágio de Elevação do método Pig Lift..	24

Figura 3.20 - Estágio de Produção da Golfada do método Pig Lift.	24
Figura 3.21 - Estágio de Descompressão do método Pig Lift.	25
Figura 3.22 - Estágio de Alimentação do método Pig Lift.	25
Figura 4.1 - Método GLI : espaço anular coluna revestimento de produção	30
Figura 4.2 - Método GLI : bolha de gás na coluna de produção no estágio de elevação	36
Figura 4.3 - Método GLI : filme de líquido no estágio de elevação	38
Figura 4.4 - Método GLI : golfada de líquido no estágio de elevação	40
Figura 4.5 - Método GLI : filme de líquido no estágio de descompressão - fase I	47
Figura 4.6 - Método GLI : coluna de gás no estágio de descompressão - fase I	50
Figura 4.7 - Método GLI : filme de líquido no estágio de descompressão - fase II	52
Figura 4.8 - Método GLI : coluna de gás no estágio de descompressão - fase II	54
Figura 4.9 - Método GLI : coluna de líquido no estágio de descompressão - fase II	56
Figura 4.10 - Método GLI : coluna de líquido no estágio de descompressão - fase III	58
Figura 4.11 - Método GLI : coluna de líquido no estágio de descompressão - fase III	61
Figura 4.12 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método <i>Gas Lift</i> Intermitente Convencional - (GLI)	64
Figura 4.13 - Método GLIP : coluna de líquido no estágio de elevação	68
Figura 4.14 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método <i>Gas Lift</i> Intermitente com Pistão - (GLIP)	74
Figura 4.15 - Método GLIC : coluna de gás no estágio de transferência	77
Figura 4.16 - Método GLIC : coluna de líquido no estágio de transferência	79
Figura 4.17 - Método GLIC : coluna de líquido, no espaço anular da câmara, no estágio de transferência	80
Figura 4.18 - Método GLI : coluna de líquido, na coluna de produção, no estágio de transferência	82

Figura 4.19 - Método GLI : coluna de gás no estágio de elevação da golfada	85
Figura 4.20 - Método GLIC : coluna de gás no estágio de descompressão - fase I	89
Figura 4.21 - Método GLIC : coluna de líquido no estágio de descompressão - fase II	92
Figura 4.22 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método <i>Gas Lift</i> Intermitente com Câmara de Acumulação - (GLIC)	96
Figura 4.23 - Método PL : coluna de gás no estágio de transferência	98
Figura 4.24 - Método PL : coluna de líquido no estágio de transferência	99
Figura 4.25 - Método PL : coluna de líquido, na coluna de injeção, no estágio de transferência	100
Figura 4.26 - Método PL : coluna de líquido, na coluna de produção, no estágio de transferência	101
Figura 4.27 - Método PL : coluna de gás no estágio de elevação	104
Figura 4.28 - Método PL : coluna de gás no estágio de descompressão	111
Figura 4.29 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método Pig Lift - (PL)	115
Figura 5.1 - Pressão do gás na superfície (P_{e1}) para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}	132
Figura 5.2- Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}) para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}	132
Figura 5.3- Posição do topo (h_1) e da base da golfada (h_B) para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}	133
Figura 5.4- Velocidades da bolha de gás (v_B) e da golfada de líquido (v_l) para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}	133
Figura 5.5 - Pressão do gás na superfície (P_{e1}), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}	135
Figura 5.6- Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}	135
Figura 5.7- Posição do topo (h_1) e da base da golfada (h_B), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}	136

Figura 5.8-	Velocidades da bolha de gás (v_B) e da golfada de líquido (v_l) para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}	136
Figura 5.9 -	Pressão do gás na superfície (P_{c1}), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {10,80}	138
Figura 5.10-	Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {50,70,80}	138
Figura 5.11-	Posição do topo (h_t) e da base da golfada (h_B), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {50,70,80}	139
Figura 5.12-	Velocidades da bolha de gás (v_B) e da golfada de líquido (v_l) para o método GLIC - poço base e ponto operacional {50,70,80}	139
Figura 5.13 -	Pressão do gás na superfície (P_{c1}), para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}	141
Figura 5.14-	Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}	141
Figura 5.15-	Posição do topo (h_t) e da base da golfada (h_B), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {25}	142
Figura 5.16-	Velocidades da bolha de gás (v_B) e da golfada de líquido (v_l) para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}	142
Figura 6.1 -	Volume produzido, na superfície e pelo reservatório, no primeiro ciclo de produção do método <i>GLI</i> - poço base, sede ½ “, $V_{gi} = V_{gr}$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$	147
Figura 6.2 -	Modelo sem filme de líquido : ciclo estabilizado com e sem fall-back	148
Figura 6.3 -	Modelo com filme de líquido : primeiro ciclo e ciclo estabilizado.	148
Figura 6.4 -	Razão entre o volume de líquido produzido na superfície (V_{ls}) e o volume de líquido alimentado pelo reservatório (V_{lres}), em função da recuperação de líquido por ciclo, para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “ e $V_{gi} = V_{gv}$.	149
Figura 6.5 -	Estágio de elevação do segundo ciclo de produção do método Gas Lift Intermitente Convencional : balanço de massa na golfada de líquido.	150
Figura 6.6 -	Estágio de elevação do segundo ciclo de produção do método Gas Lift Intermitente Convencional: balanço de massa no filme de líquido	152

Figura 6.7 - Produção de líquido para vários ciclos de produção do método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “ e ponto operacional {30,70,50}.	153
Figura 6.8 - Fall back de líquido para os primeiros cinco ciclos de produção do método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “ e ponto operacional {30,70,50}.	155
Figura 6.9 - Espessura do filme de líquido para os primeiros cinco ciclos de produção do método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “ e ponto operacional {30,70,50}	155
Figura 7.1 - Volume de líquido produzido por ciclo, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$	158
Figura 7.2 - Tempo de elevação da golfada, em função do do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$	160
Figura 7.3 - Tempo de fechamento da válvula de gas lift, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.	160
Figura 7.4 - Tempo decorrido, até o final de cada estágio do ciclo de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional, tendo-se como referência o instante de abertura da válvula de gas lift - poço base, sede ½ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.	162
Figura 7.5 - Vazão de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.	163
Figura 7.6 - Volume produzido por ciclo, para diâmetros de sede de 1/4, 3/8, 1/2 e 3/4 in, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.	165
Figura 7.7 - Relação entre o volume de gás necessário para abrir a válvula de gas lift (V_{gv}) e o volume de gás de referência (V_{gr}), para o método Gas Lift Intermitente Convencional, em função da relação P_{to}/P_{vo} - poço base.	166
Figura 7.8 - Volume produzido por ciclo em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o Gas Lift Intermitente Convencional, considerando-se o limite mínimo de injeção de gás e tendo como parâmetro a sede da válvula de gas lift - poço base, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.	167
Figura 7.9 - Vazão de produção em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intermitente Convencional, tendo como parâmetro a sede da válvula de gas lift - poço base, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.	168

Figura 7.10 - Fall back de líquido em função do adimensional L/H, para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “ e $V_{gi} = V_{gv}$.	170
Figura 7.11 - Tempo de ciclo em função do adimensional L/H, para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “ e $V_{gi} = V_{gv}$.	171
Figura 7.12 - Vazão de produção em função do comprimento inicial da golfada de líquido, para o método Gas Lift Intermitente Convencional, tendo como parâmetro a relação Pto/Pvo - poço base, sede ½ “ e $V_{gi} = V_{gv}$.	171
Figura 7.13 - Volume produzido por ciclo em função da relação Pto/Pvo, para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e $V_{gi} = V_{gv}$.	174
Figura 7.14 - Tempo de ciclo em função da relação Pto/Pvo - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e $V_{gi} = V_{gv}$.	175
Figura 7.15 - Vazão de produção em função da relação Pto/Pvo, para o método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e $V_{gi} = V_{gv}$.	176
Figura 7.16 - Relação entre o volume de gás necessário para abrir a válvula de gas lift (V_{gv}) e o volume de gás de referência (V_{gr}), para o método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação, em função do comprimento da câmara - poço base, $phpe = 60$.	178
Figura 7.17- Volume de líquido produzido por ciclo, para o Gas Lift Intermitente com Câmara, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} - poço base, válvula piloto com sedes de 5/16 “ e 9/16 “ e L/H = 0,5.	179
Figura 7.18 - Fall back de líquido, durante o ciclo de produção, em função do adimensional L/H, para o método Gas Lift Intermitente com Câmara - poço base, válvula piloto com sedes de 5/16 “ e 9/16 “ e $V_{gi}/V_{gr} = 0,7$.	180
Figura 7.19 - Vazão de produção, em função do do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Gas Lift Intemitente com Câmara - poço base, válvula piloto com sedes 5/16 “ e 9/16 ” e L/H = 0,10.	181
Figura 7.20 - Volume de líquido produzido por ciclo, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	182
Figura 7.21 - Tempo de ciclo, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	183
Figura 7.22- Tempo decorrido até o final de cada estágio do ciclo de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão, tendo como referência o instante de abertura da válvula de gas lift - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	184

Figura 7.23 - Tempo de duração do estágio de elevação para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	185
Figura 7.24 - Tempo de duração do estágio de produção para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	185
Figura 7.25 - Tempo de duração do estágio de descompressão para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	186
Figura 7.26 - Tempo de duração do estágio de alimentação para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	186
Figura 7.27 - Vazão de líquido, em função do adimensional Vgi/Vgr, para o método Intermitente com Pistão - poço base, sede ½ “, L/H = 0,5 e Pto/Pvo = 0,7.	187
Figura 7.28 - Tempo de ciclo, em função do adimensional L/H, para o método Pig Lift - poço base.	189
Figura 7.29 - Vazão de líquido, em função do adimensional L/H, para o método Pig Lift - poço base.	189
Figura 8.1- Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2”.	193
Figura 8.2 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método Gas Lift Intemitente com Pistão - poço base, sede 1/2”.	194
Figura 8.3 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método Intermitente com Câmara - poço base e válvula piloto com sedes 5/16" de 9/16”.	194
Figura 8.4- Vazão de líquido, em função do volume da vazão de gás, para os pontos operacionais do método Pig Lift - poço base.	195
Figura 8.5- Vazão de líquido e gás, no primeiro ciclo de produção, para os 5 pontos operacionais mais econômicos de cada método - poço base.	198
Figura 8.6 - Altura da coluna de líquido - h_1 , durante o estágio de descompressão, no primeiro ciclo de produção do ponto operacional {30, 70, 41}.	199
Figura 8.7 - Altura da coluna de líquido - h_1 , durante o estágio de descompressão, no segundo ciclo de produção do ponto operacional {30,70,41}.	199

Figura 8.8 - Altura da coluna de líquido - h_l , durante o estágio de descompressão, no terceiro ciclo de produção do ponto operacional {30,70,41}.	200
Figura 8.9 - Vazão de líquido, para o Gas Lift Intermitente Convencional, com base nos volumes alimentado pelo reservatório e produzido na superfície, com as respectivas curvas de ajuste - poço base, sede 1/2 " e ponto operacional {30,70,50}.	203
Figura 8.10 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para o método Gas Lift Contínuo - poço base.	204
Figura 8.11 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 28,4 kgf/cm ² (phpe = 20).	211
Figura 8.12 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 56,8 kgf/cm ² (phpe = 40).	212
Figura 8.13 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 85,2 kgf/cm ² (phpe = 60).	213
Figura 8.14 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 113.6 kgf/cm ² (phpe = 80).	214
Figura 8.15 - Mapa de seleção entre os métodos pneumáticos intermitentes para poços com características semelhantes ao poço base	215

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Faixas de PE e IP para critério de emprego da elevação pneumática contínua ou intermitente	02
Tabela 1.2 - Critérios de classificação da pressão estática (PE) e índice de produtividade (IP)	02
Tabela 4.1 - Estágios do ciclo de produção para o método intermitente convencional	29
Tabela 4.2 - Valores do coeficiente a	45
Tabela 4.3 - Estágios do ciclo de produção para o método Intermitente com Câmara de Acumulação	75
Tabela 4.4 - Estágios do ciclo de produção para o método Pig Lift	97
Tabela 5.1 - Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método GLI	117
Tabela 5.2 - Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método GLIP	121
Tabela 5.3 - Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método GLIC	123
Tabela 5.4 - Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método Pig Lift	125
Tabela 5.5 - Características do poço base	129
Tabela 5.6 - Estágios do ciclo de produção para o método GLI	131
Tabela 5.7 - Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.1 a 5.4	131
Tabela 5.8 - Estágios do ciclo de produção para o método GLIP	134
Tabela 5.9 - Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.1 a 5.4	134
Tabela 5.10 - Estágios do ciclo de produção para o método GLIC	137
Tabela 5.11 - Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.9 a 5.12	137
Tabela 5.12 - Estágios do ciclo de produção para o método Pig Lift	140
Tabela 5.13 - Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.1 a 5.4	140

Tabela 5.14 - Comparação entre os resultados deste simulador com os dados obtidos por Liao em seu poço exemplo	143
Tabela 5.15 - Dados operacionais do poço exemplo para o Pig Lift	144
Tabela 5.16 - Dados do simulador Pig Lift e obtidos do poço	145
Tabela 8.1 - Faixa de variação dos parâmetros de projeto para o poço base.	191
Tabela 8.2 - Vazão de líquido e gás, no primeiro ciclo de produção, para os 5 pontos operacionais mais econômicos de cada método.	197
Tabela 8.3 - Composição da coluna de líquido, durante os estágios de decompressão e alimentação, para os primeiros ciclos do Gas Lift Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2 " e ponto operacional {30,70,41}.	201
Tabela 8.4 - Composição da coluna de líquido, durante os estágios de decompressão e alimentação, para os primeiros ciclos do Gas Lift Intermitente Convencional - (poço base, sede 1/2 " e ponto operacional {30,70,50}).	201
Tabela 8.5 - Vazão de líquido e de gás, no Gas Lift Intermitente Convencional, para os ciclos de produção do ponto operacional {30,70,50} - poço base, sede 1/2 ".	202
Tabela 8.6 - Classificação dos métodos intermitentes de elevação tendo como base o critério econômico - poço base ; $IP = 1.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e $PE = 85.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (PHPE = 60).	204
Tabela 8.7 - Classificação dos métodos intermitentes de elevação tendo como base o critério econômico e o volume produzido na superfície no primeiro ciclo para o cálculo da vazão de produção - poço base ; $IP = 1.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e $PE = 85.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (PHPE = 60)	206
Tabela 8.8 - Classificação dos métodos intermitentes de elevação tendo como base o critério de vazão máxima calculada pelo volume produzido na superfície no primeiro ciclo - poço base ; $IP = 1.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e $PE = 85.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (PHPE = 60).	206
Tabela 8.9 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ; $IP = 0,25 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$.	209
Tabela 8.10 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ; $IP = 0,50 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$.	209
Tabela 8.11 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ; $IP = 1,00 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$.	210
Tabela 8.12 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ; $IP = 2,00 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$.	210

1. Introdução

A denominação método pneumático de elevação artificial, ou, simplesmente, elevação pneumática (*gas lift* - GL)^{*}, designa, neste trabalho, os métodos que empregam a injeção de gás como fonte externa de energia para a elevação de óleo, num poço de petróleo, do reservatório à superfície. Em função da temporização da injeção do gás estes métodos são classificados como contínuos ou intermitentes.

No método *Gas Lift* Contínuo (GLC) gás é injetado continuamente, em um determinado ponto da coluna de produção, com a finalidade de diminuir a densidade média dos fluidos produzidos e, conseqüentemente, a pressão de fundo requerida pelo sistema de produção; aplica-se, em geral, no início da fase produtiva do poço. Devido à contínua depleção do reservatório, porém, a pressão estática decai para um valor a partir do qual a injeção contínua de gás torna-se ineficiente para elevar o fluido produzido até a superfície. Nesta condição a injeção de gás intermitente (GLI), em intervalos regulares, pode ser a melhor alternativa.

Veloso⁽¹⁾ sugere a adoção das faixas de pressão estática (PE) e índice de produtividade (IP) apresentadas na tabela 1.1 como critério de seleção entre os métodos contínuo e intermitente.

* A terminologia inglesa *gas lift* será mantida no texto por sua ampla disseminação como jargão na indústria petrolífera, assim como as abreviaturas GL, GLC, GLI etc.

Tabela 1.1- Faixas de PE e IP para critério de emprego da elevação pneumática contínua ou intermitente.

	IP ALTO	IP MEDIO	IP BAIXO
PE ALTA	Contínua	Contínua Intermitente	Intermitente
PE MEDIA	Contínua Intermitente	Contínua Intermitente	Intermitente
PE BAIXA	Intermitente	Intermitente	Intermitente

Segundo os critérios da Tabela 1.1 o poço deve ser equipado para *Gas Lift* Intermitente sempre que um dos dois parâmetros, índice de produtividade ou pressão estática, for classificado como baixo; enquanto que o poço deve ser equipado para *Gas Lift* Contínuo somente se estes dois parâmetros forem classificados como altos. Veloso⁽¹⁾ sugere a adoção dos critérios da Tabela 1.2 para classificar os dois parâmetros - PE e IP.

Tabela 1.2 - Critérios de classificação da pressão estática (PE) e índice de produtividade (IP).

	PE	IP
ALTO	Se suficiente para suportar uma coluna de fluido igual ou superior a 70% da profundidade total do poço.	Se maior que 2.26 m ³ /d/kgf/cm ²
MEDIO	Se suficiente para suportar uma coluna de fluido entre 40 e 70% da profundidade total do poço.	Se entre 0.68 e 2.26 m ³ /d/kgf/cm ²
BAIXO	Se suficiente para suportar uma coluna de fluido inferior a 40% da profundidade total do poço.	Se menor que 0.68 m ³ /d/kgf/cm ²

O critério para a pressão estática pode ser melhor entendido a partir do adimensional $PePh$, definido aqui como a razão entre a pressão estática do poço (PE) e a pressão hidrostática devida à coluna de fluido calculada na profundidade da pressão estática. Ou seja,

$$PePh = \frac{PE}{\rho_l g Z_{est}} \quad (1.1)$$

onde,

PE : Pressão estática do poço, Pa

ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

g : Aceleração da gravidade, m/s^2

z_{est} : Profundidade da pressão estática, m

Para o método *Gas Lift* Contínuo apenas pequenas variações existem no esquema de projeto da instalação convencional. Para os métodos intermitentes, porém, quatro opções podem ser encontradas na literatura, conforme abaixo relacionadas:

1. *Gas Lift* Intermitente Convencional
2. *Gas Lift* Intermitente com Pistão
3. *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação
4. *Pig Lift*

Um quinto método intermitente, denominado *Plunger Lift* Convencional, não será abordado neste trabalho, devido à seguinte característica: utiliza principalmente o gás da formação como fonte de energia para elevação da golfada de líquido.

Coloca-se, portanto, a seguinte questão: uma vez definido que se empregará um método intermitente na produção como selecionar, dentre as quatro instalações possíveis, a que melhor se aplica ao poço a ser equipado?

Não se conhece, até o momento, critérios objetivos para seleção do melhor tipo de instalação pneumática intermitente para um poço produtor de óleo. Apenas diretrizes básicas, normalmente bastante gerais, apontam o campo de aplicação de um determinado método. Sabe-se, por exemplo, que o método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação aplica-se bem a poços com pressão estática baixa e índice de produtividade alto. Porém fica ainda a seguinte questão: o que é PE baixa e IP alto para instalação com câmara de acumulação? E os demais parâmetros, como profundidade, configuração da coluna e revestimento de produção, como interferem na escolha da instalação?

1.1. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é produzir, para condições diversas de reservatório, um mapa de seleção entre os quatro tipos de instalações intermitentes : *Gas Lift* Intermitente Convencional, *Gas Lift* Intermitente com Pistão, *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação e *Pig Lift*.

1.2. Metodologia

A comparação entre métodos de produção pode ser realizada diretamente, através de testes experimentais, ou indiretamente, através de simuladores que representem o comportamento do sistema. Optou-se pela comparação através de simuladores computacionais porque não seria possível, no tempo alocado, implementar o trabalho experimental com a abrangência que se pretende dar a este estudo. Os simuladores disponíveis não tratam, entretanto, de todos os casos incluídos neste trabalho; além disso, o simulador existente para um certo caso é implementado internamente de forma diferente do simulador existente para um outro. Decidiu-se, por esta razão, desenvolver simuladores próprios, de forma a tratar os vários casos da maneira mais uniforme e consistente possível. A sequência abaixo resume a metodologia empregada :

- 1) desenvolvimento dos simuladores;
- 2) análise da influência dos parâmetros de projeto;
- 3) dimensionamento de cada método de elevação;
- 4) análise e comparação dos resultados;
- 5) estabelecimento das faixas de aplicação de cada método.

1.3. Abrangência

A proposta inicial deste trabalho presumia o aproveitamento de simuladores já existentes, o que permitiria um tempo de dedicação maior para a parte de levantamento e análise dos dados. Assim, para se obter resultados mais genéricos propôs-se, inicialmente, trabalhar com poços com 2 diâmetros de revestimento (5 ½ in e 7 in) ; com 2 diâmetros de coluna de produção (2 3/8 in e 2/78 in) ; com 5 valores de profundidade (entre 500 e 3000 metros) ; com três valores de BSW (0, 50 e 100) ; com quatro valores de pressão estática (correspondentes a PePh de 20, 40, 60 e 80) ; e, finalmente, com quatro valores de índice de produtividade (0,25; 0,50; 1,00 e 2,00). A necessidade de desenvolver os simuladores em tempo hábil alterou, porém, o encaminhamento do trabalho; grande parte do tempo disponível teve de ser utilizado nesta atividade. Com isto a abrangência que se pretendia dar inicialmente ficou reduzida. As análises restringiram-se a uma única configuração de poço (fixou-se o diâmetro do revestimento e da coluna, a profundidade do poço e o BSW). Com o intuito de se obter um resultado de interesse geral selecionou-se uma configuração de poço “média”, i.e., representativa de um grande número de casos práticos. Manteve-se, contudo, a proposta de variar a pressão estática e o índice de produtividade do poço.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Geral

Chacín ⁽²⁾ (1994) discute o estado da arte atual para modelagem e projeto dos métodos pneumáticos intermitentes, para instalações tipo convencional, com pistão e com câmara de acumulação. Apresenta um modelo bastante simplificado para cálculo da vazão de produção - estima o *fall back* de líquido e considera apenas o estágio de alimentação para cálculo do tempo de ciclo, do qual faz uso para construir curvas de desempenho (produção de líquido versus vazão de gás injetado) para os três tipos de instalação. A partir das curvas de desempenho obtidas escolhe-se o melhor tipo de instalação, considerando como tal aquele que leva à maior produção de óleo com o menor volume de gás injetado.

Tópicos para pesquisa são identificados e sugeridos nas áreas de modelagem (ajuste e validação de campo, assim como simplificação dos modelos existentes), nos critérios de projeto (definir se, quando e quanto de pós-fluxo otimizaria a elevação), *fall back* e dimensionamento correto de pistões.

2.2. Método *Gas Lift* Intermitente Convencional

Brown e Jessen ⁽³⁾ (1962) fizeram, a partir de um poço experimental de 2438 m, equipado com uma coluna de 2 polegadas de diâmetro interno e bem instrumentado, uma abordagem empírica do método. Variando as condições operacionais, tais como: profundidade de operação, diferencial de pressão aplicado na válvula operadora e tempos de ciclo e de injeção, estabeleceram os primeiros fundamentos empíricos para o correto dimensionamento do método. As conclusões sugeriam a utilização de válvulas com sede de grande diâmetro de orifício e diferencial de pressão na faixa de 17,6 kgf/cm² (1,72 MPa).

Observou-se ainda um aumento do *fall-back* e do consumo de gás com a profundidade. Os testes foram realizados apenas para um ciclo de produção, seguindo-se a sequência abaixo :

1. circulava-se gás até 'secar' a coluna de produção ;
2. enchia-se a coluna até a altura desejada de líquido ;
3. injetava-se um determinado volume gás ;
4. registrava-se as informações necessárias na superfície.

White at al. ⁽⁴⁾ (1963) desenvolveram o primeiro estudo analítico para o método. Simplificaram seu modelo analítico assumindo que as velocidades da golfada e de penetração da bolha de gás eram constantes. Experimentos com tubulações verticais de 28 metros, com diâmetro interno variando de ½ a 2 polegadas, forneceram dados empíricos utilizados em análise adimensional e similaridade dinâmica. O modelo foi, posteriormente, aplicado em um poço real com 823 metros de profundidade.

Brill at al. ⁽⁵⁾ (1967) realizaram, em um poço experimental de 457 metros de profundidade, vários testes utilizando colunas de 1 ¼ e 1 ½ polegadas de diâmetro nominal. Variando-se o comprimento da golfada, o volume de gás injetado, a viscosidade e a tensão superficial do líquido, para cada diâmetro de tubo, vários testes foram realizados. Dos resultados obtidos com estes testes uma correlação empírica para o *fall-back* foi desenvolvida. Como nenhuma correlação geral pode ser obtida estas foram então apresentadas na forma de uma curva para cada comprimento de golfada, para um dado tipo de fluido e diâmetro de tubo. Desenvolveu-se um modelo conceitual combinando as correlações obtidas para o *fall-back* com as equações básicas de escoamento do fluido. Simulações realizadas para calcular a recuperação final de líquido e o volume do gás de injeção compararam favoravelmente com os dados de teste, verificando o modelo. Os procedimentos de teste foram iguais aos utilizados por Brown e Jessen ⁽³⁾; considerando-se apenas um ciclo de produção.

Neely at al. ⁽⁶⁾ (1974) realizaram uma série de testes em um poço monitorado de 1482 metros, comparando os resultados com os modelos de Brill at al. ⁽⁵⁾ e White at al. ⁽⁴⁾, sendo os resultados favoráveis ao modelo de Brill at al ⁽⁵⁾. Registrou-se, pela primeira vez, que grande parte da recuperação de líquido, às vezes maior que 50 %, deve-se ao líquido disperso no gás que se sucede à golfada. Desenvolveu-se um método analítico assumindo

constante a velocidade de subida da golfada, cujos resultados concordam bem com os dados de teste. Também aqui os procedimentos de teste foram semelhantes aos utilizados por Brown e Jessen ⁽³⁾ e Brill at al ⁽⁵⁾.

Machado ⁽⁷⁾ (1988) desenvolveu um modelo mecanicista, baseado em princípios físicos e relações empíricas, aplicando-o ao cálculo das principais variáveis que interferem no ciclo de produção, tais como : recuperação de líquido, tempo de acumulação, vazão de gás injetado, razão gás-líquido e comportamento das pressões em diferentes pontos da coluna de produção. O modelo considera ainda a presença ou não de um pistão. O modelo é aplicado ao conjunto de testes realizado por Neely et alii ⁽⁶⁾, apresentando razoável grau de concordância. Realiza também um estudo de sensibilidade de parâmetros para um caso padrão.

Liao ⁽⁸⁾ (1991) desenvolveu um modelo mecanicista para o *gas lift* intermitente convencional, contemplando todos os estágios do ciclo de produção. Os resultados deste modelo foram comparados com os dados experimentais de Brown e Jessen ⁽³⁾, Brill at al ⁽⁵⁾ e Neely at al ⁽⁶⁾, obtendo-se bons resultados em todos os casos, com a condição de que o parâmetro que relaciona a velocidade da bolha à velocidade da golfada fosse ajustado para cada referência. Em geral, valores na faixa de 1.0 a 1.25 foram obtidos para este parâmetro. Os resultados obtidos com este modelo são bastante encorajadores, não somente devido aos bons resultados obtidos com os dados experimentais, como também com os resultados de White at al ⁽⁴⁾, com respeito à penetração da bolha de gás como sendo uma constante natural do sistema de elevação.

2.3. Método *Gas Lift* Intermitente com Pistão

White ⁽⁹⁾ (1981) realizou testes experimentais com o *gas lift* intermitente com e sem pistão. Mostrou que a utilização de um pistão pode reduzir o *fall back* de líquido e aumentar a eficiência de elevação, para baixas razões P_{vo}/P_{to} , de uma forma bastante significativa. Concluiu que um pistão com um furo no centro produzia melhores resultados que um pistão sólido. Mostrou também que a idéia clássica de um pistão atuando como uma interface mecânica entre o gás e o líquido produzido não é correta nem desejável.

Mower e Lea ⁽¹⁰⁾ (1983) fizeram testes com água e ar num poço bem instrumentado de 224 metros de profundidade. Utilizando 12 pistões comerciais e um não comercial (com um furo central) mediram as velocidades de queda do pistão no ar e na água, o *fall back* de líquido e o volume total de gás que passava pelo pistão. Uma de suas principais conclusões foi de que o *fall-back* de líquido é uma função linear da velocidade média de subida do pistão.

Chacin et al. ⁽¹¹⁾ (1992) desenvolveram um modelo mecanicista para análise e dimensionamento do *Gas Lift* Intermitente com Pistão. Incorporam no modelo todos os estágios do ciclo de produção : alimentação, elevação e produção, assim como todos os parâmetros importantes, ou seja, pressão e produtividade do reservatório, características da coluna e linha de produção, tipo de pistão, pressão de gás disponível na superfície, etc. Partindo dos resultados obtidos por Mower e Lea ⁽¹⁰⁾ os autores adotam uma relação linear entre os valores instantâneos do *fall - back* e da velocidade de subida da golfada. Consideram que são iguais, durante o estágio de elevação: as áreas da bolha e do tubo; as velocidades da bolha, golfada e pistão.

2.4. Método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação

Brown et al ⁽¹²⁾ descrevem as vantagens e aplicações dos dois principais tipos de instalação com câmara : duplo *packer* e insertável. Citam, como principal campo de aplicação do sistema, poços com alto índice de produtividade e baixa ou média pressão estática. Descrevem dois procedimentos simplificados de cálculo: um para a pressão de fluxo média num poço equipado com o método intermitente convencional, e o outro para o correto dimensionamento da câmara. Recomendam substituir a instalação convencional por uma com câmara caso a pressão calculada no método convencional seja por demais 'excessiva'. Mostram o resultado obtido em dois poços: com o *Gas Lift* Intermitente Convencional os poços produziram 24 e 48 m³/d; com o *Gas Lift* Intermitente com Câmara os poços passaram a produzir 90 e 101 m³/d.

Winkler e Camp ⁽¹³⁾ (1956) ampliam um pouco o campo de aplicação das instalações com câmara: poços de alta produtividade e baixa pressão estática, e poços com baixa pressão estática e baixa produtividade. Variações das instalações convencionais tipo duplo *packer* e insertável são mostradas, assim como definidos os critérios para projeto.

Exemplificam, a partir de dados de produção de vários poços equipados com câmara, os ganhos de produção obtidos

Berdeja e Mariaco ⁽¹⁴⁾ (1971) fazem uma análise dos fundamentos e bases que devem ser considerados nas instalações pneumáticas com câmara de acumulação. Explicam detalhadamente os projetos e as soluções encontradas, através da utilização de diferentes tipos de câmaras, para resolver problemas de isolação de zonas não produtoras, furos no revestimento de produção e produção de poços com duas zonas produtoras. Analisam também os fatores a serem considerados para a otimização do método, traduzido em maior produção de líquido com menor consumo de gás. Afirmam que a instalação de câmara de acumulação, nos poços produtores da formação Sararenda, do campo Camiri, deram excelentes resultados em 100% dos casos. Relacionam dados de produção de cinco poços do campo, antes e após a instalação da câmara. De acordo com estes dados os ganhos oscilaram entre um mínimo de 11.7 % e um máximo de 201 %.

Acevedo e Cordero ⁽¹⁵⁾ (1991) descrevem a bem sucedida experiência com o uso do método em poços com alto índice de produtividade e baixa pressão estática, localizados no Lago de Maracaibo, Venezuela. O dimensionamento dos poços é feito a partir de um novo modelo matemático, desenvolvido pela Lagoven, S.A., que relaciona o comprimento da câmara às características do reservatório. Infelizmente, alegando que o modelo encontra-se em fase de desenvolvimento e que muitas das informações são confidenciais, os autores não fazem comentários sobre o mesmo. Relatam que suas experiências são com instalação tipo duplo *packer* e que os resultados obtidos são bastante promissores. De 13 poços equipados com o método 6 apresentaram aumento de 48 % na produção de líquido, acompanhados de uma redução de 39 % no volume de gás injetado. Os outros 7 poços apresentaram problemas operacionais com algumas das válvulas de sub-superfície (de alívio, de retenção ou de partida) ou com desassentamento de *packer*.

2.5. Método *Pig Lift*

Por ser um método pioneiro, recentemente desenvolvido pela PETROBRÁS, no ano de 1994 (a primeira instalação aconteceu em setembro de 1994), poucas publicações existem a respeito deste método.

Lima e Cardoso⁽¹⁶⁾ (1993), desenvolveram um simulador para poços produzindo com o método, com o objetivo de se verificar a possibilidade da aplicação desta técnica inovadora. Concluíram, utilizando dados de três poços em operação, que a instalação do sistema *pig lift* levaria a um aumento significativo na produção dos poços. Admitiram a existência de algumas simplificações no simulador, abaixo relacionadas, a serem corrigidas no desenvolvimento de futuras versões :

- descompressão instantânea após a produção da golfada ;
- temperatura constante ao longo do poço ;
- atrito da interface mecânica desprezado ;
- separação imediata entre gás e líquido ;
- perda de carga por aceleração desprezada.

Lima⁽¹⁷⁾ (1996), apresenta os princípios básicos de funcionamento do método; suas vantagens em comparação com outros métodos pneumáticos de elevação artificial, notadamente com o método intermitente convencional; o esquema de instalação e operação, assim como os equipamentos necessários. Mostra ainda os resultados obtidos com cinco poços atualmente em operação, onde os ganhos de produção com o método foram, em média, e para o conjunto dos poços, da ordem de 75 %. Cita, como principal objetivo para um futuro próximo, a instalação do sistema em poços horizontais.

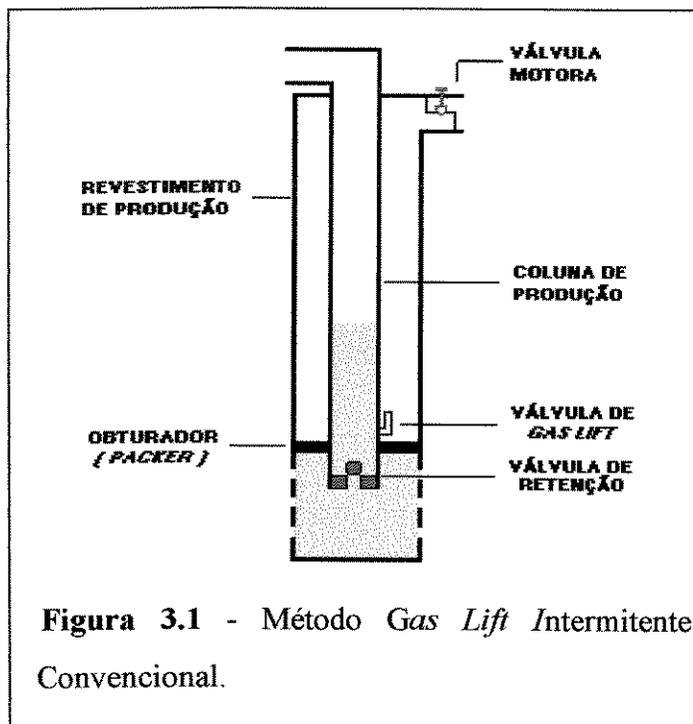
3. Métodos Pneumáticos Intermitentes

Considera-se como método pneumático intermitente todo aquele onde a produção de fluido ocorre intermitentemente, ou seja, por ciclos, utilizando para elevação do fluido apenas a expansão do gás natural (em geral) como fonte primária de energia. Seu ciclo de produção pode ser dividido, com algumas variações, em quatro estágios bem definidos: elevação, produção, descompressão e alimentação.

Os três tipos mais conhecidos são, basicamente, o *Gas Lift* Intermitente Convencional (GLI) e suas duas variações : *Gas Lift* Intermitente com Pistão (GLIP) e *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação (GLIC). Um quarto tipo, denominado *Pig Lift* (PL), recentemente desenvolvido no Brasil, vem sendo gradativamente utilizado, contando-se hoje com cinco poços em operação (Lima^(11,12)).

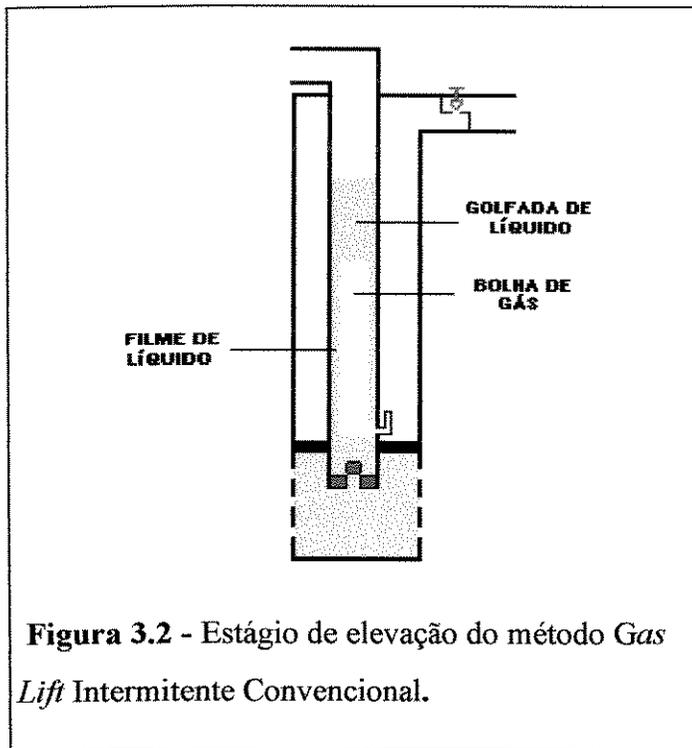
Nestes quatro métodos o controle da injeção de gás no revestimento de produção é realizado, na superfície, através de uma válvula pneumática de diafragma, tipo normalmente aberta, denominada válvula motora.

3.1. Método *Gas Lift* Intermitente Convencional (GLI)



No método *Gas Lift* Intermitente Convencional (Figura 3.1) permite-se, inicialmente, que o líquido produzido pelo reservatório acumule-se na coluna de produção. Quando a coluna de líquido atinge um nível pré-estabelecido gás a alta pressão é então injetado na coluna de produção, diretamente abaixo da golfada de líquido a ser produzida. O controle deste gás injetado é realizado por uma válvula controladora localizada no fundo do poço - a partir de agora denominada simplesmente válvula de

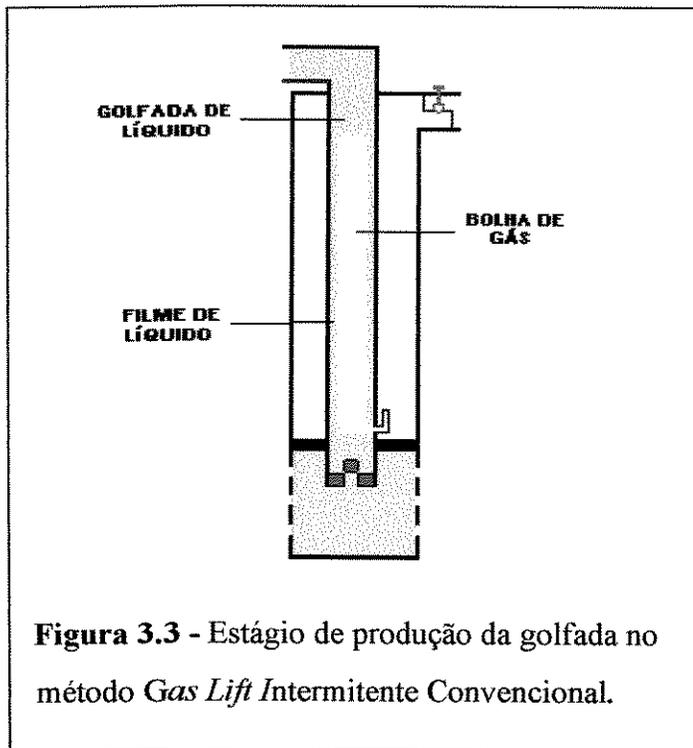
gas lift. A expansão do gás eleva a golfada de líquido até a superfície; devido à sua maior velocidade, porém, o gás constantemente penetra na golfada de líquido, resultando em uma contínua redução no comprimento da golfada no seu caminho até a superfície. Dependendo das condições do escoamento este líquido não produzido fica na coluna como um filme de líquido na parede da tubulação ou como gotas de líquido dispersas no seio da bolha de gás; ou ambos. O líquido produzido na superfície ocorre tanto pela produção da golfada que chega à superfície quanto pela produção do filme de líquido e/ou do líquido disperso na coluna de gás, arrastados pela coluna de gás sendo produzida. Parte do líquido não produzido retorna então para o fundo do poço, incorporando-se ao fluido da formação para formar uma nova coluna de líquido, e, assim, recomeçar o ciclo de produção. Faz-se, a seguir, uma análise de cada estágio do ciclo de produção



Estágio 1: Elevação (Figura 3.2)

Atingidas as pressões de tubo e revestimento, para as quais a válvula de *gas lift* foi dimensionada para operar, esta abre-se e gás é injetado na coluna de produção, iniciando-se o estágio de elevação da golfada. A posição das válvulas de *gas lift* e motora durante todo o estágio, se abertas ou fechadas, depende do volume de gás injetado durante o ciclo. Quanto maior este volume mais tempo as mesmas permanecerão abertas. Como regra

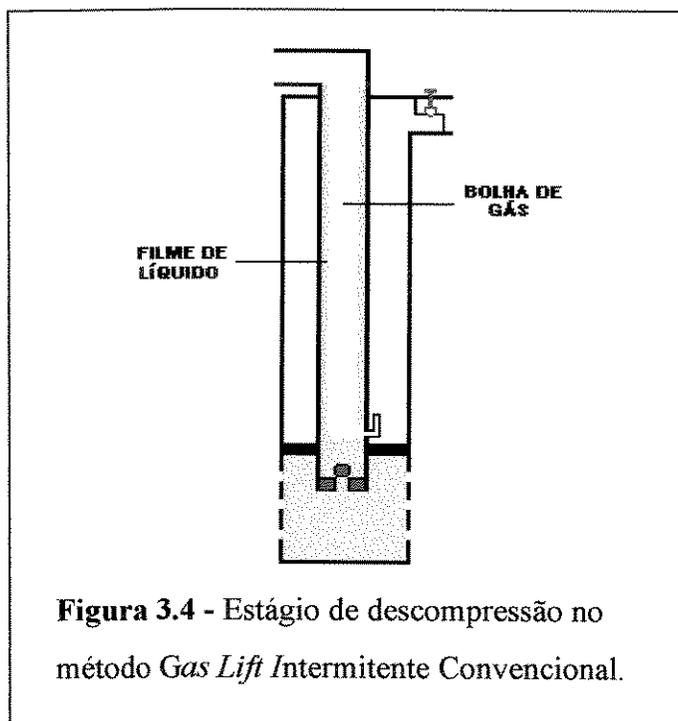
geral, pode-se dizer que ambas chegam fechadas no final do estágio. Segundo Liao⁽⁸⁾, em um sistema bem dimensionado a válvula de *gas lift* deve fechar-se no instante que o topo da golfada chega à superfície. Ou seja, a válvula de *gas lift* deve permanecer aberta durante todo o estágio de elevação. A expansão do gás eleva a golfada de líquido que se acumulou na coluna de produção durante o ciclo anterior - de alimentação. Quanto maior a velocidade relativa da bolha de gás maior a sua penetração na golfada de líquido e, portanto, maior a perda de massa do líquido. Este fator, mais conhecido na indústria de petróleo pela sua terminologia inglesa - *fall-back*, pode representar uma parcela substancial da golfada de líquido inicial. Por isso, o seu controle é determinante para o sucesso de uma instalação pneumática intermitente. E é exatamente com este objetivo, reduzir o *fall-back* de líquido durante o caminho da golfada até a superfície, que as instalações com pistão são utilizadas. Este estágio termina quando o topo da golfada chega à superfície, iniciando-se então o estágio seguinte - produção da golfada.



Estágio 2: Produção (Figura 3.3)

Inicia-se no instante que a golfada de líquido chega na superfície. As válvulas de *gas lift* e motora devem permanecer fechadas durante este estágio e os seguintes. Devido à transferência de fluido, da coluna para a linha de produção, a golfada de líquido é altamente acelerada. Este estágio termina quando toda a golfada de líquido é produzida, ou seja, quando a base da golfada chega à superfície. Inicia-se então o estágio seguinte -

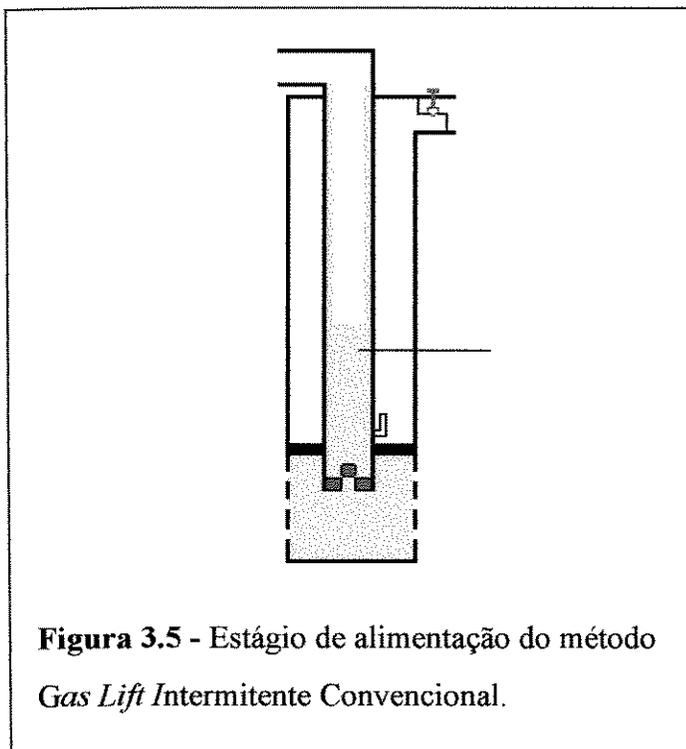
descompressão do gás.



Estágio 3: Descompressão (Figura 3.4)

Neste estágio ocorre produção do gás injetado, que pode estar ou não incorporado com líquido disperso. Durante os estágios de elevação e produção da golfada o líquido atravessado pelo gás redistribui-se nas paredes da coluna de produção ou dispersa-se na massa gasosa. Além disso, quando toda a golfada de líquido é produzida, a velocidade do gás aumenta significativamente.

Dependendo das condições do escoamento parte do filme de líquido na parede é retirado e entra na massa de gás. Portanto, além da decompressão do gás pode ocorrer também produção de líquido neste estágio, seja devido à velocidade do filme de líquido, seja devido à presença de líquido disperso no núcleo de gás. Considera-se concluído este estágio quando a pressão no fundo da coluna retorna ao seu valor inicial (do primeiro estágio), iniciando-se então o estágio seguinte - de alimentação.

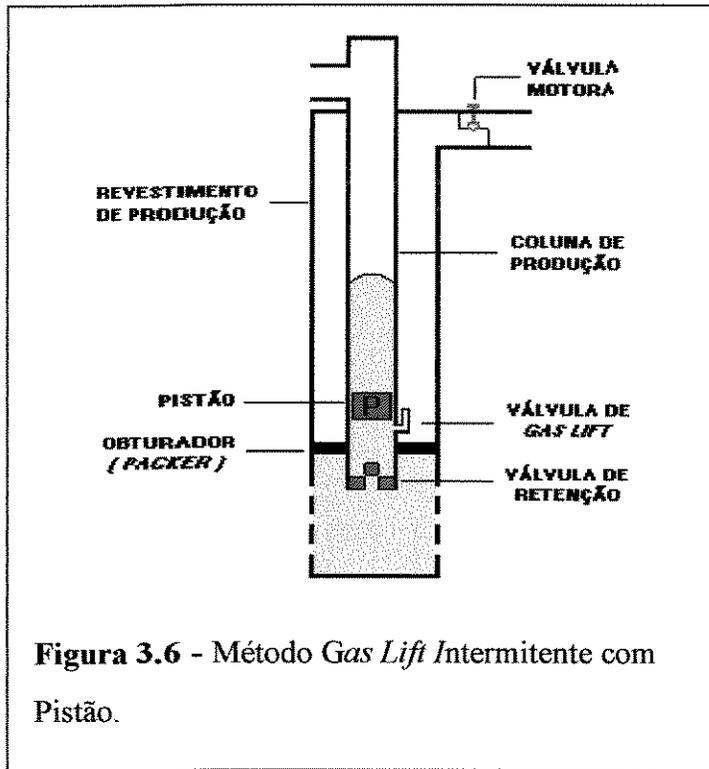


Estágio 4: Alimentação (Figura 3.5)

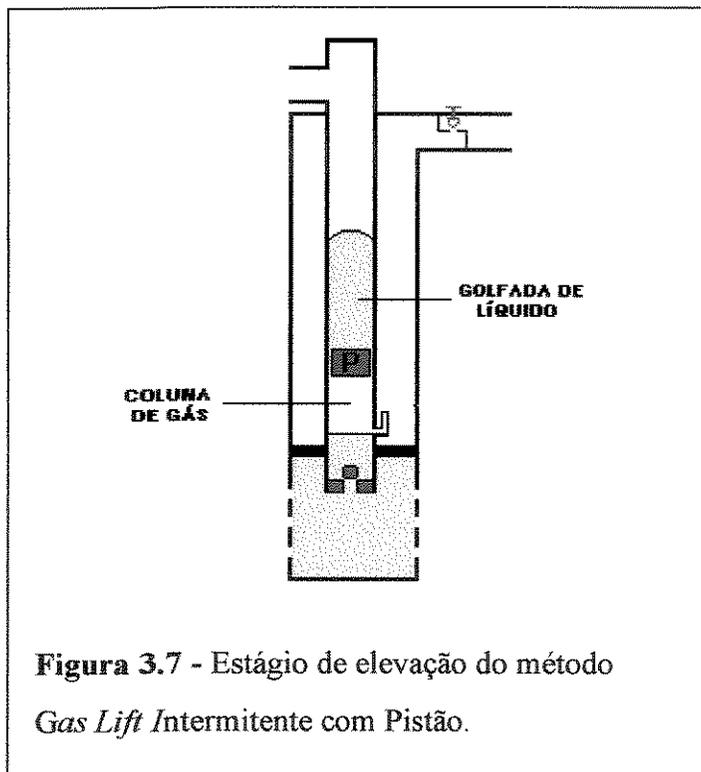
Neste estágio aguarda-se a recuperação da coluna de líquido inicial. Esta é formada por líquido proveniente tanto do reservatório quanto do filme de líquido na parede da tubulação, formado por parte da golfada não produzida nos estágios anteriores. Após um determinado tempo de alimentação abre-se a válvula motora e gás é injetado no espaço anular entre a

coluna e o revestimento de produção. Atingidas as pressões de tubo e revestimento para as quais a válvula de *gas lift* foi dimensionada para operar, esta abre-se e gás é injetado na coluna de produção, reiniciando-se o ciclo de produção com o estágio de elevação da golfada.

3.2. Método *Gas Lift* Intermitente com Pistão (GLIP)



A diferença básica entre este método (Figura 3.6) e o intermitente convencional consiste, como já observado, na instalação de uma interface mecânica (pistão) entre o gás injetado e o líquido produzido, com o objetivo de reduzir o *fall-back* de líquido. O seu ciclo de produção é dividido nos mesmos estágios do método convencional. Cita-se, a seguir, apenas as diferenças básicas entre os estágios equivalentes de cada método.

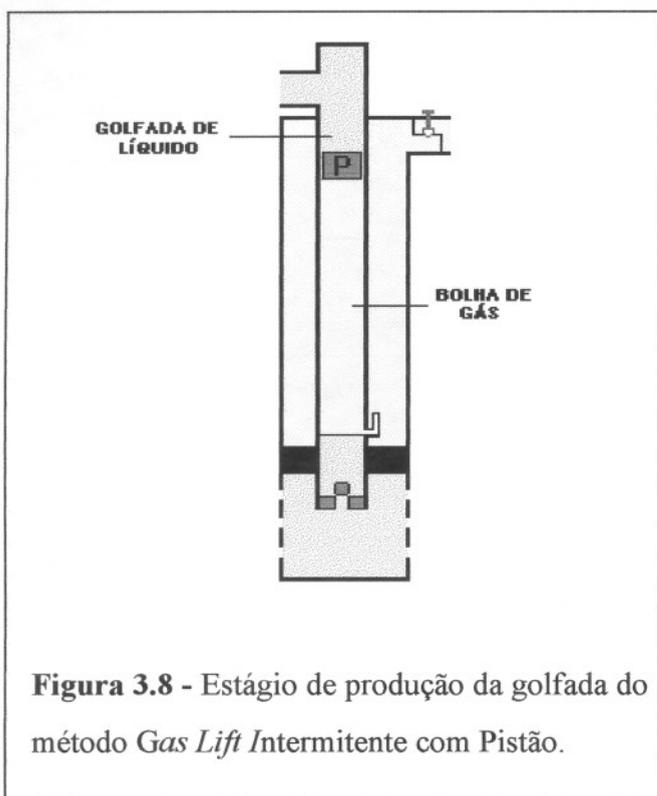


Estágio 1: Elevação (Figura 3.7)

A presença do pistão reduz o *fall-back* de líquido, ou seja, a perda de massa de líquido da golfada no seu caminho até a superfície. Alguns trabalhos experimentais - White⁽⁹⁾, Mower e Lea⁽¹⁰⁾ - mostraram que esta perda de massa é significativamente reduzida com a instalação do pistão.

Porém a forma de tratar esta perda de massa, na elaboração de modelos, tem variado entre alguns autores: Rossina⁽¹⁸⁾, assim como

Liao⁽⁸⁾ para o método convencional, distribui todo o *fall-back* como um filme de líquido na parede da tubulação; Chacin⁽¹¹⁾, que utiliza os resultados obtidos por Mower e Lea⁽¹⁰⁾ para o cálculo do *fall-back*, considera que todo o líquido não produzido retorna para o fundo do poço, incorporando-se ao fluido da formação; já Baruzzi⁽¹⁹⁾ adota um *fall back* de líquido igual a zero, por considerar que a passagem de fluido pelo pistão não está bem modelada e necessita, portanto, de maior pesquisa básica.



Estágio 2: Produção (Figura 3.8)

Inicia-se no instante que o topo da golfada de líquido chega à superfície e termina com a chegada do pistão à superfície. Assim como no método convencional a golfada de líquido é altamente acelerada, devido à transferência de líquido da coluna para a linha de produção.

Figura 3.8 - Estágio de produção da golfada do método *Gas Lift Intermitente* com Pistão.

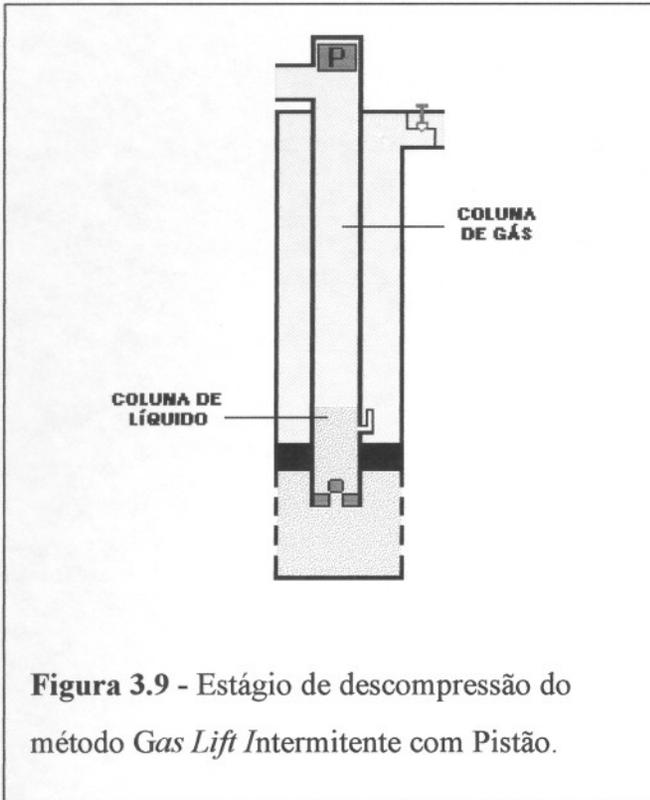


Figura 3.9 - Estágio de decompressão do método *Gas Lift Intermitente* com Pistão.

Estágio 3: Decompressão (Figura 3.9)

Neste caso considera-se que o estágio começa quando o pistão, e não a base da golfada, chega à superfície. Como neste método a perda de líquido é menor do que no método convencional menor será, também, a produção via arraste do filme de líquido e/ou líquido disperso na coluna de gás. Devido à perda de pressão, gerada pelas altas velocidades do gás, o pistão é mantido na superfície praticamente durante todo este estágio.

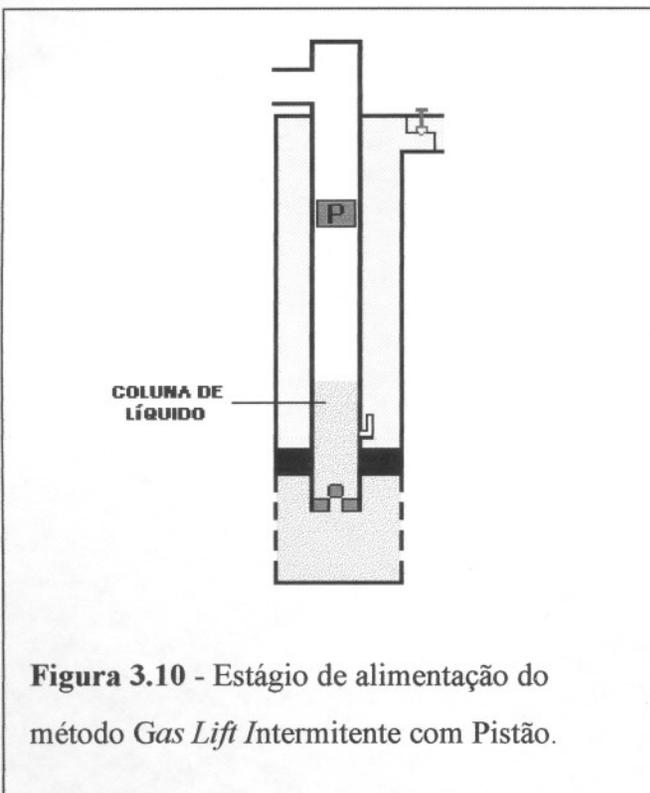
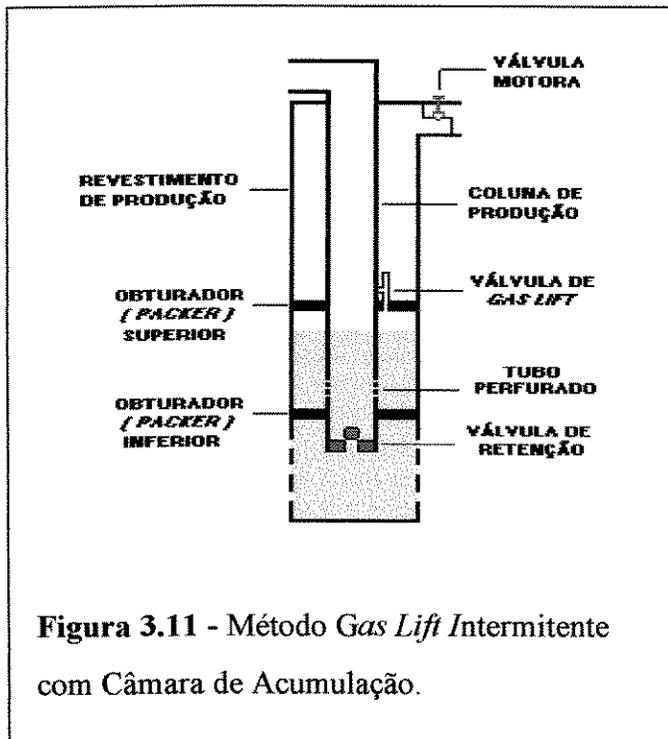


Figura 3.10 - Estágio de alimentação do método *Gas Lift Intermitente* com Pistão.

Estágio 4: Alimentação (Figura 3.10)

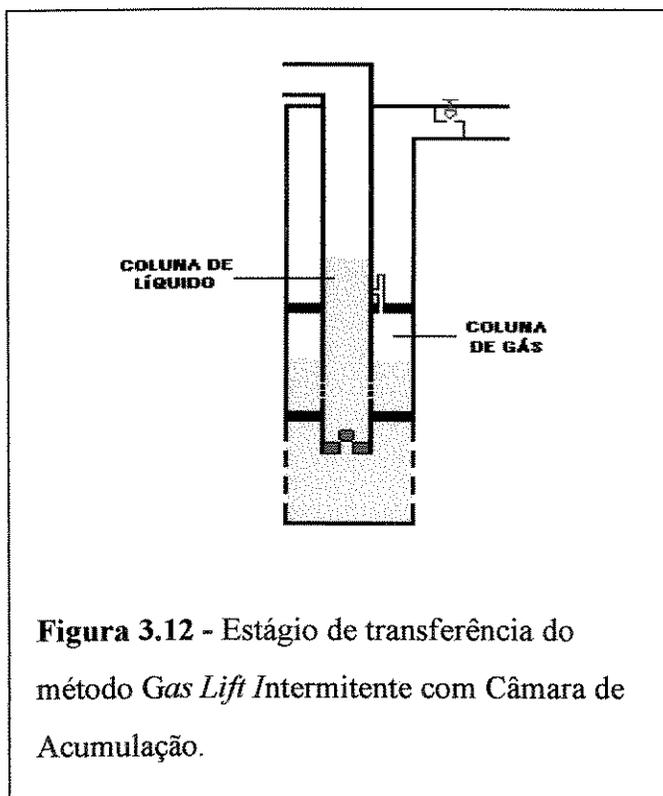
Este estágio é concluído quando o comprimento inicial da coluna de líquido é restabelecido. É dentro deste estágio que o pistão inicia seu retorno para o fundo do poço. Para uma boa eficiência de operação o pistão deve retornar à sua posição no fundo do poço antes do início do próximo ciclo. Caso isto não ocorra o ciclo não estará otimizado e deve, portanto, ter suas condições de operação alteradas.

3.3. Método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação (GLIC)



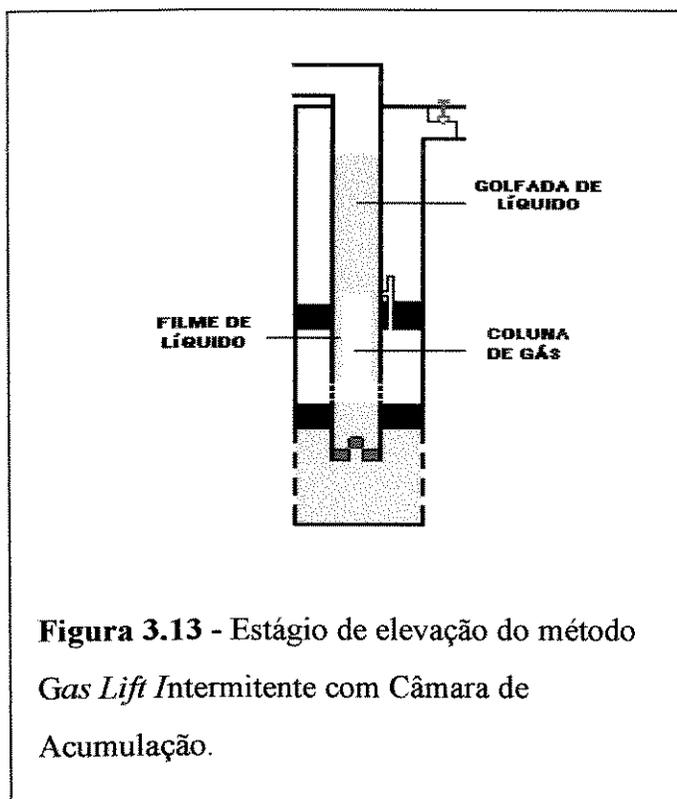
definido, neste trabalho, como *estágio de transferência*.

A diferença básica entre este método (Figura 3.11) e o *Gas Lift* Intermitente Convencional consiste na redução do comprimento da coluna de líquido no estágio de alimentação. Como neste método utiliza-se também o volume do espaço anular para a acumulação de líquido tem-se, para um mesmo volume inicial de golfada, uma altura menor da coluna de líquido. Isto resulta, no estágio de alimentação, em um valor menor para a pressão média de fluxo. O ciclo inicia-se num estágio anterior ao de elevação,



Estágio 1: Transferência (Figura 3.12)

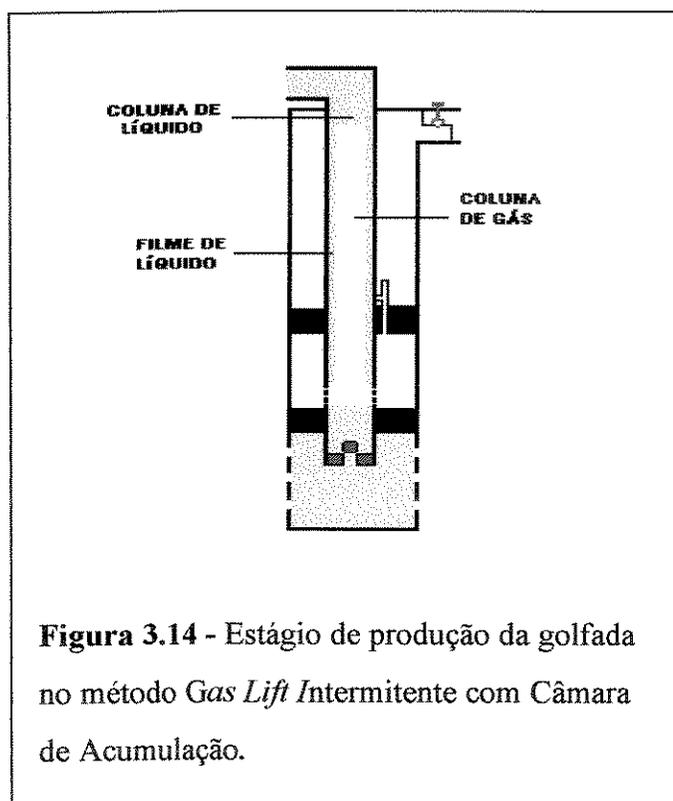
Nos métodos anteriores a abertura da válvula de *gas lift* coincidia com a injeção de gás na coluna de produção. No método com câmara isto não ocorre; a válvula de *gas lift*, quando abre, injeta gás no anular da câmara, no topo da coluna de líquido - iniciando o processo de transferência do líquido do anular para a coluna de produção. Este estágio inicia-se, portanto, com a abertura da válvula de *gas lift* e termina quando o gás injetado atinge o tubo perfurado, ou seja, após transferido todo o líquido do espaço anular.



Estágio 2: Elevação (Figura 3.13)

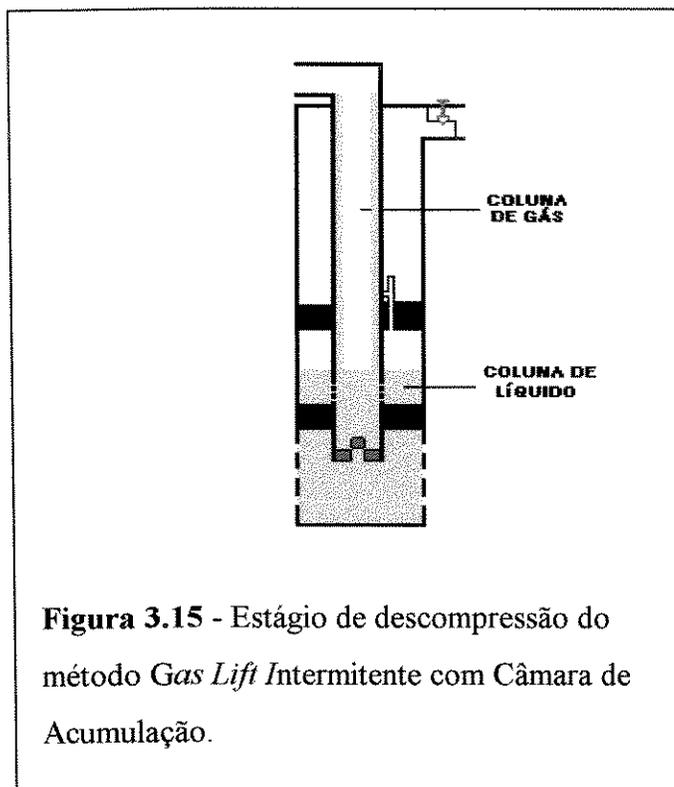
Assim como nos métodos anteriores este estágio inicia-se quando gás é injetado na coluna de produção. Ao contrário do que ocorre no método convencional a velocidade da golfada de líquido é relativamente alta no instante da injeção de gás na coluna de produção. No método intermitente convencional ocorre, logo após a abertura da válvula de *gas lift*, o fenômeno conhecido na literatura como *breakthrough*, i.e., uma grande penetração do gás no líquido - já que a velocidade do gás é muito maior que a velocidade do líquido. Nos métodos com câmara este efeito é bastante reduzido, desde que a golfada já está acelerada no instante da injeção de gás na coluna de produção.

velocidade do líquido. Nos métodos com câmara este efeito é bastante reduzido, desde que a golfada já está acelerada no instante da injeção de gás na coluna de produção.



Estágio 3: Produção (Figura 3.14)

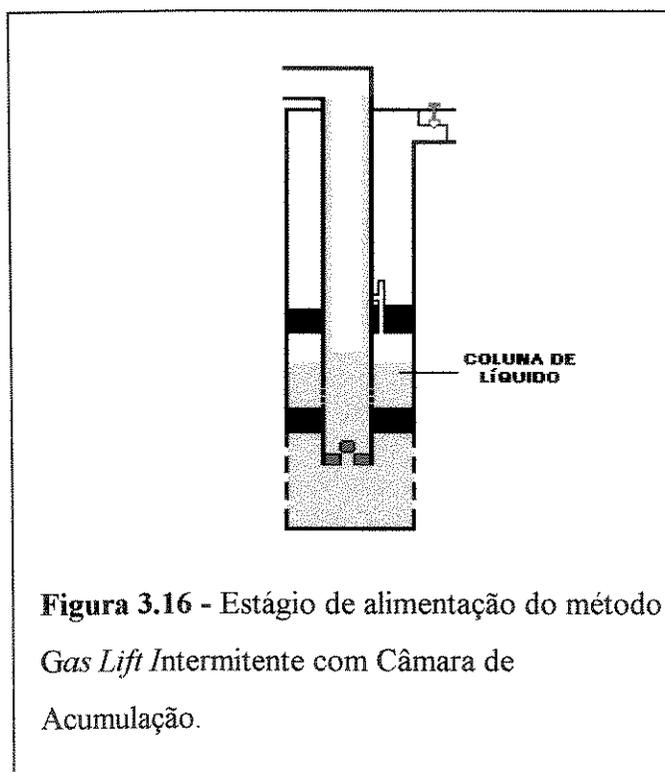
Assim como no método intermitente convencional este estágio tem as seguintes características : 1) começa e termina respectivamente quando o topo e a base da golfada de líquido chegam à superfície ; 2) a golfada de líquido é altamente acelerada durante o estágio; 3) as válvulas de *gas lift* e motora devem permanecer fechadas.



Estágio 4: Decompressão (Figura 3.15)

Inicia-se quando a base da golfada chega à superfície e termina quando a pressão do gás, no topo da coluna de líquido, retorna ao seu valor inicial. A coluna de líquido que se forma impede, num determinado momento, que o gás ainda acumulado no espaço anular da câmara seja produzido. Caso este gás não seja produzido ele é comprimido e aumenta a contrapressão na formação, reduzindo a produção do poço. Este problema é solucionado, nos métodos com câmara, comunicando-se a parte superior do anular da câmara com a coluna de produção, seja pela utilização de válvulas de alívio, instaladas imediatamente abaixo do obturador superior, seja pela utilização de válvulas de *gas lift* especialmente projetadas para trabalhar com este tipo de instalação.

superior do anular da câmara com a coluna de produção, seja pela utilização de válvulas de alívio, instaladas imediatamente abaixo do obturador superior, seja pela utilização de válvulas de *gas lift* especialmente projetadas para trabalhar com este tipo de instalação.



Estágio 5: Alimentação (Figura 3.16)

No método intermitente convencional o líquido acumula-se apenas na coluna de produção; e, nos métodos com câmara, na coluna e no espaço anular entre a coluna e o revestimento de produção. Esta é a principal diferença e a própria razão de ser das instalações com câmara: reduzir, pela redução do comprimento da coluna de líquido inicial, a pressão média de fluxo durante este estágio.

3.4. Método Pig Lift (PL)

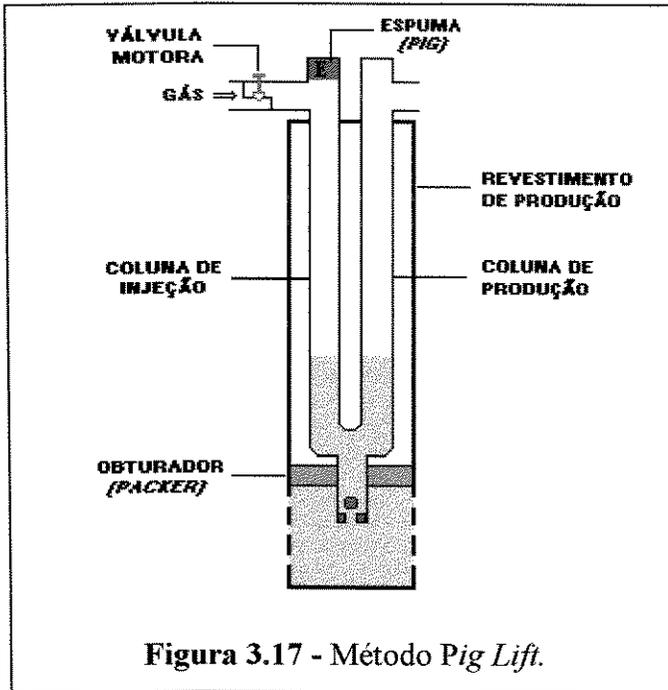


Figura 3.17 - Método Pig Lift.

O método *Pig Lift* apresenta uma configuração bastante diferente das anteriores (Figura 3.17). Constitui-se, basicamente, de duas colunas de produção conectadas no fundo do poço e que se alternam funcionalmente a cada ciclo de produção: uma para injeção de gás e outra para produção de líquido, e vice-versa. A grande particularidade deste método consiste na utilização, nos estágios de elevação e produção, de uma interface mecânica, não-rígida, fabricada de espuma, entre o gás injetado e a golfada de líquido produzida.

A utilização desta interface mecânica permite reduzir, praticamente a zero, o *fall-back* de líquido. Seu ciclo de produção pode também ser dividido nos mesmos estágios do GLI com câmara de acumulação: transferência, elevação, produção, descompressão e alimentação.

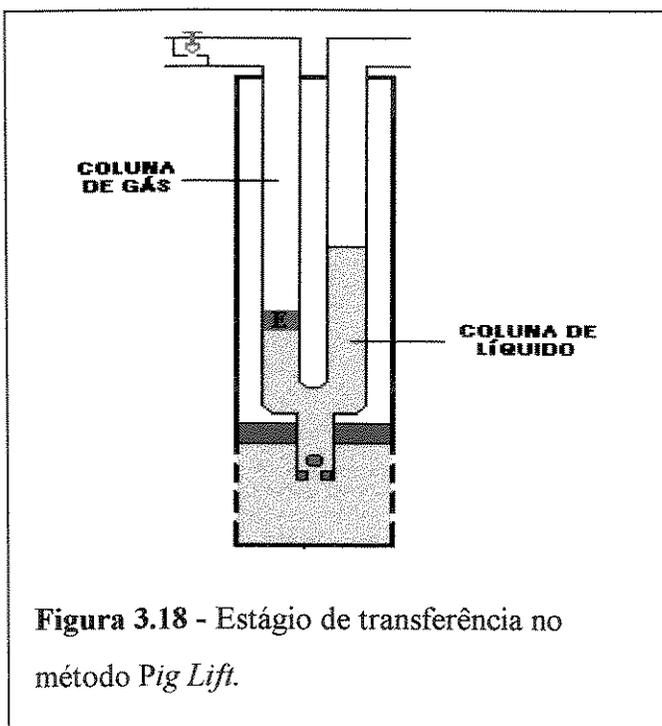
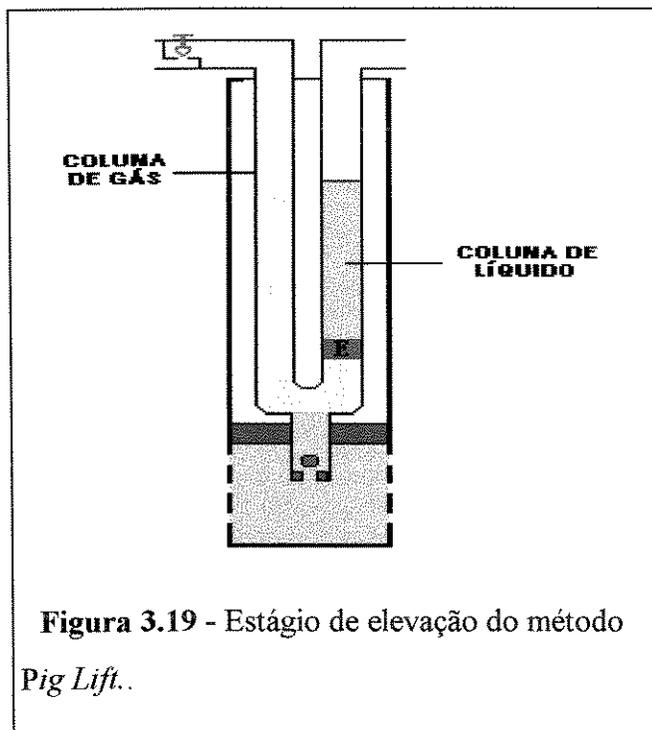


Figura 3.18 - Estágio de transferência no método Pig Lift.

Estágio 1: Transferência (Figura 3.18)

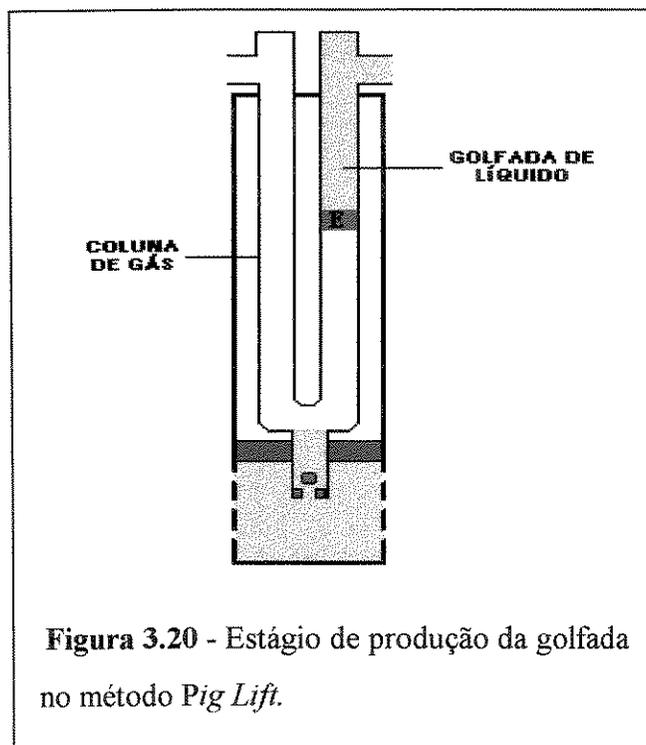
Este estágio inicia-se com a abertura da válvula motora. Gás é injetado diretamente na coluna de injeção, no topo da coluna de líquido. Neste instante, assim como no método intermitente com câmara, inicia-se o processo de transferência do líquido da coluna de injeção para a coluna de produção. O estágio termina quando todo o líquido é transferido, ou, de outra forma, quando inicia-se a injeção de gás

na coluna de produção, passando-se então para o estágio seguinte do ciclo de produção - elevação.



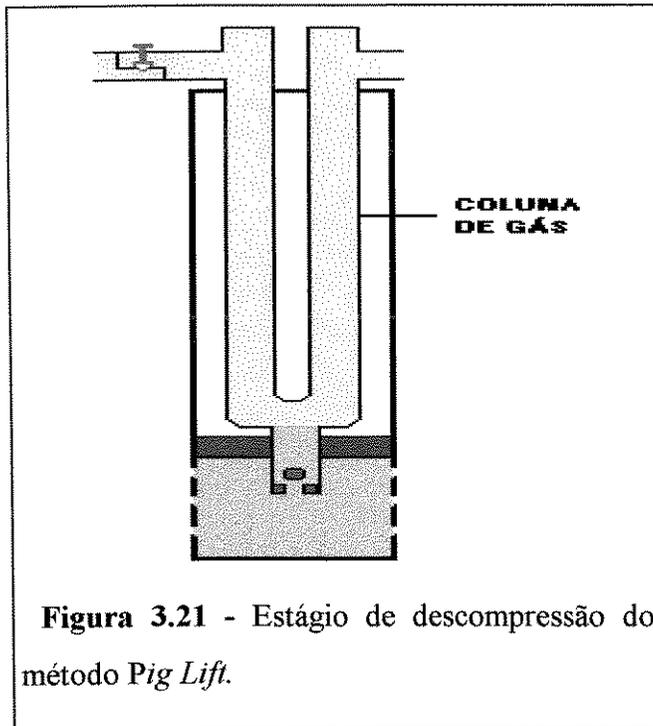
Estágio 2: Elevação (Figura 3.19) -

Inicia-se com a injeção de gás na coluna de produção. Assim como no método intermitente com câmara a velocidade da golfada de líquido é maior que zero nos instantes iniciais deste estágio. Além disso, devido à presença da espuma entre o gás injetado e a golfada de líquido produzida, o *fall-back* de líquido é igual a zero neste estágio. Este estágio termina quando o topo da golfada de líquido chega à superfície.



Estágio 3: Produção (Figura 3.20)

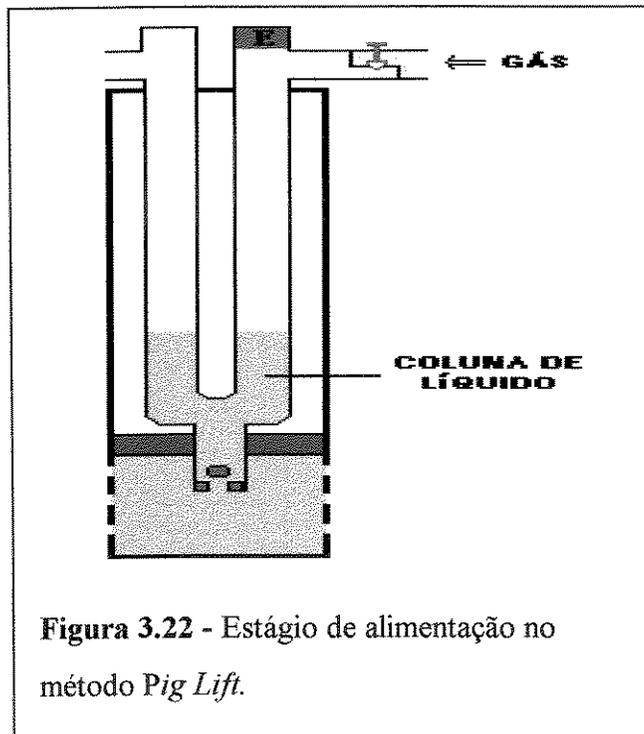
Inicia-se com a chegada do topo da golfada à superfície e termina com a chegada da espuma na superfície.



Estágio 4: Decompressão (Figura 3.21)

É, assim como nos métodos anteriores, o estágio de produção do gás injetado. Diferentemente dos outros métodos, porém, não ocorre produção de líquido neste estágio, já que não existe perda de massa da golfada de líquido. Um procedimento operacional, já largamente utilizado, permite reduzir o tempo de duração deste estágio: quando a pressão na coluna de produção, medida na superfície, atinge um certo valor (aproximadamente 12 kgf/cm^2), fecha-se a válvula motora,

cortando-se então a injeção de gás; após um tempo pré-definido (geralmente 2 minutos) comunica-se a coluna de injeção com a coluna de produção, na superfície; o gás passa então a escoar, pelas duas colunas, do fundo do poço diretamente para a superfície.



Estágio 5: Alimentação (Figura 3.22)

É, como nos outros métodos, o estágio onde se aguarda o restabelecimento da coluna inicial, para o reinício de um novo ciclo. O líquido da formação acumula-se nas duas colunas - de injeção e de produção.

4. Modelos matemáticos

Os modelos são desenvolvidos aplicando-se ao escoamento as equações da continuidade e da quantidade de movimento, utilizando-se os conceitos de sistema e volume de controle. E como é de interesse obter, neste estudo, apenas informações globais do escoamento, e não ponto a ponto, utiliza-se a formulação integral e não diferencial destas equações.

E como todas as leis da mecânica são escritas para sistemas - quantidade arbitrária de massa de identidade fixa, sem fluxo de massa na sua fronteira, e trabalhar-se-a com volumes de controle - região fixa do espaço, por onde ocorre fluxo de massa, torna-se necessário converter a análise de sistema para uma análise de volume de controle. O que é feito utilizando-se o Teorema de Transporte de Reynolds.

Teorema de transporte de Reynolds

O teorema de transporte de Reynolds, que converte a análise de sistemas para uma análise de volume de controle, afirma que a razão de variação com o tempo da propriedade B, associada ao sistema no instante t, é igual à soma do fluxo líquido de B através da superfície de controle no instante t, mais a razão de variação com o tempo da propriedade B dentro do volume de controle, o qual naquele instante tem a forma do sistema.

A equação (4.1), abaixo, representa matematicamente o teorema acima.

$$\left. \frac{dB}{dt} \right)_{\text{sistema}} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \beta \rho dV + \int_{sc} \beta \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (4.1)$$

onde ,

B : propriedade extensiva do fluido ;

β : propriedade intensiva do fluido ($\beta = \frac{dB}{dm}$) ;

m : massa do fluido ;

ρ : massa específica do fluido

v_r : velocidade relativa do fluido ($v_r = v - v_f$) ;

v : velocidade do fluido relativa a um sistema de coordenada fixo ;

v_f : velocidade da fronteira relativa ao sistema de coordenada fixo ;

dV : elemento infinitesimal do volume de controle ;

vc : volume de controle ;

sc : superfície de controle ;

dA : elemento infinitesimal da superfície de controle

n : vetor unitário normal à superfície de controle

Equação de conservação da massa

(*Balanço de massa*)

Obtém-se a equação do balanço de massa a partir da equação (4.1), fazendo-se $\beta = 1$, $B = m$ e considerando-se que, para um sistema, $\left. \frac{dB}{dt} \right)_{\text{sistema}} = 0$. Portanto a formulação para o balanço de massa fica :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV + \int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (4.2)$$

Equação de conservação da quantidade de movimento

(*Balanço de momento*)

A segunda lei de Newton, aplicada ao movimento de um sistema, para um referencial inercial, é dada por :

$$\frac{D}{Dt} (m\vec{v})_{Sist} = \sum F \quad (4.3)$$

Obtém-se a equação do balanço de momento a partir das equações (4.1) e (4.3), fazendo-se $B = m\vec{v}$ e $\beta = v$. Portanto a formulação para o balanço de momento fica

$$\sum F = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV + \int_{sc} \rho v (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (4.4)$$

onde,

$$\left. \frac{dB}{dt} \right)_{sistema} = \sum F \quad e,$$

F : resultante das forças agindo no sistema

4.1. Modelo I : *Gas lift* Intermitente Convencional

Terá como base o modelo mecanicista apresentado por Liao⁽⁸⁾ em sua tese de doutorado. O modelo, desenvolvido para o *Gas Lift* Intermitente Convencional, contempla todos os estágios do ciclo de produção do método.

Assim como no modelo desenvolvido por Liao⁽⁸⁾ o ciclo de produção foi dividido em estágios. No modelo aqui desenvolvido considerou-se mais adequado, porém, dividir o ciclo de produção em cinco estágios, conforme relacionado na Tabela 4.1.

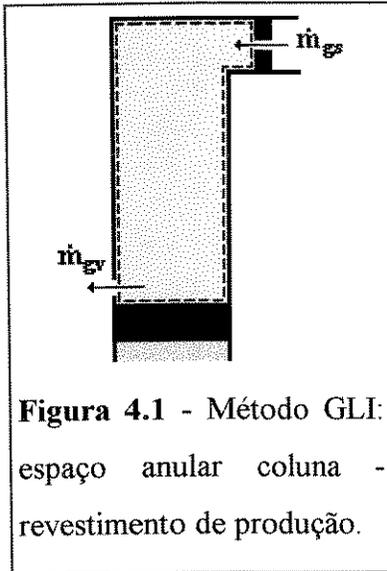
TABELA 4.1: Estágios do ciclo de produção para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional

Estágio	DESCRIÇÃO	INICIO	FIM
1	Injeção de gás	abertura da válvula motora na superfície.	abertura da válvula de <i>gas lift</i> .
2	Elevação da golfada	abertura da válvula de <i>gas lift</i> .	chegada do topo da golfada à superfície
3	Produção da golfada	chegada do topo da golfada à superfície	chegada da base da golfada à superfície.
4	Descompressão	chegada da base da golfada à superfície	pressão do gás no fundo igual ao seu valor inicial
4.1	- FASE 1 -	chegada da base da golfada à superfície	fechamento da válvula de <i>gas lift</i> .
4.2	- FASE 2 -	fechamento da válvula de <i>gas lift</i>	velocidade do filme de líquido igual a zero.
4.3	- FASE 3 -	velocidade do filme de líquido igual a zero.	pressão do gás no fundo igual ao seu valor inicial
5	Alimentação	pressão do gás no fundo igual ao seu valor inicial	comprimento da coluna de líquido igual ao valor inicial

4.1.1. Estágio 1 - injeção de gás

Neste estágio gás é injetado no revestimento de produção, através da válvula motora instalada na superfície, até que a pressão no revestimento atinja a pressão de abertura da válvula de *gas lift*. Compõe o sistema físico apenas o espaço anular coluna - revestimento de produção.

Espaço anular coluna - revestimento de produção



Balanço de massa : aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com o espaço anular (Figura 4.1) tem-se :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV + \int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (4.1.1)$$

O primeiro termo, considerando-se que o volume do anular é constante e igual a V_{tc} , fica :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = V_{tc} \frac{d\rho_{tc}}{dt} \quad (4.1.2)$$

Sendo a densidade média do gás no espaço anular dada pela relação abaixo ,

$$\rho_{tc} = \frac{1}{2} \frac{M}{Z_{tc} R T_{tc}} (P_{c1} + P_{c2}) \quad (4.1.3)$$

a equação (4.1.2) fica

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \frac{V_{tc}}{2} \frac{M}{Z_{tc} R T_{tc}} \left(\frac{dP_{c1}}{dt} + \frac{dP_{c2}}{dt} \right) \quad (4.1.4)$$

onde,

- R : Constante universal dos gases, $J.mol^{-1}.K^{-1}$
- M : Massa molecular do gás, kg/mol
- T_{tc} : Temperatura média do gás no espaço anular, K
- V_{tc} : Volume do espaço anular coluna-revestimento de produção, m^3
- Z_{tc} : Fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular
- ρ_{c1} : Massa específica do gás na superfície, kg/m^3
- ρ_{c2} : Massa específica do gás na profundidade da válvula de *gas lift* , kg/m^3

Sendo m_{tc} a massa de gás no espaço anular, num instante qualquer t , a expressão acima pode ser reescrita como :

$$\frac{dm_{tc}}{dt} = \frac{V_{tc}}{2} \frac{M}{Z_{tc} R T_{tc}} \left(\frac{dP_{c1}}{dt} + \frac{dP_{c2}}{dt} \right) \quad (4.1.5)$$

Ou, de outra forma,

$$\frac{V_{tc}}{2} \frac{M}{Z_{tc} R T_{tc}} \left(\frac{dP_{c1}}{dt} + \frac{dP_{c2}}{dt} \right) - \frac{dm_{tc}}{dt} = 0 \quad (4.1.6)$$

O segundo termo da equação (4.1.6) representa o fluxo líquido de massa pelo volume de controle, ou seja,

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \frac{dm_{tc}}{dt} \quad (4.1.7)$$

Gás entra e sai do volume de controle respectivamente pela válvula motora localizada na superfície e pela válvula de *gas lift* localizada no fundo do poço. Portanto,

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \frac{dm_{tc}}{dt} = - \dot{m}_{gs} + \dot{m}_{gv} \quad (4.1.8)$$

Ou, rearranjando,

$$\frac{dm_{tc}}{dt} - \dot{m}_{gs} + \dot{m}_{gv} = 0 \quad (4.1.9)$$

onde,

m_{tc} : Massa de gás no espaço anular, kg

\dot{m}_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s

\dot{m}_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s

Como neste estágio a válvula de *gas lift* permanece fechada a equação (4.1.9) fica reduzida a :

$$\frac{dm_{lc}}{dt} - m_{gs} = 0 \quad (4.1.10)$$

Com a válvula motora fechada a equação (4.1.9) fica reduzida a :

$$\frac{dm_{lc}}{dt} + m_{gv} = 0 \quad (4.1.11)$$

Vazão de gás pela válvula motora instalada na superfície

A vazão de gás pela válvula motora é calculada utilizando-se a equação (4.1.12) abaixo, obtida do manual de fabricante do equipamento.

$$q_{gs} = \frac{1,5136 \times 10^{-6} \cdot C_v P_{inj}}{\sqrt{d_g T_{cl}}} \sqrt{\frac{P_{cl}}{P_{inj}} - \left(\frac{P_{cl}}{P_{inj}}\right)^2} \quad (4.1.12)$$

onde,

- C_v : Coeficiente de descarga da válvula motora (adotado igual a 8,5)
- d_g : Densidade relativa do gás ($Ar = 1$)
- q_{gs} : Vazão de gás na superfície, m^3/s
- P_{cl} : Pressão do gás à jusante da válvula motora, Pa
- P_{inj} : Pressão do gás à montante da válvula motora, Pa
- T_{cl} : Temperatura do gás na superfície, K

Vazão de gás pela válvula de *gas lift*

A vazão de gás pela válvula de *gas lift* é calculada utilizando-se a equação de Thornihill - Craver, abaixo representada.

$$q_{gv} = \frac{0,04842 \cdot C_d A_v P_{c2}}{\sqrt{d_g T_{c2}}} \sqrt{2 \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_{t1}}{P_{c2}} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_{t1}}{P_{c2}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (4.1.13)$$

onde,

- A_v : Área da sede da válvula de *gas lift*, m²
- C_d : Coeficiente de descarga da válvula de *gas lift* (adotado igual a 0,865)
- d_g : Densidade relativa do gás ($A_r = 1$)
- k : Constante adiabática
- q_{gv} : Vazão de gás pela válvula de *gas lift*, m³/s
- P_{c2} : Pressão do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- T_{c2} : Temperatura do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, K

Cada vazão mássica é então calculada multiplicando-se a respectiva vazão volumétrica de gás pela massa específica do gás nas condições normais de temperatura e pressão.

$$m_{gs} = q_{gs} \rho_{gcp} \quad (4.1.14)$$

$$m_{gv} = q_{gv} \rho_{gcp} \quad (4.1.15)$$

onde

- m_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s
- m_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
- ρ_{gcp} : Massa específica do gás na condição padrão - 1,013 x 10⁵ Pa e 15.56 °C, kg/m³

Balanço de momento : a aplicação do balanço de momento, considerando-se desprezível as forças de atrito e aceleração, fornece a relação abaixo entre as pressões na superfície e na profundidade da válvula de *gas lift* (Apendice E):

$$P_{c2} = P_{c1} e^{\frac{M g z_v}{Z_{tc} R T_{tc}}} \quad (4.1.16)$$

onde :

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
 P_{c1} : Pressão do gás na superfície, Pa
 P_{c2} : Pressão do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 T_{tc} : Temperatura média do gás no espaço anular, K
 Z_{tc} : Fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular
 z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m

Derivando-se (4.1.16), supondo-se Z_{tc} constante, obtém-se a formulação final para o balanço de momento na coluna de gás do espaço anular.

$$\frac{dP_{c2}}{dt} - e^{\frac{M g z_v}{Z_{tc} R T_{tc}}} \frac{dP_{c1}}{dt} = 0 \quad (4.1.17)$$

Equações constitutivas

As equações (4.1.6), (4.1.10) e (4.1.17), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento, formam um sistema de 3 equações com 5 variáveis: $m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, \rho_{c1}$ e ρ_{c2} . Fecha-se o sistema utilizando-se as duas equações constitutivas abaixo, obtidas da equação de estado dos gases reais.

$$\frac{dP_{c1}}{dt} - \frac{Z_{c1} R T_{c1}}{M} \frac{d\rho_{c1}}{dt} = 0 \quad (4.1.18)$$

onde,

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
 P_{c1} : Pressão do gás na superfície, Pa
 R : Constante universal dos gases, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
 T_{c1} : Temperatura do gás na superfície, K
 Z_{c1} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c1} e T_{c1}
 ρ_{c1} : Massa específica do gás a P_{c1} e T_{c1} , kg/m^3

$$\frac{dP_{c2}}{dt} - \frac{Z_{c2} R T_{c2}}{M} \frac{d\rho_{c2}}{dt} = 0 \quad (4.1.19)$$

onde,

- P_{c2} : Pressão do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 T_{c2} : Temperatura do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, K
 Z_{c2} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c2} e T_{c2}
 ρ_{c2} : Massa específica do gás a P_{c2} e T_{c2} , kg/m³

4.1.2. Estágio 2 - elevação da golfada

Neste estágio gás é injetado na coluna de produção, abaixo da golfada de líquido, elevando-a até a superfície. Assume-se que todo líquido devido ao *fall-back* permanece como um filme de líquido na parede da tubulação e que o fluido produzido pela formação acumula-se no filme de líquido.

Compõe o sistema físico : o espaço anular, a bolha de gás, o filme e a golfada de líquido.

Espaço anular coluna revestimento de produção

Continua valendo, a menos da equação (4.1.10), o mesmo sistema de equações desenvolvido para o estágio anterior. Como neste estágio a válvula de *gas lift* encontra-se aberta, e portanto $m_{gv} \neq 0$, substitui-se a equação (4.1.10) pela equação (4.1.9).

Bolha de gás

Considera-se que a bolha de gás tem forma cilíndrica e nenhuma transferência de massa ocorre na interface entre a golfada de líquido e a bolha de gás.

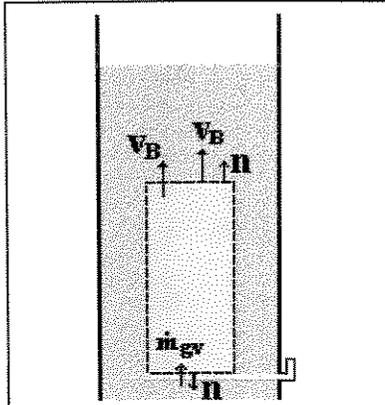


Figura 4.2 - Método GLI: bolha de gás na coluna de produção no estágio de elevação.

Balanço de massa : aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a bolha de gás (Figura 4.2) tem-se, para o primeiro termo, que :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \frac{d}{dt} (\rho_B h_B A_B) \quad (4.1.20)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m^2
 h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
 ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m^3

Enquanto a válvula de *gas lift* permanecer aberta gás entra no volume de controle a partir da sua superfície inferior. Tem-se portanto, para o segundo termo da equação (4.2), que

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\dot{m}_{gv} \quad (4.1.21)$$

Substituindo-se (4.1.20) e (4.1.21) em (4.2) tem-se :

$$\frac{d}{dt} (\rho_B h_B A_B) - \dot{m}_{gv} = 0 \quad (4.1.22)$$

Desenvolvendo-se (4.1.22) obtém-se :

$$\rho_B h_B \frac{dA_B}{dt} + A_B \rho_B \frac{dh_B}{dt} + A_B h_B \frac{d\rho_B}{dt} - \dot{m}_{gv} = 0 \quad (4.1.23)$$

Como,

$$A_B = \pi (r - y)^2 \quad (4.1.24)$$

tem-se,

$$\frac{dA_B}{dt} = -2\pi (r - y) \frac{dy}{dt} \quad (4.1.25)$$

onde,

- r : Raio do tubo, m
y : Espessura do filme de líquido, m

Obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de gás substituindo-se (4.1.25) em (4.1.23).

$$A_B \rho_B \frac{dh_B}{dt} + A_B h_B \frac{d\rho_B}{dt} - 2\pi(r - y) \rho_B h_B \frac{dy}{dt} - \dot{m}_{gv} = 0 \quad (4.1.26)$$

Balanço de momento : Liao⁽⁸⁾ afirma, baseado em dados computacionais, que as componentes de aceleração e de momento de fluxo, representadas pelos dois primeiros termos da equação (4.4), são desprezíveis quando comparadas com a somatória das forças atuantes na bolha de gás. Considerando-se portanto apenas a resultante das forças na aplicação do balanço de momento na bolha de gás tem-se :

$$\sum F = A_B (P_{11} - P_{12}) - \frac{f_B \rho_B v_B^2 h_B A_B}{2D} - \rho_B g h_B A_B = 0 \quad (4.1.27)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m²
D : Diâmetro do tubo, m
 f_B : Fator de fricção da bolha de gás ;
g : Aceleração da gravidade, m/s²
 h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
 P_{11} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{12} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa
 v_B : Velocidade da bolha de gás, m/s
 ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m³

Diferenciando-se a equação (4.1.27) com relação ao tempo obtém-se, após alguns rearranjos, a formulação final para o balanço de momento da bolha de gás.

$$\frac{dP_{t2}}{dt} - \frac{dP_{t1}}{dt} + \left(\frac{f_B v_B^2 h_B}{2D} + h_B g \right) \frac{d\rho_B}{dt} + \frac{f_B \rho_B v_B h_B}{D} \frac{dv_B}{dt} + \left(\frac{f_B \rho_B v_B^2}{2D} + \rho_B g \right) \frac{dh_B}{dt} = 0$$

... (4.1.28)

Filme de líquido

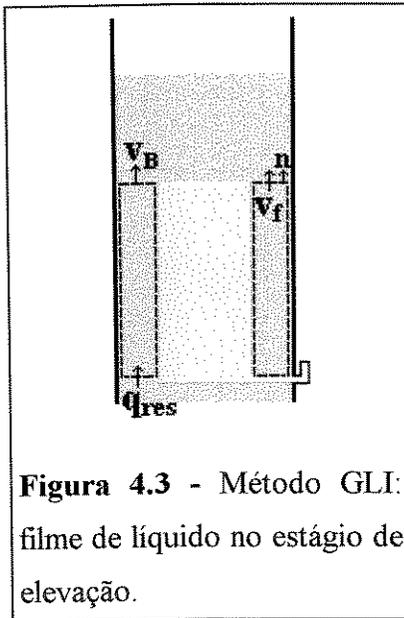


Figura 4.3 - Método GLI: filme de líquido no estágio de elevação.

Balanco de massa : aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com o filme de líquido (Figura 4.3) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos, que :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \rho_l \frac{d}{dt} [h_B (A_t - A_B)] \quad (4.1.29)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho_l (v_f - v_B) (A_t - A_B) - \rho_l q_{res} \quad (4.1.30)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
- q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s
- v_B : Velocidade da bolha de gás, m/s
- v_f : Velocidade do filme de líquido, m/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Substituindo-se (4.1.29) e (4.1.30) em (4.2) obtém-se

$$\rho_l \frac{d}{dt} [h_B (A_t - A_B)] + \rho_l (v_f - v_B) (A_t - A_B) - \rho_l q_{res} = 0 \quad (4.1.31)$$

As velocidades do líquido e da bolha de gás podem ser definidas como

$$v_l = \frac{dh_l}{dt} \quad (4.1.32)$$

$$v_B = \frac{dh_B}{dt} \quad (4.1.33)$$

onde,

h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
 v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s

Desenvolvendo-se (4.1.31) e utilizando-se (4.1.33) obtém-se, após alguns rearranjos, que

$$-h_B \frac{dA_B}{dt} + v_f (A_t - A_B) - q_{res} = 0 \quad (4.1.34)$$

Obtém-se a equação final para o balanço de massa no filme de líquido substituindo-se (4.1.25) na equação (4.1.34).

$$2\pi(r-y) h_B \frac{dy}{dt} + (A_t - A_B) v_f - q_{res} = 0 \quad (4.1.35)$$

Balanço de momento : Assim como faz Liao ⁽⁸⁾ o balanço de momento não é aplicado no filme de líquido. A equação derivada do balanço de momento é substituída pela equação (4.1.49) - relação empírica entre as velocidades da bolha de gás e da golfada de líquido. A substituição da equação (4.1.49) pela equação derivada da aplicação do balanço de momento fica como recomendação para versões futuras do modelo.

Golfada de líquido

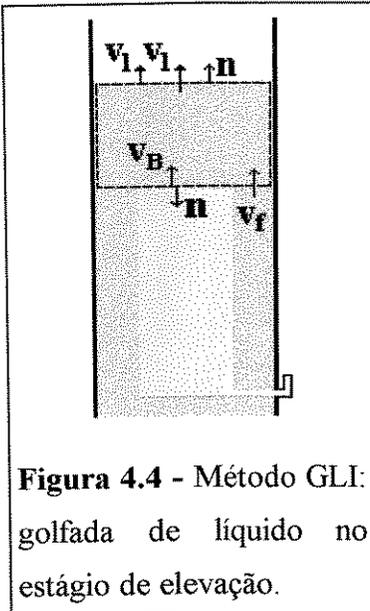


Figura 4.4 - Método GLI: golfada de líquido no estágio de elevação.

Balanço de massa : aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a golfada de líquido (Figura 4.4) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos, que :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \rho_l A_t \frac{d}{dt} (h_l - h_B) \\ &= \rho_l A_t (v_l - v_B) \end{aligned} \quad (4.1.36)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\rho_l (v_f - v_B) (A_t - A_B) \quad (4.1.37)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- v_B : Velocidade da bolha de gás, m/s
- v_f : Velocidade do filme de líquido, m/s
- v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Substituindo-se (4.1.36) e (4.1.37) em (4.2) obtém-se, para o balanço de massa na golfada de líquido, que

$$\rho_l A_t (v_l - v_B) - \rho_l (v_f - v_B) (A_t - A_B) = 0 \quad (4.1.38)$$

Desenvolvendo (4.1.38) e simplificando-se o resultado fica :

$$A_t v_l - v_f (A_t - A_B) - A_B v_B = 0 \quad (4.1.39)$$

Substituindo-se (4.1.32) e (4.1.33) em (4.1.39) obtém-se a formulação final do balanço de massa para a golfada de líquido.

$$A_t \frac{dh_l}{dt} - A_B \frac{dh_B}{dt} - (A_t - A_B) v_f = 0 \quad (4.1.40)$$

Balanço de momento : aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a golfada de líquido (Figura 4.4) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos, que :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV = \rho_l A_t \frac{d}{dt} [v_l (h_l - h_B)] \quad (4.1.41)$$

$$\int_{sc} \rho v (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\rho_l v_f (v_f - v_B) (A_t - A_B) \quad (4.1.42)$$

A resultante das forças na coluna de líquido é :

$$\sum F = A_t (P_{t2} - P_{t3}) - \frac{f_l \rho_l v_l^2 (h_l - h_B) A_t}{2D} - \rho_l g (h_l - h_B) A_t \quad \dots (4.1.43)$$

onde,

- A_t : Área da seção transversal do tubo, m
- D : Diâmetro do tubo, m
- f_l : Fator de fricção do líquido ;
- g : Aceleração da gravidade, m/s²
- h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
- h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
- P_{t2} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa
- P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
- v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m³

Substituindo-se (4.1.41), (4.1.42) e (4.1.43) na equação (4.4) tem-se, para o balanço de momento na golfada de líquido, que :

$$\rho_l A_t \frac{d}{dt} [v_l (h_l - h_B)] - \rho_l v_f (v_f - v_B) (A_t - A_B) = A_t (P_{t2} - P_{t3}) - \frac{f_l \rho_l v_l^2 (h_l - h_B) A_t}{2D} - \rho_l g (h_l - h_B) A_t \quad \dots (4.1.44)$$

Desenvolvendo e simplificando-se (4.1.44) obtém-se :

$$v_l \frac{dh_l}{dt} - v_l \frac{dh_B}{dt} + (h_l - h_B) \frac{dv_l}{dt} - v_f^2 \left(1 - \frac{A_B}{A_t}\right) + v_f v_B \left(1 - \frac{A_B}{A_t}\right) = \frac{(P_{t2} - P_{t3})}{\rho_l} - \frac{f_l v_l^2 (h_l - h_B)}{2D} - g (h_l - h_B) \quad \dots (4.1.45)$$

Substituindo-se (4.1.32), (4.1.33) e (4.1.39) em (4.1.45) obtém-se, após algumas simplificações, a equação final para o balanço de momento na golfada de líquido.

$$(h_l - h_B) \frac{dv_l}{dt} + v_l^2 \left(1 - \frac{A_B}{A_t}\right) v_f^2 - \frac{A_B}{A_t} v_B^2 - \frac{(P_{t2} - P_{t3})}{\rho_l} + g (h_l - h_B) + \frac{f_l v_l^2 (h_l - h_B)}{2D} = 0 \quad \dots (4.1.46)$$

Equações constitutivas

As equações do espaço anular - (4.1.6), (4.1.9), (4.1.17), (4.1.18) e (4.1.19) mais as equações (4.1.26), (4.1.28), (4.1.35), (4.1.40) e (4.1.46), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos demais componentes do sistema físico, formam um sistema de 10 equações com 13 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se a equação constitutiva (4.1.32), mais duas equações que, devido às suas particularidades, necessitam de maiores esclarecimentos.

A segunda equação constitutiva é obtida da equação de estado dos gases reais e parte da definição da densidade média da bolha de gás, cuja formulação correta é dada pela equação (4.1.47) abaixo.

$$\frac{d\rho_B}{dt} = \frac{1}{2} \frac{M}{Z_B R T_B} \left(\frac{dP_{t1}}{dt} + \frac{dP_{t2}}{dt} \right) \quad (4.1.47)$$

onde,

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
- R : Constante universal dos gases, J.mol⁻¹.K⁻¹
- P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- P_{t2} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa
- T_B : Temperatura média na bolha de gás, K
- Z_B : Fator de compressibilidade médio na bolha de gás
- ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m³

Porém como afirmado por Liao⁽⁸⁾ - e confirmado neste trabalho : “ ... cálculos utilizando a equação (4.1.47) mostraram que a pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift* (P_{t1}) aumenta rapidamente no estágio de produção da golfada, ao invés de apresentar o esperado decréscimo. Uma análise do modelo revelou que a utilização da pressão média na bolha de gás causa este inesperado e incorreto comportamento. Quando a golfada de líquido é produzida na superfície, durante o terceiro estágio, a pressão no topo da bolha de gás diminui rapidamente. Isto requer que a pressão no fundo da bolha de gás aumente na mesma razão que a pressão no topo diminui, de forma a manter o balanço de massa. Este resultado não concorda com as medidas experimentais da pressão no fundo da bolha de gás ... “

Para contornar este problema, não verificado na prática, Liao⁽⁸⁾ utiliza apenas a pressão no fundo da bolha de gás (P_{t1}) na equação de estado da bolha de gás (4.1.48).

$$\frac{dP_{t1}}{dt} = \frac{Z_{t1} R T_{t1}}{M} \frac{d\rho_B}{dt} \quad (4.1.48)$$

onde,

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
- R : Constante universal dos gases, J.mol⁻¹.K⁻¹
- P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- T_{t1} : Temperatura na profundidade da válvula de *gas lift*, K
- Z_{t1} : Fator de compressibilidade do gás a P_{t1} e T_{t1}.
- ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m³

A terceira equação constitutiva adotada fornece uma relação entre as velocidades da bolha de gás e da golfada de líquido.

$$v_B = a v_l + b \quad (4.1.49)$$

onde,

- a : Coeficiente de velocidade da bolha de gás
- b : Velocidade da bolha de gás em uma coluna líquida estacionária, m/s
- v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s
- v_B : Velocidade da bolha de gás, m/s

A formulação final é obtida diferenciando-se (4.1.49)

$$\frac{dv_B}{dt} = a \frac{dv_l}{dt} \quad (4.1.50)$$

O parâmetro **b** recebe o mesmo tratamento dado a um escoamento bifásico permanente, assumindo-se o seguinte valor :

$$b = 0.35 \sqrt{gD} \quad (4.1.51)$$

onde,

- D : Diâmetro do tubo, m
- g : Aceleração da gravidade, m/s^2

Já o coeficiente **a**, ainda objeto de pesquisas, assume valores que variam de acordo com a configuração do sistema. Liao⁽⁸⁾ compara os resultados de seu simulador com os resultados experimentais de Brown⁽³⁾, Brill⁽⁵⁾ e Neely⁽⁶⁾. Para que haja convergência nos resultados adota, para cada experimento, um valor diferente para o coeficiente **a**. Mostra-se, na tabela 4.2, os coeficientes adotados por Liao⁽⁸⁾, de acordo com cada experimento.

Tabela 4.2 : Coeficiente a.

Experimento	Valor
Brill	1.25
Brown	1.025
Neely	1.065

Dos três experimentos realizados o de Brown⁽³⁾ é o que se apresenta com a configuração física mais próxima daquela utilizada neste trabalho: poço com profundidade de 1800 metros, revestimento de 5 ½ in e coluna de produção de 2 3/8 in. Adota-se por isso, neste trabalho, o valor de 1.025 para o coeficiente a.

4.1.3. Estágio 3 - produção da golfada

Este estágio começa e termina respectivamente quando o topo e a base da golfada de líquido chegam à superfície. Assume-se que o fluido da formação continua a acumular-se no filme de líquido e que não há linha de surgência na superfície, ou seja, admite-se constante a pressão na cabeça do poço.

Apenas duas modificações ocorrem neste estágio em relação ao estágio anterior : a posição do topo da golfada de líquido permanece constante e igual a z_v , e uma perda de carga adicional passa a ocorrer em função da mudança na direção de fluxo - de vertical para horizontal.

Para considerar a perda de carga adicional soma-se, na equação (4.1.43), o termo de fricção dado pela equação (4.1.52).

$$\Delta F_f = \frac{K v_l^2 \rho_l A_t}{2} \quad (4.1.52)$$

onde,

- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- F_f : Componente de fricção, N
- v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

K : Constante, função da configuração na superfície - adotado igual a 0,6.

Fluxos de massa e de momento, respectivamente representados por $\rho_l v_l A_t$ e $\rho_l v_l v_l A_t$, passam então a ocorrer pela fronteira superior (fixa na superfície) do volume de controle. Pode-se demonstrar, para a golfada de líquido, que :

- ◆ a equação derivada do balanço de massa é a mesma do estágio anterior - (4.1.40) ;
- ◆ a equação final para o balanço de momento - (4.1.53) - pode ser obtida de (4.1.46) simplesmente substituindo-se, nesta última, h_1 por z_v e somando-se o termo de fricção $0,3 v^2$.

$$\left(z_v - h_B\right) \frac{dv}{dt} + v^2 - \left(1 - \frac{A_B}{A}\right) v^2 - \frac{A_B}{A} v_B^2 - \frac{(P_{12} - P_{13})}{\rho_l} + g(z_v - h_B) + \frac{f v^2 (z_v - h_B)}{2D} + 0,3 v^2 = 0$$

... (4.1.53)

O sistema de equações para este estágio é, portanto, o mesmo do estágio anterior, apenas substituindo-se (4.1.46) por (4.1.53).

4.1.4. Estágio 4 - decompressão do gás

Este estágio é dividido, conforme mostrado na tabela 4.1, em três fases distintas. Nas duas primeiras fases a velocidade do filme de líquido é positiva, ou seja, o fluxo é ascendente e, portanto, parte do filme é produzido na superfície. E, na terceira, a velocidade do filme é descendente, ou seja, parte do filme de líquido retorna para o fundo do poço (*fall - back*), incorporando-se ao líquido da formação.

Assume-se para todo o estágio que não ocorre troca de massa entre o núcleo de gás e o filme de líquido - não se considera, portanto, a presença de líquido disperso no núcleo gasoso, e que o filme de líquido continua a distribuir-se uniformemente ao longo da coluna de produção.

A nível de nomenclatura substitui-se o sufixo B - de bolha - pelo sufixo g - de gás, já que passa a se ter uma coluna de gás e não mais a bolha de gás característica dos estágios

anteriores. Continua mantendo-se o sufixo B, porém, quando se referir à área da coluna de gás - A_B .

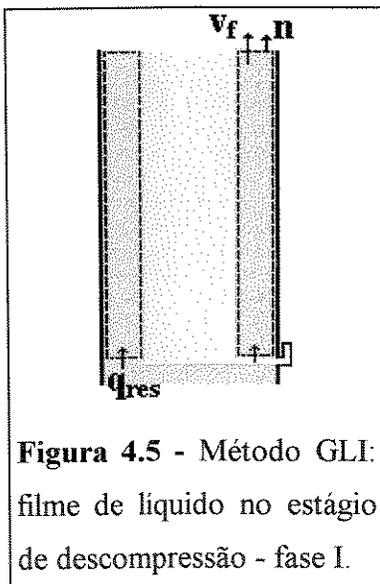
4.1.4.1. Fase I : descompressão até o fechamento da válvula de gas lift -

Nesta fase a válvula de *gas lift* permanece aberta, permitindo fluxo de gás do espaço anular para a coluna de produção. Continua assumindo-se, portanto, que o líquido do reservatório acumula-se no filme de líquido na parede da tubulação. Compõe o sistema físico : o espaço anular, o filme de líquido e a coluna de gás.

Espaço anular coluna - revestimento de produção

Continua valendo o mesmo sistema de equações do estágio anterior.

Filme de líquido



Balço de massa : aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com o filme de líquido (Figura 4.5) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \rho_l z_v \frac{d}{dt} (A_t - A_B) \\ &= -\rho_l z_v \frac{dA_B}{dt} \end{aligned} \quad (4.1.54)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\rho_l q_{res} + \rho_l v_f A_f \quad (4.1.55)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- A_f : Área da seção transversal do filme de líquido, m^2
- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s

- v_f : Velocidade do filme de líquido, m/s
 z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
 ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m³

Substituindo-se (4.1.25) em (4.1.54) tem-se, para o primeiro termo da equação (4.2) :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = 2\pi \rho_l z_v (r-y) \frac{dy}{dt} \quad (4.1.56)$$

Substituindo-se (4.1.55) e (4.1.56) em (4.2) obtém-se, após alguns rearranjos, a forma final do balanço de massa para o filme de líquido.

$$2\pi z_v (r-y) \frac{dy}{dt} + v_f A_f - q_{res} = 0 \quad (4.1.57)$$

Balanço de momento : aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com o filme de líquido (Figura 4.5) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV &= \rho_l \frac{d}{dt} [v_f A_f z_v] \\ &= \rho_l z_v \left(A_f \frac{dv_f}{dt} + v_f \frac{dA_f}{dt} \right) \end{aligned} \quad (4.1.58)$$

$$\begin{aligned} \int_{sc} \rho v (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA &= \rho_l v_f v_f A_f - \rho_l v_{res} v_{res} A_f \\ &= \rho_l A_f (v_f^2 - v_{res}^2) \end{aligned} \quad (4.1.59)$$

onde,

$$v_{res} = \frac{q_{res}}{A_f} \quad (4.1.60)$$

Tem-se, para a resultante das forças no filme de líquido :

$$\sum F = A_f (P_{11} - P_{12}) + \tau_i s_i z_v - \tau_w s_w z_v - \rho_l g A_f z_v \quad (4.1.61)$$

onde,

- A_f : Área da seção transversal do filme de líquido, m^2
 g : Aceleração da gravidade, m/s^2
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{ts} : Pressão no tubo na superfície, Pa
 q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s
 S_i : Área da superfície interna do filme de líquido, m^2
 S_w : Área da superfície externa do filme de líquido, m^2
 z_v : Profundidade da válvula de *gas lift, m
 v_f : Velocidade do filme de líquido, m/s
 v_{res} : Velocidade do líquido alimentado pelo reservatório, m/s
 ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3
 τ_i : Tensão superficial na parede interna do filme de líquido, Pa
 τ_w : Tensão superficial na parede externa do filme de líquido, Pa*

Substituindo-se (4.1.58), (4.1.59) e (4.1.61) em (4.4) tem-se :

$$\rho_l z_v \left(A_f \frac{dv_f}{dt} + v_f \frac{dA_f}{dt} \right) + \rho_l A_f (v_f^2 - v_{res}^2) = A_f (P_{t1} - P_{ts}) + \tau_i S_i z_v - \tau_w S_w z_v - \rho_l g A_f z_v \quad \dots (4.1.62)$$

onde,

$$\frac{dA_f}{dt} = 2\pi (r - y) \frac{dy}{dt} \quad (4.1.63)$$

$$S_i = 2\pi (r - y) \quad (4.1.64)$$

$$S_w = 2\pi r \quad (4.1.65)$$

$$\tau_i = \frac{1}{8} f_g \rho_g v_g^2 \quad (4.1.66)$$

$$\tau_w = \frac{1}{8} f_f \rho_l v_f^2 \quad (4.1.67)$$

Substituindo-se de (4.1.63) a (4.1.67) em (4.1.62) e dividindo-se por $\rho_l z_v$ obtém-se a equação abaixo para o balanço de momento no filme de líquido.

$$A_f \left(\frac{dv_f}{dt} + \frac{v_f^2 - v_{res}^2}{z_v} + g \right) + 2\pi (r - y) \left[v_f \frac{dy}{dt} - \frac{f_g \rho_g v_g^2}{8 \rho_l} \right] + \frac{f_f v_f^2 \pi r}{4} - \frac{A_f (P_{t1} - P_{ts})}{\rho_l z_v} = 0 \quad \dots (4.1.68)$$

A equação final para o balanço de momento no filme de líquido é obtida desprezando-se a componente do fluxo de momento.

$$A_f \left(\frac{dv_f}{dt} + g \right) + 2\pi(r-y) \left[v_f \frac{dy}{dt} - \frac{f_g \rho_g v_g^2}{8 \rho_l} \right] + \frac{f_f v_f^2 \pi r}{4} - \frac{A_f (P_{t1} - P_{ts})}{\rho_l z_v} = 0$$

... (4.1.69)

Coluna de gás

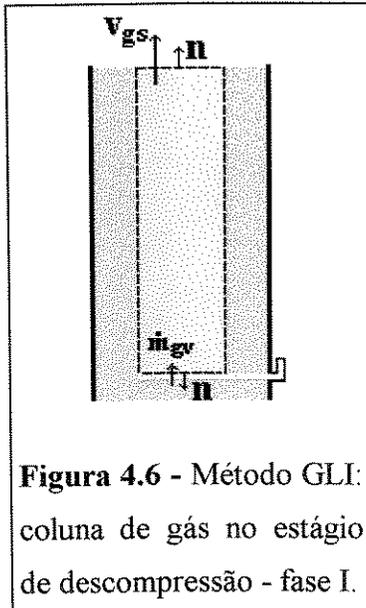


Figura 4.6 - Método GLI: coluna de gás no estágio de decompressão - fase I.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.6) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \frac{d}{dt} (A_B \rho_g z_v) \\ &= z_v A_B \frac{d\rho_g}{dt} + \rho_g z_v \frac{dA_B}{dt} \end{aligned} \quad (4.1.70)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho_{gs} v_{gs} A_B - \dot{m}_{gv} \quad (4.1.71)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
- z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
- ρ_g : Massa específica do gás, kg/m^3
- ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{ts} e T_{ts} , kg/m^3
- \dot{m}_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s

Obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de gás substituindo-se (4.1.70) e (4.1.71) em (4.2), e utilizando-se, no resultado, a definição dada pela equação (4.1.25).

$$A_B z_v \frac{d\rho_g}{dt} - 2\pi z_v \rho_g (r-y) \frac{dy}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} A_B - m_{gv} = 0 \quad (4.1.72)$$

Balanco de momento - a equação final do balanço de momento na coluna de gás é obtida fazendo-se, na equação (4.1.28) : $h_B = z_v$, $\frac{dh_B}{dt} = 0$ e $\frac{dP_{t2}}{dt} = 0$.

$$\frac{1}{z_v} \frac{dP_{t1}}{dt} - \left(\frac{f_g v_g^2}{2D} + g \right) \frac{d\rho_g}{dt} - \frac{f_g \rho_g v_g}{D} \frac{dv_g}{dt} = 0 \quad (4.1.73)$$

Equações constitutivas

As equações do espaço anular - (4.1.6), (4.1.9), (4.1.17), (4.1.18) e (4.1.19) - mais as equações (4.1.57), (4.1.69), (4.1.72) e (4.1.73), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos demais componentes do sistema físico, formam um sistema de 9 equações com 10 variáveis. Para fechar o sistema parte-se da equação constitutiva abaixo, obtida da equação de estado dos gases reais.

$$\rho_g = \frac{1}{2} \left(\frac{M P_{ts}}{Z_{ts} R T_{ts}} + \frac{M P_{t1}}{Z_{t1} R T_{t1}} \right) \quad (4.1.74)$$

onde,

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
- R : Constante universal dos gases, J.mol⁻¹.K⁻¹
- P_{ts} : Pressão no tubo na superfície, Pa
- P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- T_{ts} : Temperatura no tubo na superfície, K
- T_{t1} : Temperatura na profundidade da válvula de *gas lift*, K
- Z_{ts} : Fator de compressibilidade a P_{ts} e T_{ts}
- Z_{t1} : Fator de compressibilidade a P_{t1} e T_{t1}.
- ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³

Diferenciando e rearranjando-se (4.1.74) obtém-se a formulação final para a equação constitutiva

$$\frac{dP_{t1}}{dt} - 2 \frac{Z_{t1} R T_{t1}}{M} \frac{d\rho_g}{dt} = 0 \quad (4.1.75)$$

4.1.4.2. Fase 2 - decompressão até que $v_f = 0$

Com o fechamento da válvula de *gas lift* não há mais fluxo de gás no fundo do poço. A partir deste instante o fluido da formação passa a acumular-se, portanto, na coluna de produção. Assume-se, por hipótese, que o filme de líquido não se incorpora à coluna de líquido em formação - o comprimento do filme de líquido continua igual a z_v , e a área de fluxo para o fluido da formação é igual a A_B . Compõe o sistema físico : o filme de líquido e as colunas de gás e de líquido.

Filme de líquido



Figura 4.7 - Método GLI: filme de líquido no estágio de decompressão - fase II.

Balanço de massa - obtém-se a equação final para o balanço de massa no filme de líquido - equação (4.1.76), simplesmente fazendo-se $q_{res} = 0$ na equação (4.1.57), já que o fluido da formação não mais acumula-se no filme de líquido (Figura 4.7).

$$2\pi z_v (r - y) \frac{dy}{dt} + v_f A_f = 0 \quad (4.1.76)$$

Balanço de momento - nesta fase o filme de líquido faz interface também com a coluna de líquido que se acumula na coluna de produção. Desprezando-se porém a componente de atrito entre filme e coluna de líquido, devido às baixas velocidades

envolvidas, a equação final para o balanço de momento no filme de líquido é, nesta fase, bastante similar à equação (4.1.69). Altera-se apenas o comprimento da interface entre a coluna de gás e o filme de líquido, reduzido do comprimento da coluna de líquido - h_1 .

Aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com o filme de líquido (Figura 4.7) tem-se, para o primeiro termo da equação :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV &= \frac{d}{dt} [\rho_l v_f A_f z_v] \\ &= \rho_l z_v \left(A_f \frac{dv_f}{dt} + v_f \frac{dA_f}{dt} \right) \end{aligned} \quad (4.1.77)$$

A resultante das forças no filme de líquido, desprezando-se a componente de atrito entre filme e coluna de líquido, é

$$\sum F = A_f (P_{tl} - P_{ts}) + \tau_i s_i (z_v - h_l) - \tau_w s_w z_v - \rho_l g A_f z_v \quad \dots (4.1.78)$$

onde,

- A_f : Área da seção transversal do filme de líquido, m^2
- g : Aceleração da gravidade, m/s^2
- P_{tl} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- P_{ts} : Pressão no tubo na superfície, Pa
- S_i : Área da superfície interna do filme de líquido, m^2
- S_w : Área da superfície externa do filme de líquido, m^2
- z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
- v_f : Velocidade do filme de líquido, m/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3
- τ_i : Tensão superficial na parede interna do filme de líquido, Pa
- τ_w : Tensão superficial na parede externa do filme de líquido, Pa

Substituindo-se (4.1.77) e (4.1.78) em (4.4) e desprezando-se o segundo termo da equação tem-se :

$$\rho_l z_v \left(A_f \frac{dv_f}{dt} + v_f \frac{dA_f}{dt} \right) = A_f (P_{t1} - P_{ts}) + \tau_i s_i (z_v - h_l) - \tau_w s_w z_v - \rho_l g A_f z_v \quad \dots (4.1.79)$$

A equação final para o balanço de momento no filme de líquido é obtida substituindo-se de (4.1.63) a (4.1.67) em (4.1.79) e dividindo-se o resultado por $\rho_l z_v$.

$$A_f \left(\frac{dv_f}{dt} + g \right) + 2\pi(r - y) \left[v_f \frac{dy}{dt} - \frac{f_g \rho_g v_g^2 (z_v - h_l)}{8 \rho_l z_v} \right] + \frac{f_f v_f^2 \pi r}{4} - \frac{A_f (P_{t1} - P_{ts})}{\rho_l z_v} = 0 \quad \dots (4.1.80)$$

Coluna de gás

Nesta fase duas modificações ocorrem em relação à fase anterior: primeiro que não há alimentação de gás para dentro da coluna de gás, já que a válvula de *gas lift* encontra-se fechada ; e, segundo, que o comprimento da coluna de gás fica reduzido de h_1 - comprimento da coluna de líquido.

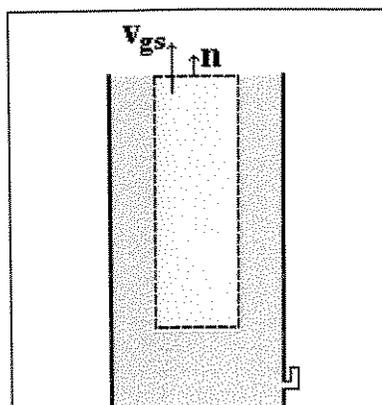


Figura 4.8 - Método GLI: coluna de gás no estágio de decompressão - fase II.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.8) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \frac{d}{dt} [A_B \rho_g (z_v - h_l)] \\ &= A_B (z_v - h_l) \frac{d\rho_g}{dt} + \rho_g (z_v - h_l) \frac{dA_B}{dt} - \rho_g A_B \frac{dh}{dt} \end{aligned} \quad (4.1.81)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho_{gs} v_{gs} A_B \quad (4.1.82)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m²
 h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
 v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
 z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
 ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³
 ρ_{gs} : Massa específica do gás na superfície, kg/m³

Substituindo-se (4.1.81) e (4.1.82) em (4.2) e utilizando-se (4.1.24) e (4.1.25) obtém-se, após alguns rearranjos, a equação final para o balanço de massa na coluna de gás :

$$(z_v - h) \left(\frac{d\rho_g}{dt} - \frac{2\rho_g}{(r-y)} \frac{dy}{dt} \right) - \rho_g \frac{dh_l}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} = 0 \quad (4.1.83)$$

Balanço de momento - a equação final do balanço de momento na coluna de gás é obtida fazendo-se, na equação (4.1.28) : $h_B = z_v - h_l$, $\frac{dh_B}{dt} = -\frac{dh_l}{dt}$ e $\frac{dP_{t2}}{dt} = 0$. Substitui-se, além disso, P_{t1} por P_{t3} , já que nesta fase admite-se uma configuração do escoamento onde a coluna de gás encontra-se acima da coluna de líquido.

$$\frac{dP_{t3}}{dt} - \left(\frac{f_g v_g^2 (z_v - h)}{2D} + (z_v - h) g \right) \frac{d\rho_g}{dt} - \frac{f_g \rho_g v_g (z_v - h)}{D} \frac{dv_g}{dt} + \left(\frac{f_g \rho_g v_g^2}{2D} + \rho_g g \right) \frac{dh_l}{dt} = 0$$

... (4.1.84)

Coluna de líquido

A coluna de líquido constitui-se apenas do líquido fornecido pela formação já que, nesta fase, o líquido do filme na parede da tubulação continua a ser produzido na superfície.

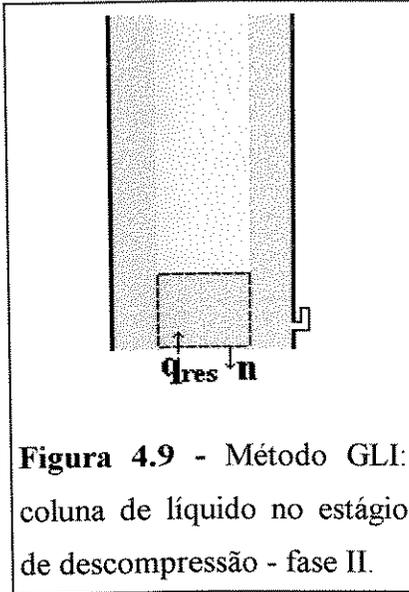


Figura 4.9 - Método GLI: coluna de líquido no estágio de descompressão - fase II.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.9) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \frac{d}{dt} (\rho_l A_B h_l) \\ &= \rho_l h_l \frac{dA_B}{dt} + \rho_l A_B \frac{dh_l}{dt} \end{aligned} \quad (4.1.85)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \rho_l q_{res} \quad (4.1.86)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
- q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Substituindo-se (4.1.85) e (4.1.86) em (4.2) e utilizando-se (4.1.25) obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de líquido :

$$A_B \frac{dh_l}{dt} - 2\pi(r-y)h_l \frac{dy}{dt} - q_{res} = 0 \quad (4.1.87)$$

Balanço de momento - considerando-se apenas as componentes de pressão e gravitacional tem-se, para o balanço de momento na coluna de líquido, que

$$A_B(P_{t1} - P_{t3}) - \rho_l g h_l A_B = 0 \quad (4.1.88)$$

onde,

- A_B : Área da bolha de gás, m

- g : Aceleração da gravidade, m/s^2
 h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

A equação final para o balanço de momento na coluna de líquido é obtida reordenando-se e diferenciando-se a equação (4.1.88).

$$\frac{dP_{t1}}{dt} - \frac{dP_{t3}}{dt} - \rho_l g \frac{dh_l}{dt} = 0 \quad (4.1.89)$$

Equações constitutivas

As equações (4.1.76), (4.1.80), (4.1.83), (4.1.84), (4.1.87) e (4.1.89), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 6 equações com 7 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se a equação constitutiva abaixo, obtida da equação de estado dos gases reais.

$$\frac{dP_{t3}}{dt} - 2 \frac{Z_{t3} R T_{t3}}{M} \frac{d\rho_g}{dt} = 0 \quad (4.1.90)$$

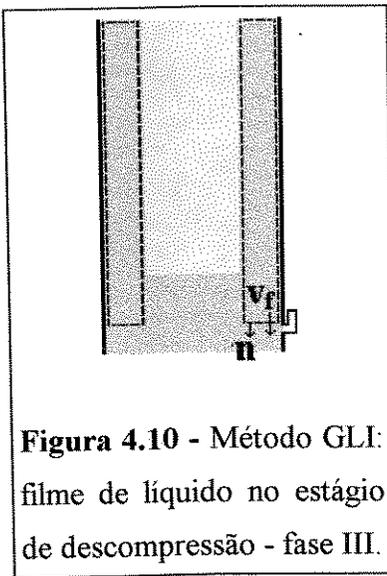
onde,

- P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 T_{t3} : Temperatura no topo da golfada de líquido, K
 Z_{t3} : Fator de compressibilidade a P_{t3} e T_{t3} .
 ρ_g : Massa específica do gás, kg/m^3

4.1.4.3. Fase 3 - descompressão final

Inicia-se nesta fase o retorno de parte do filme de líquido para o fundo do poço. Compõe o sistema físico : o núcleo de gás, o filme e a coluna de líquido.

Filme de líquido



Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com o filme de líquido (Figura 4.10) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \rho_l z_v \frac{dA_f}{dt} \quad (4.1.91)$$

$$\int_{sc} \rho(\bar{v}_r \cdot \bar{n}) dA = \rho_l q_f \quad (4.1.92)$$

Substituindo-se (4.1.63) em (4.1.91) tem-se, para o primeiro termo do balanço de massa

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = 2\pi \rho_l z_v (r-y) \frac{dy}{dt} \quad (4.1.93)$$

Obtém-se a equação final para o balanço de massa no filme de líquido substituindo-se (4.1.92) e (4.1.93) em (4.2).

$$2\pi z_v (r-y) \frac{dy}{dt} + q_f = 0, \quad (4.1.94)$$

A vazão do filme de líquido é calculada utilizando-se a equação abaixo, cuja demonstração encontra-se no apêndice A.

$$q_f = \frac{\rho_l g (2\pi r) y^3}{3\mu_l} \quad (4.1.95)$$

onde,

- g : Aceleração da gravidade, m/s²
q_f : Vazão do filme de líquido, m³/s
r : Raio do tubo, m
y : Espessura do filme de líquido, m
ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m³
μ_l : Viscosidade do líquido, Pa.s

Coluna de gás

Balanço de massa - continua valendo a equação (4.1.83) desenvolvida para o balanço de massa da fase anterior. Como nesta fase a variável de controle é a pressão na base da coluna de gás (P₁₃), esta equação é rescrita em função da densidade do gás neste ponto (ρ_{gt3}). Tem-se, da definição da densidade média, que :

$$\rho_g = \frac{1}{2} (\rho_{gt3} + \rho_{gs}) \quad (4.1.96)$$

onde,

- ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³ ;
ρ_{gt3} : Massa específica do gás a P₁₃ e T₁₃, kg/m³ ;
ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{1s} e T_{1s}, kg/m³ ;

Obtém-se a formulação final para o balanço de massa da coluna de gás simplesmente substituindo-se (4.1.96) na equação (4.1.83).

$$0.5(z_v - h_l) \frac{d\rho_{gt3}}{dt} - 0.5(\rho_{gs} + \rho_{gt3}) \frac{dh_l}{dt} - \frac{(\rho_{gt3} + \rho_{gs})(z_v - h_l)}{(r - y)} \frac{dy}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} = 0 \quad (4.1.97)$$

Balanço de momento - considerando-se apenas as componente de pressão, atrito e gravidade tem-se, para o balanço de momento na coluna de gás :

$$A_B (P_{t3} - P_{ts}) - \frac{f_g \rho_g v_g^2 (z_v - h_l) A_B}{2 D} - \rho_g g A_B (z_v - h_l) = 0 \quad (4.1.98)$$

Determinando-se a velocidade média do gás - v_g - a partir de (4.1.98) tem-se :

$$v_g = \sqrt{\frac{2 D}{f_g} \left[\frac{(P_{t3} - P_{ts})}{\rho_g (z_v - h_l)} - g \right]} \quad (4.1.99)$$

sendo :

$$\rho_{gs} = \frac{M P_{ts}}{Z_{ts} R T_{ts}} \quad (4.1.100)$$

$$\rho_{gt3} = \frac{M P_{t3}}{Z_{t3} R T_{t3}} \quad (4.1.101)$$

$$v_g = 0.5 v_{gs} \quad (4.1.102)$$

onde,

A_B : Área da bolha de gás, m

D : Diâmetro do tubo, m

f_g : Fator de fricção do gás ;

g : Aceleração da gravidade, m/s²

h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m

P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa

P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa

v_g : Velocidade média da coluna de gás, m/s

v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s

z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*,

ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³

ρ_{gT3} : Massa específica do gás a P_{T3} e T_{T3} , kg/m³

Substituindo-se (4.1.99) em (4.1.102) obtém-se a velocidade do gás na superfície.

$$v_{gs} = 2 \sqrt{\frac{2 D}{f_g} \left(\frac{(P_{T3} - P_{Ts})}{\rho_g (z_v - h)} - g \right)} \quad (4.1.103)$$

Coluna de líquido

Nesta fase a coluna de líquido passa a ser composta tanto pelo líquido proveniente da formação quanto pelo líquido do filme que retorna para o fundo do poço - *fall back*.

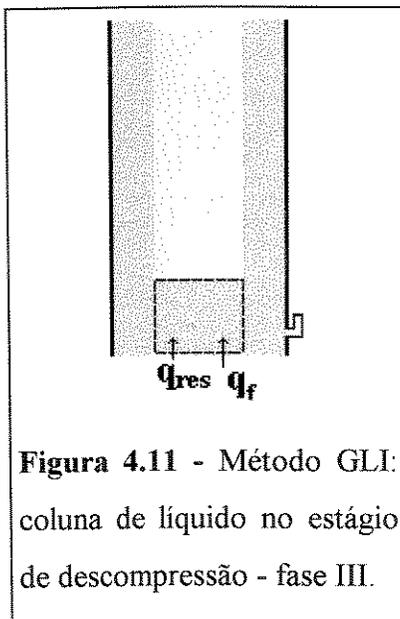


Figura 4.11 - Método GLI: coluna de líquido no estágio de descompressão - fase III.

Balanço de massa : aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.11) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \rho_l \frac{d}{dt} (A_B h_l) \\ &= \rho_l A_B \frac{dh_l}{dt} + \rho_l h_l \frac{dA_B}{dt} \end{aligned} \quad (4.1.104)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \rho_l q_f - \rho_l q_{res}, \quad (4.1.105)$$

onde,

A_B : Área da bolha de gás, m^2

h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m

q_f : Vazão do filme de líquido, m^3/s

q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s

ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Substituindo-se (4.1.04) e (4.1.105) em (4.2) obtém-se, para o balanço de massa na coluna de líquido

$$A_B \frac{dh_l}{dt} + h_l \frac{dA_B}{dt} - q_f - q_{res} = 0 \quad (4.1.106)$$

A equação final para o balanço de massa na coluna de líquido é obtida substituindo-se (4.1.25) em (4.1.106).

$$A_B \frac{dh_l}{dt} - 2\pi (r - y) h_l \frac{dy}{dt} - q_f - q_{res} = 0 \quad (4.1.107)$$

Balanço de momento - continua valendo a equação (4.1.89), derivada do balanço de momento para a fase anterior.

Equações constitutivas

As equações (4.1.89), (4.1.94), (4.1.97) e (4.1.107), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 4 equações com 5 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se a equação constitutiva abaixo, obtida da equação de estado dos gases reais.

$$\frac{dP_{t3}}{dt} - \frac{Z_{t3} R T_{t3}}{M} \frac{d\rho_{gt3}}{dt} = 0 \quad (4.1.108)$$

onde,

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
 R : Constante universal dos gases, J.mol⁻¹.K⁻¹
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 T_{t3} : Temperatura no topo da coluna de líquido, K
 Z_{t3} : Fator de compressibilidade a P_{t3} e T_{t3} .
 ρ_{gt3} : Massa específica do gás a P_{t3} e T_{t3} , kg/m³

4.1.5. Estágio 5 - alimentação

Neste estágio líquido da formação e do filme de líquido acumulam-se no fundo do poço formando uma nova coluna de líquido. Compõe o sistema físico : o filme e a coluna de líquido.

A menos da equação (4.1.89), substituída pela equação (4.1.109), o sistema de equações constitui-se das mesmas equações desenvolvidas para estes dois componentes na fase 3 do estágio anterior.

$$\frac{dP_{t1}}{dt} - \rho_l g \frac{dh_l}{dt} = 0 \quad (4.1.109)$$

onde,

- g : Aceleração da gravidade, m/s²
 h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m³

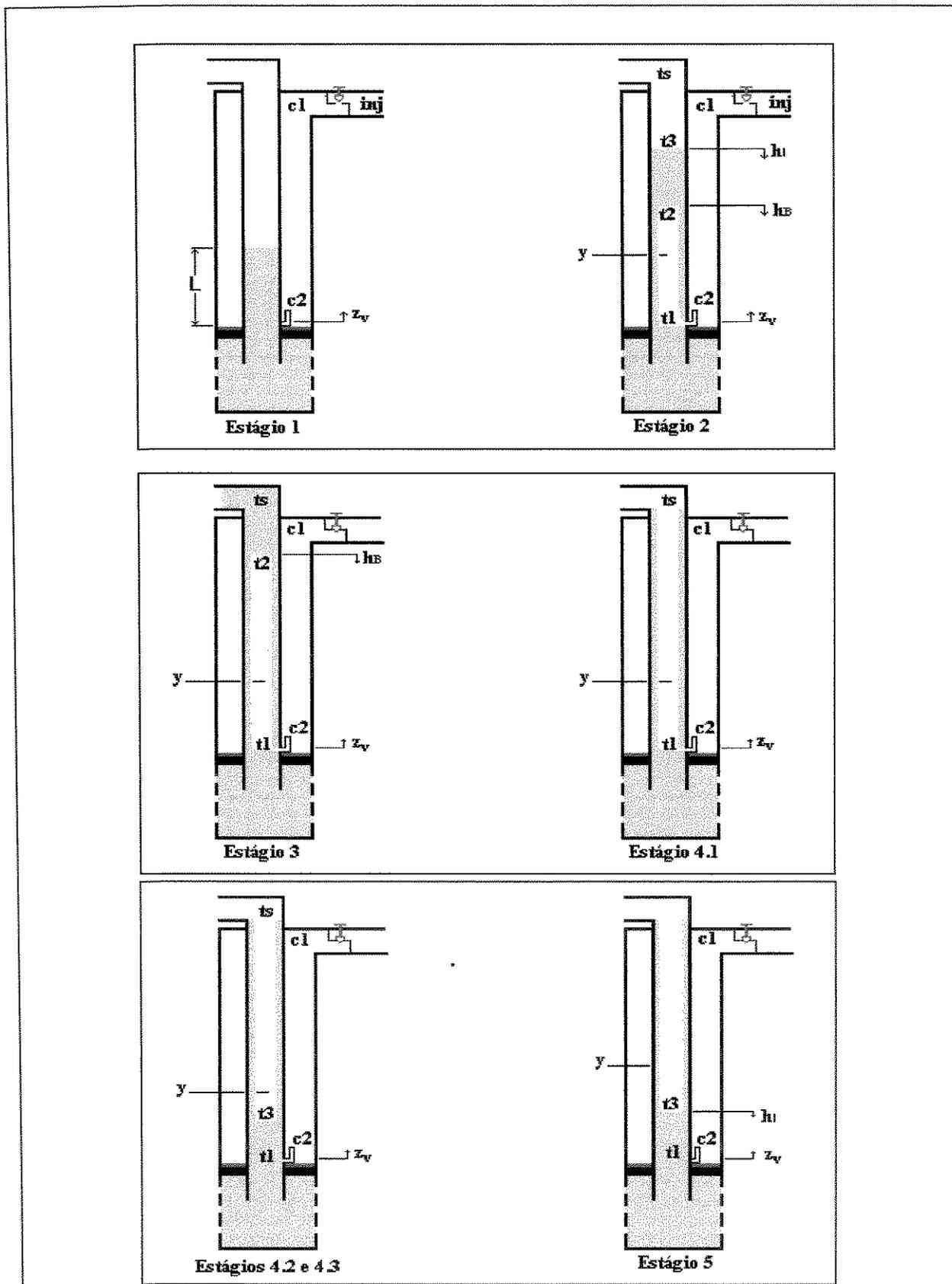


Figura 4.12 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método *Gas Lift* Intermitente Convencional (GLI).

4.2 Modelo II : *Gas lift* intermitente com pistão

A diferença básica entre este tipo de instalação e o convencional consiste, como já observado, na presença de um pistão metálico entre o gás injetado e a golfada de líquido produzida, com o objetivo de reduzir, ou mesmo eliminar, o *fall-back* de líquido. Os modelos diferem entre si, portanto, apenas na forma adotada para modelar o *fall-back* de líquido na instalação com pistão. Neste trabalho assume-se *fall-back* de líquido igual a zero. Assumindo-se esta hipótese as seguintes alterações ocorrem em relação ao modelo desenvolvido para o *gas lift* intermitente convencional :

1. não mais existe filme de líquido na parede da tubulação ;
2. a área da bolha - A_B é igual à área do tubo - A_t ;
3. não mais existe a fase 2 do estágio 4 ;
4. o líquido da formação passa a acumular-se na coluna de produção, para qualquer estágio do ciclo de produção, sem sofrer interferência do gás circulante.

As equações para este método são, portanto, obtidas daquelas para o *gas lift* intermitente convencional fazendo-se $A_B = A_t$ e $y = 0$. Além disso substitui-se a variável h_B (altura do topo da bolha de gás) pela variável h_p - altura do pistão.

4.2.1 Estágio 1 - injeção de gás

Mesmo sistema de equações obtido para este estágio no *gas lift* intermitente convencional : equações (4.1.6), (4.1.10), (4.1.17), (4.1.18) e (4.1.19).

4.2.2 Estágio 2 - elevação da golfada

Compõe o sistema físico : o espaço anular, a bolha de gás, a golfada de líquido e a coluna estática de líquido.

Espaço anular coluna - revestimento de produção

Mesmo sistema de equações obtido para este estágio no método *Gas Lift* Intermitente : (4.1.6), (4.1.9), (4.1.17), (4.1.18) e (4.1.19).

Golfada de líquido

Balanço de massa - fazendo-se $A_B = A_t$ na equação (4.1.40) tem-se, para o balanço de massa na golfada de líquido :

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{dh_B}{dt} \quad (4.2.1)$$

onde,

- h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
 h_i : Altura do topo da golfada de líquido, m

A equação (4.2.1) mostra que são iguais as velocidades da bolha de gás e da golfada de líquido. E, em consequência, a velocidade do pistão. Substitui-se nas equações seguintes, portanto, v_B (velocidade da bolha de gás) e v_l (velocidade da golfada de líquido) por v_p (velocidade do pistão). Além disso, como o pistão e o topo da golfada estão, em termos práticos, na mesma posição, substitui-se a variável h_B (posição do topo da bolha) pela variável h_p - posição do pistão.

Balanço de momento - fazendo-se $A_B = A_t$, $v_f = 0$, utilizando-se (4.2.1) e adicionando-se a pressão P_{pis} (para considerar o peso do pistão) na equação (4.1.46), tem-se, para o balanço de momento na golfada de líquido :

$$(h-h_p) \frac{dv_p}{dt} - \frac{(P_l - P_s - P_{ps})}{\rho_l} + g(h-h_p) + \frac{f v_p^2 (h-h_p)}{2D} = 0 \quad (4.2.2)$$

onde,

- h_p : Altura do pistão, m
 h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
 P_{t2} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 P_{pis} : Pressão devido ao peso do pistão, Pa
 v_p : Velocidade do pistão, m/s

Bolha de gás

Balanço de massa - fazendo-se, na equação (4.1.26), $A_B = A_t$ e $y = 0$ tem-se, para o balanço de massa na bolha de gás :

$$A_t \rho_B \frac{dh_p}{dt} + A_t h_p \frac{d\rho_B}{dt} - m_{gv} = 0 \quad (4.2.3)$$

onde,

- h_p : Altura do pistão, m
 m_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
 ρ_B : Massa específica do gás, kg/m³

Balanço de momento - substituindo-se, na equação (4.1.28), P_{t1} por P_{gt1} tem-se, para o balanço de momento na bolha de gás :

$$\frac{dP_{t2}}{dt} - \frac{dP_{gt1}}{dt} + \left(\frac{f_B v_p^2 h_p}{2D} + h_p g \right) \frac{d\rho_B}{dt} + \frac{f_B \rho_B v_p h_p}{D} \frac{dv_p}{dt} + \left(\frac{f_B \rho_B v_p^2}{2D} + \rho_B g \right) \frac{dh_p}{dt} = 0 \quad (4.2.4)$$

onde,

- P_{gt1} : Pressão no tubo - considerando apenas a coluna de gás - na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{t2} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa
 f_B : Fator de fricção do gás ;

Coluna de líquido

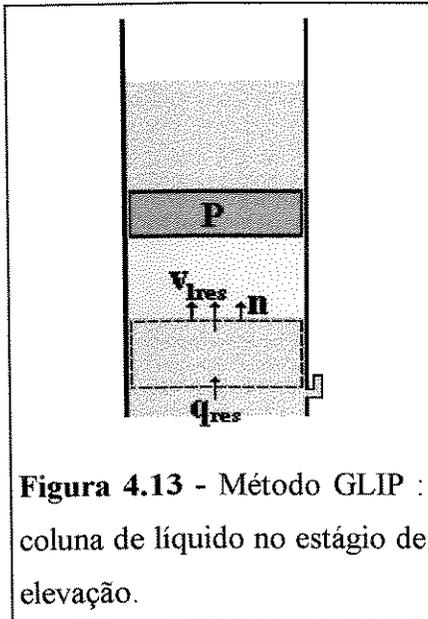


Figura 4.13 - Método GLIP :
coluna de líquido no estágio de elevação.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.13) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos, que :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \rho_l A_t \frac{dh_{lres}}{dt} \quad (4.2.5)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\rho_l q_{res} \quad (4.2.6)$$

onde,

h_{lres} : Altura da coluna de líquido alimentado pelo reservatório, m

q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s

Substituindo-se (4.2.5) e (4.2.6) em (4.2) obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de líquido.

$$\frac{dh_{lres}}{dt} - \frac{q_{res}}{A_t} = 0 \quad (4.2.7)$$

Balanço de momento - desprezando-se as componentes de aceleração, de atrito e de fluxo de momento tem-se :

$$\sum F = A_t (P_{t1} - P_{gt1}) - \rho_l g h_{lres} A_t = 0 \quad (4.2.8)$$

onde,

P_{gt1} : Pressão no tubo - considerando apenas a coluna de gás - na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa

P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa

h_{lres} : Altura da coluna de líquido alimentado pelo reservatório, m

Rearranjando-se a equação (4.2.8) e derivando obtém-se a equação final para o balanço de momento na coluna de líquido, conforme equação (4.2.9).

$$\frac{dP_{t1}}{dt} - \frac{dP_{gt1}}{dt} - \rho_l g \frac{dh_{lres}}{dt} = 0 \quad (4.2.9)$$

Equações constitutivas

As equações do espaço anular - (4.1.6), (4.1.9), (4.1.17), (4.1.18) e (4.1.19), mais as equações (4.2.1), (4.2.2), (4.2.3), (4.2.4), (4.2.7) e (4.2.9), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos demais componentes do sistema físico, formam um sistema de 11 equações com 13 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se as duas equações constitutivas abaixo relacionadas : a primeira parte da velocidade como taxa de variação da posição; e a segunda, obtida da equação de estado dos gases reais, da definição da densidade média da bolha de gás. Assim como no método intermitente convencional utiliza-se pressão no gás à jusante da válvula de *gas lift*, e não a pressão média, para o cálculo da densidade média da bolha de gás.

$$v_p = \frac{dh_p}{dt} \quad (4.2.10)$$

$$\frac{dP_{gt1}}{dt} = \frac{Z_{t1} R T_{t1}}{M} \frac{d\rho_B}{dt} \quad (4.2.11)$$

onde,

P_{gt1} : Pressão no tubo - considerando apenas a coluna de gás - na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa

T_{t1} : Temperatura na profundidade da válvula de *gas lift*, K

Z_{t1} : Fator de compressibilidade a P_{gt1} e T_{t1} .

ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m^3

4.2.3 Estágio 3 - produção da golfada

Mesmo sistema de equações do estágio 2, apenas substituindo-se a equação (4.2.4) pela equação (4.2.12) abaixo.

$$(z-h_b) \frac{dh_b}{dt} - \frac{(P_{t2}-P_{ts})}{\rho} + g(z-h_b) + \frac{f v_p^2 (z-h_b)}{2D} + 0.3 v_p^2 = 0 \quad (4.2.12)$$

onde,

P_{t2} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa

P_{ts} : Pressão no tubo na superfície, Pa

4.2.4 Estágio 4 - decompressão do gás

Com a produção da golfada de líquido a coluna de produção reduz-se apenas à coluna de gás e à coluna de líquido que se forma devido ao fluido da formação. Assim como no método intermitente convencional este estágio é dividido em duas fases : até o fechamento da válvula de *gas lift* e após o fechamento da válvula de *gas lift* até a decompressão total.

4.2.4.1 Fase 1 - até o fechamento da válvula de *gas lift*

Assim como nos estágios anteriores supõe-se que o fluido da formação acumula-se na coluna de produção sem interferência do gás circulante. Compõe o sistema físico : a coluna de gás e a coluna estática de líquido.

Coluna de gás

Balanco de massa - fazendo-se, na equação (4.1.72), $A_B = A_t$ e $y = 0$ tem-se, para o balanço de massa na coluna de gás :

$$A_t z_v \frac{d\rho_g}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} A_t - m_{gv} = 0 \quad (4.2.13)$$

onde,

- m_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
 v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
 ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³
 ρ_{gs} : Massa específica do gás na superfície, kg/m³

Balanço de momento - fazendo-se, na equação (4.2.4), $h_p = z_p$, $\frac{dh_p}{dt} = 0$ e $\frac{dP_{12}}{dt} = 0$

tem-se, para o balanço de momento na coluna de gás :

$$\frac{1}{z_v} \frac{dP_{gt1}}{dt} - \left(\frac{f_g v_g^2}{2D} + g \right) \frac{d\rho_g}{dt} - \frac{f_g \rho_g v_g}{D} \frac{dv_g}{dt} = 0 \quad (4.2.14)$$

onde,

- f_g : Fator de fricção do gás ;
 P_{gt1} : Pressão no tubo - considerando apenas a coluna de gás - na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 v_g : Velocidade do gás, m/s

Coluna de líquido

Continuam valendo as mesmas equações desenvolvidas para o estágio anterior : (4.2.7) e (4.2.9).

Equações constitutivas

As equações do espaço anular - (4.1.6), (4.1.9), (4.1.17), (4.1.18) e (4.1.19) mais as equações (4.2.7), (4.2.9), (4.2.13) e (4.2.14), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos demais componentes do sistema físico, formam um sistema de 9 equações com 10 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se a equação constitutiva abaixo, obtida da equação de estado dos gases reais, e que parte da definição da densidade média na bolha de gás.

$$\frac{dP_{gt1}}{dt} = \frac{2Z_g R T_g}{M} \frac{d\rho_g}{dt} \quad (4.2.15)$$

onde,

- P_{gt1} : Pressão no tubo - considerando apenas a coluna de gás - na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 T_g : Temperatura média na coluna de gás, K
 Z_g : Fator de compressibilidade médio na coluna de gás
 ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³

4.2.4.2 Fase 2 - até que pressão no fundo retorne ao seu valor inicial

Com o fechamento da válvula de *gas lift* assume-se que o líquido passa a escoar como um tampão, com toda a coluna de gás acima dele. Ou seja, toda a massa de gás encontra-se agora entre o topo da coluna de líquido e a superfície. Compõe o sistema físico : a coluna de gás e a coluna estática de líquido.

Coluna de gás

Balanço de massa - fazendo-se, na equação (4.1.97), $\frac{dy}{dt} = 0$ tem-se, para o balanço de massa na coluna de gás :

$$0.5(z_v - h_{ires}) \frac{d\rho_{gt1}}{dt} - 0.5(\rho_{gt1} + \rho_{gs}) \frac{dh_{ires}}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} = 0 \quad (4.2.16)$$

onde,

- h_{ires} : Altura da coluna de líquido alimentado pelo reservatório, m
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 T_{t3} : Temperatura no topo da coluna de líquido, K
 v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
 z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
 ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{t3} e T_{t3} , kg/m³
 ρ_{gt3} : Massa específica do gás a P_{gt3} e T_{t3} , kg/m³

A equação para a velocidade na superfície é obtida a partir do balanço de momento, como já demonstrado no *gas lift* intermitente convencional, e repetida abaixo :

$$v_{gs} = 2 \sqrt{\frac{2D}{f_g} \left(\frac{(P_{t3} - P_{ts})}{\rho_g(z_v - h_{ires})} - g \right)} \quad (4.2.17)$$

onde,

- f_g : Fator de fricção do gás
 P_{ts} : Pressão no tubo na superfície, Pa

Coluna de líquido

Continuam valendo as mesmas equações desenvolvidas para o estágio anterior - (4.2.7) e (4.2.9), substituindo-se, nesta última, P_{gt1} por P_{t3} .

Equações constitutivas

As equações (4.2.7), (4.2.9) e (4.2.16), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 3 equações com 4 variáveis : h_{ires} , P_{t3} , P_{t1} e ρ_{gt3} . Para fechar o sistema utiliza-se a equação constitutiva abaixo, obtida da equação de estado dos gases reais

$$\frac{dP_{t3}}{dt} = \frac{Z_{t3} R T_{t3}}{M} \frac{d\rho_{gt3}}{dt} \quad (4.2.19)$$

4.2.5 Estágio 5 - Alimentação

Compõe o sistema físico apenas a coluna estática de líquido. Continuam valendo as equações (4.2.7) e (4.1.109), respectivamente obtidas com a aplicação dos balanços de massa e de momento na coluna de líquido.

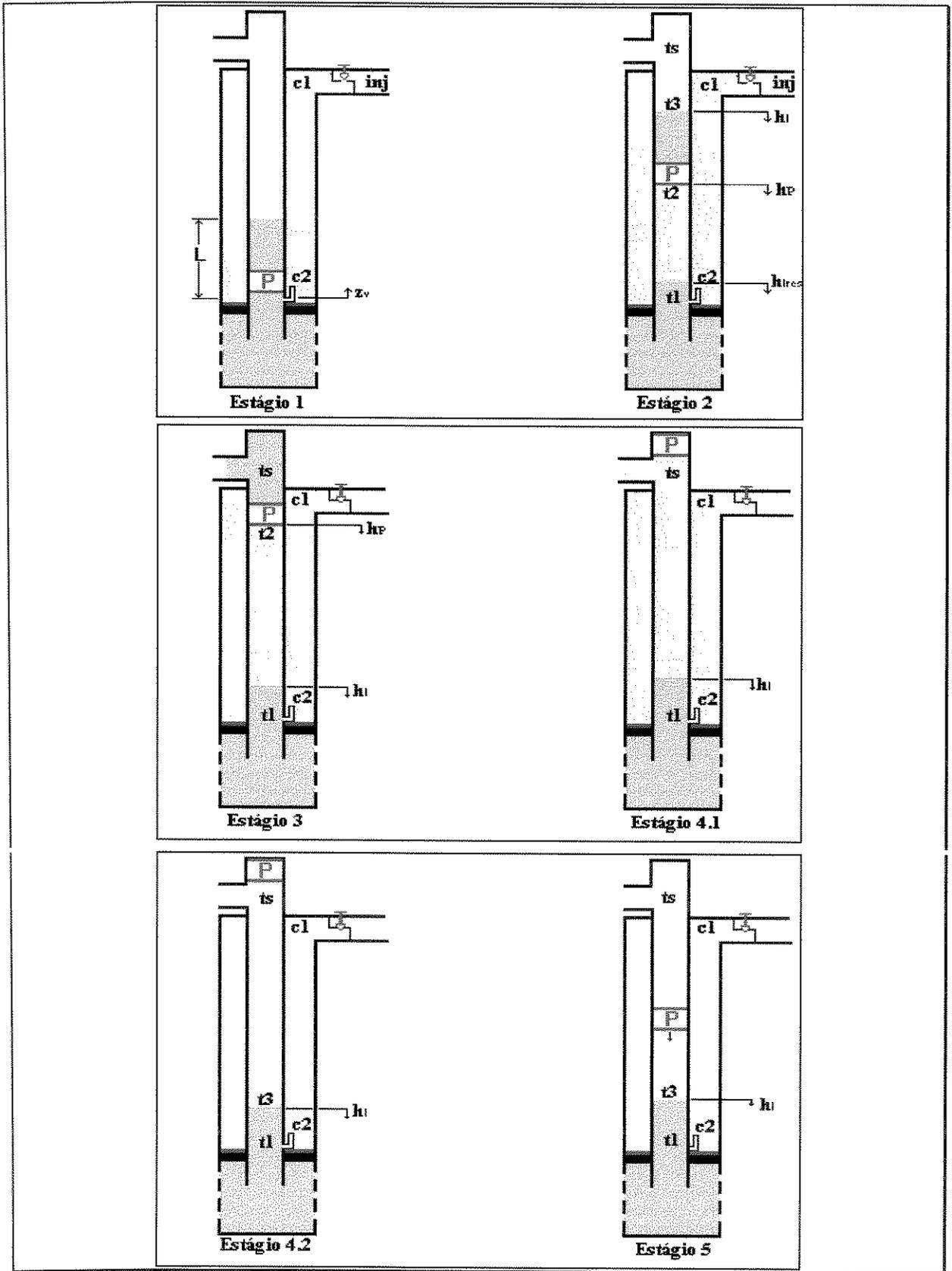


Figura 4.14 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método *Gas Lift Intermitente com Pistão* - (GLIP).

4.3 MODELO III : *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação

Assim como nos métodos anteriores o ciclo de produção foi dividido em estágios, conforme relacionados na Tabela 4.3 abaixo. A principal diferença entre este método e o intermitente convencional consiste no estágio de transferência do líquido do espaço anular para a coluna de produção.

Tabela 4.3 - Estágios do ciclo de produção para o método Intermitente com Câmara de Acumulação

Estágio	DESCRIÇÃO	INICIO	FIM
1	Injeção de gás	abertura da válvula motora na superfície.	abertura da válvula de <i>gas lift</i> .
2	Transferência de líquido	abertura da válvula de <i>gas lift</i> .	início da injeção de gás na coluna de produção.
2	Elevação da golfada	início da injeção de gás na coluna de produção.	chegada do topo da golfada à superfície
3	Produção da golfada	chegada do topo da golfada à superfície	chegada da base da golfada à superfície.
4	Descompressão	chegada da base da golfada à superfície	pressão do gás no fundo igual ao seu valor inicial
4.1	- FASE 1 -	chegada da base da golfada à superfície	fechamento da válvula de <i>gas lift</i> .
4.2	- FASE 2 -	fechamento da válvula de <i>gas lift</i>	velocidade do filme de líquido igual a zero.
4.3	- FASE 3 -	velocidade do filme de líquido igual a zero.	pressão do gás no fundo igual ao seu valor inicial
5	Alimentação	pressão do gás no fundo igual ao seu valor inicial	comprimento da coluna de líquido igual ao valor inicial.

4.3.1 Estágio 1 - injeção de gás

Neste estágio gás é injetado no revestimento de produção, através da válvula motora instalada na superfície, até que a pressão no revestimento atinja a pressão de abertura da válvula de *gas lift*. Compõe o sistema físico apenas o espaço anular coluna - revestimento de produção.

O sistema de equações é o mesmo do método intermitente convencional. Relaciona-se, abaixo, as equações que compõem o sistema para este estágio do ciclo de produção.

$$\frac{V_{tc}}{2} \left(\frac{d\rho_{c1}}{dt} + \frac{d\rho_{c2}}{dt} \right) - \frac{dm_{tc}}{dt} = 0 \quad (4.3.1)$$

$$\frac{dm_{tc}}{dt} - m_{gs} = 0 \quad (4.3.2)$$

$$\frac{dP_{c2}}{dt} - e^{\frac{Mg z_v}{Z_{tc} R T_{tc}}} \frac{dP_{c1}}{dt} = 0 \quad (4.3.3)$$

$$\frac{dP_{c1}}{dt} - \frac{Z_{c1} R T_{c1}}{M} \frac{d\rho_{c1}}{dt} = 0 \quad (4.3.4)$$

$$\frac{dP_{c2}}{dt} - \frac{Z_{c2} R T_{c2}}{M} \frac{d\rho_{c2}}{dt} = 0 \quad (4.3.5)$$

onde,

- d_g : Densidade relativa do gás (Ar = 1)
- M : Massa molecular do gás, kg/mol
- m_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s
- m_{tc} : Massa de gás no espaço anular, kg
- P_{c1} : Pressão do gás na superfície, Pa
- P_{c2} : Pressão do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
- R : Constante universal dos gases, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
- T_{c1} : Temperatura do gás na superfície, K
- T_{c2} : Temperatura do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, K
- T_{tc} : Temperatura média do gás no espaço anular, K
- V_{tc} : Volume do espaço anular coluna-revestimento de produção, m^3
- Z_{c1} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c1} e T_{c1}
- Z_{c2} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c2} e T_{c2}
- Z_{tc} : Fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular

- z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
 ρ_{c1} : Massa específica do gás a P_{c1} e T_{c1} , kg/m^3
 ρ_{c2} : Massa específica do gás a P_{c2} e T_{c2} , kg/m^3

4.3.2 Estágio 2 - transferência de líquido

Com a abertura da válvula de *gas lift* gás é injetado no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, iniciando o processo de transferência do líquido do anular para a coluna de produção. O estágio termina quando o gás de injeção alcança o tubo perfurado, iniciando a injeção de gás na coluna de produção. Compõe o sistema físico : o espaço anular, a coluna de gás e a coluna de líquido.

Espaço anular coluna - revestimento de produção

A menos da equação (4.3.2), substituída pela equação (4.1.9), valem as mesmas equações utilizadas no estágio anterior : (4.3.1), (4.3.3), (4.3.4) e (4.3.5).

Coluna de gás

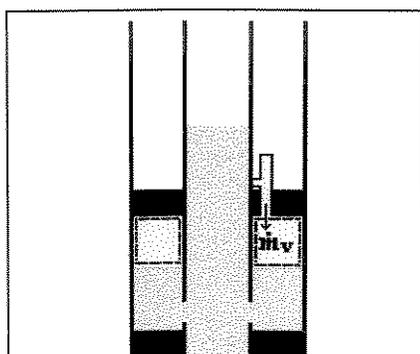


Figura 4.15 - Método GLIC :
coluna de gás no estágio de transferência.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.15) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= A_{an} \frac{d}{dt} [\rho_{gc} (LC - h_{lc})] \\ &= A_{an} \left[(LC - h_{lc}) \frac{d\rho_{gc}}{dt} - \rho_{gc} \frac{dh_{lc}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (4.3.6)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\dot{m}_{gv} \quad (4.3.7)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do espaço anular, m^2
 h_{lc} : Altura do topo da coluna de líquido no espaço anular da câmara, m
 LC : Comprimento da câmara de acumulação, m
 m_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
 ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m^3

Substituindo-se (4.3.6) e (4.3.7) em (4.2) obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de gás :

$$A_{an} \left[(LC - h_{lc}) \frac{d\rho_{gc}}{dt} - \rho_{gc} \frac{dh_{lc}}{dt} \right] - m_{gv} = 0 \quad (4.3.8)$$

Balanço de momento : aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de gás no espaço anular da câmara (Figura 4.15), desprezando-se as componentes de aceleração, de fluxo de momento e de atrito, tem-se :

$$\sum F = A_{an}(P_{c3} - P_{c4}) + \rho_{gc} g (LC - h_{lc}) A_{an} = 0 \quad (4.3.9)$$

onde,

- P_{c3} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{c4} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, Pa
 g : Aceleração da gravidade, m/s^2

Dividindo-se (4.3.9) por A_{an} e rearranjando tem-se :

$$P_{c3} - P_{c4} + \rho_{gc} g (LC - h_{lc}) = 0 \quad (4.3.10)$$

Obtém-se a equação final para o balanço de momento na coluna de gás no espaço anular da câmara derivando-se (4.3.10).

$$\frac{dP_{c3}}{dt} - \frac{dP_{c4}}{dt} + g(LC - h_{lc}) \frac{d\rho_{gc}}{dt} - \rho_{gc} g \frac{dh_{lc}}{dt} = 0 \quad (4.3.11)$$

Coluna de líquido

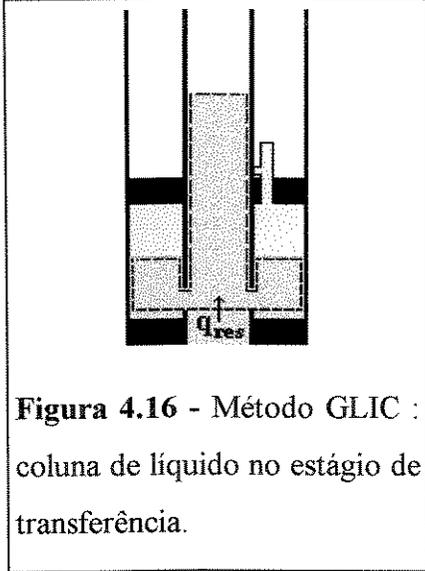


Figura 4.16 - Método GLIC : coluna de líquido no estágio de transferência.

Balanco de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.16) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \rho_l \frac{d}{dt} (A_{an} h_{lc} + A_t h_{lt}) \quad (4.3.12)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\rho_l q_{res} \quad (4.3.13)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do anular, m^2
- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- h_{lc} : Altura do topo da coluna de líquido no espaço anular da câmara, m
- h_{lt} : Altura do topo da coluna de líquido no tubo, m
- q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

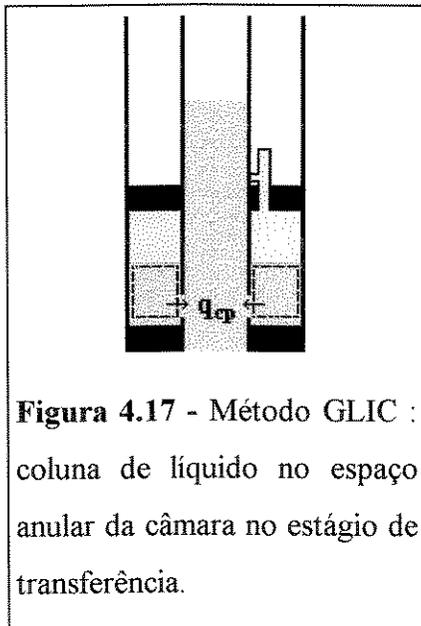
Substituindo-se (4.3.12) e (4.3.13) em (4.2) tem-se, para o balanço de massa na coluna de líquido :

$$A_{an} \frac{dh_{lc}}{dt} + A_t \frac{dh_{lt}}{dt} - q_{res} = 0 \quad (4.3.14)$$

Um dado importante nas instalações com câmara é a razão entre as áreas do espaço anular e da coluna de produção, definida aqui como rtc . Ou seja, $rtc = \frac{A_{an}}{A_t}$. A forma final para o balanço de massa na coluna de líquido é obtida dividindo-se (4.3.14) por A_t e substituindo-se no resultado a razão entre as áreas - rtc .

$$\frac{dh_{lt}}{dt} + rtc \frac{dh_{lc}}{dt} - \frac{q_{res}}{A_t} = 0 \quad (4.3.15)$$

Balanço de momento - a velocidade do líquido no anular da câmara é menor que a velocidade do líquido na coluna de produção; devido tanto à contribuição do reservatório como também à maior capacidade do espaço anular ($rtc > 1$). Para considerar a velocidade correta do líquido, no cálculo da componente de atrito, divide-se o volume de controle para aplicação do balanço de momento.



Balanço de momento no espaço anular - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido no espaço anular (Figura 4.17) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV = \rho_l A_{an} \frac{d}{dt} (v_{lc} h_{lc}) \quad (4.3.16)$$

$$\int_{cs} \rho v (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho_l v_{lc} q_{ct} \quad (4.3.17)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do espaço anular, m^2
- h_{lc} : Altura do topo da coluna de líquido no espaço anular da câmara, m
- q_{ct} : Vazão de líquido do espaço anular da câmara para o tubo, m^3/s
- v_{lc} : Velocidade do líquido no espaço anular da câmara, m/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Demonstra-se (Apêndice B) que a resultante das forças na coluna de líquido é dada por

$$\sum F = A_{an}(P_{c4} - P_{c5}) - \frac{f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} A_{an}}{2 D_{an}} + \rho_l g h_{lc} A_{an} \quad (4.3.18)$$

onde,

D_{an} : Diâmetro do espaço anular da câmara, m

f_l : Fator de fricção do líquido ;

P_{c4} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, Pascal

P_{c5} : Pressão no espaço anular da câmara na profundidade do tubo perfurado, Pa

Substituindo-se (4.3.16), (4.3.17) e (4.3.18) na equação (4.4) e dividindo-se o resultado por $\rho_l A_{an}$ tem-se :

$$v_{lc} \frac{dh_{lc}}{dt} + h_{lc} \frac{dv_{lc}}{dt} + v_{lc} \frac{q_{ct}}{A_{an}} = \frac{(P_{c4} - P_{c5})}{\rho_l} - \frac{f_l v_{lc}^2 h_{lc}}{2 D_{an}} + g h_{lc} \quad (4.3.19)$$

Substituindo-se $q_{ct} = v_{lc} A_{an}$ e $v_{lc} = -\frac{dh_{lc}}{dt}$ na equação (4.3.19) tem-se :

$$-v_{lc}^2 + h_{lc} \frac{dv_{lc}}{dt} + v_{lc}^2 = \frac{(P_{c4} - P_{c5})}{\rho_l} - \frac{f_l v_{lc}^2 h_{lc}}{2 D_{an}} + g h_{lc} \quad (4.3.20)$$

Simplificando-se (4.3.20) obtém-se a equação final para o balanço de momento na coluna de líquido do espaço anular da câmara.

$$h_{lc} \frac{dv_{lc}}{dt} - \frac{(P_{c4} - P_{c5})}{\rho_l} + \frac{f_l v_{lc}^2 h_{lc}}{2 D_{an}} - g h_{lc} = 0 \quad (4.3.21)$$

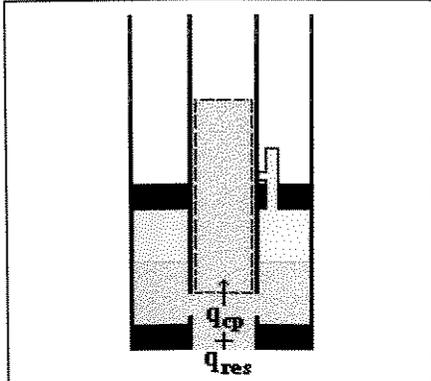


Figura 4.18 - Método GLIC : coluna de líquido na coluna de produção no estágio de transferência.

Balanco de momento na coluna de produção - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido na coluna de produção (Figura 4.18) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV &= \rho_l A_t \frac{d}{dt} [v_{lt} h_{lt}] \\ &= \rho_l A_t \left(v_{lt} \frac{dh_{lt}}{dt} + h_{lt} \frac{dv_{lt}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (4.3.22)$$

$$\int_{sc} \rho v (\vec{v}_t \cdot \vec{n}) dA = - \rho_l v_{lc} q_{et} - \rho_l v_{res} q_{res} \quad (4.3.23)$$

onde,

- h_{lt} : Altura do topo da coluna de líquido na coluna de produção, m
- q_{et} : Vazão de líquido do espaço anular da câmara para o tubo, m³/s
- q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s
- v_{lc} : Velocidade do líquido no espaço anular da câmara, m/s
- v_{lt} : Velocidade do líquido no tubo, m/s
- v_{res} : Velocidade do líquido na entrada do tubo, m/s

A resultante das forças na coluna de líquido é :

$$\sum F = A_t (P_{t1} - P_{t3}) - \frac{f_l \rho_l v_{lt}^2 h_{lt} A_t}{2 D} - \rho_l g h_{lt} A_t \quad (4.3.24)$$

onde,

- P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade do tubo perfurado, Pa
- P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa

Substituindo-se (4.3.22) , (4.3.23) e (4.3.24) na equação (4.4) , dividindo-se o resultado por $\rho_l A_t$, e considerando-se que $q_{et} = v_{lc} A_{an}$ e $q_{res} = v_{res} A_t$, obtém-se :

$$v_{lt} \frac{dh_{lt}}{dt} + h_{lt} \frac{dv_{lt}}{dt} - v_{res}^2 - \frac{A_{an}}{A_t} v_{lc}^2 = \frac{(P_{t1} - P_{t3})}{\rho_l} - \frac{f_l v_{lt}^2 h_{lt}}{2 D} - g h_{lt} \quad (4.3.25)$$

Reescrevendo-se (4.3.15) em funcao das velocidades tem-se que

$$v_{lt} = rtc \ v_{lc} + v_{res} \quad (4.3.26)$$

Substituindo-se $\frac{dh_{lt}}{dt} = v_{lt}$ e (4.3.26) em (4.3.25) tem-se :

$$h_{lt} \frac{dv_{lt}}{dt} + v_{lc}^2 \ rtc^2 + 2 \ v_{lc} \ v_{res} \ rtc + v_{res}^2 - v_{res}^2 - rtc \ v_{lc}^2 = \frac{(P_{t1} - P_{t3})}{\rho_l} - \frac{f_l v_{lt}^2 h_{lt}}{2 D} - g h_{lt} \quad \dots (4.3.27)$$

Simplificando-se (4.3.27) obtém-se a equação final para o balanço de momento na coluna de líquido da coluna de produção.

$$h_{lt} \frac{dv_{lt}}{dt} + v_{lc} \ rtc \left[v_{lc} (rtc - 1) + 2 \frac{q_{res}}{A_t} \right] - \frac{(P_{t1} - P_{t3})}{\rho_l} + \frac{f_l v_{lt}^2 h_{lt}}{2 D} + g h_{lt} = 0 \quad \dots (4.3.28)$$

Equações constitutivas

As equações do espaço anular (4.3.1), (4.3.2), (4.3.3), (4.3.4) e (4.3.5), mais as equações (4.3.8), (4.3.11), (4.3.15), (4.3.21) e (4.3.28), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos demais componentes do sistema físico, formam um sistema de 10 equações com 13 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se então três equações constitutivas : a primeira utiliza a definição de velocidade como taxa de variação da posição ; a segunda, utilizando a equação de estado dos gases reais, parte da definição da densidade média na coluna de gás ; e a terceira, cujo desenvolvimento é mostrado abaixo, parte da necessidade de uma equação para calcular P_{t1} .

$$v_{lc} + \frac{dh_{lc}}{dt} = 0 \quad (4.3.29)$$

$$\frac{d\rho_{gc}}{dt} = \frac{M}{2R} \left(\frac{1}{Z_{c3} T_{c3}} \frac{dP_{c3}}{dt} + \frac{1}{Z_{c4} T_{c4}} \frac{dP_{c4}}{dt} \right) \quad (4.3.30)$$

onde,

- P_{c3} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{c4} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, Pa
 T_{c3} : Temperatura do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, K
 T_{c4} : Temperatura do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, K
 Z_{c3} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c3} e T_{c3}
 Z_{c4} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c4} e T_{c4}
 ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m^3

A equação para o cálculo de P_{t1} é obtida a partir de (4.3.15). Derivando-se (4.3.15)

tem-se :

$$\frac{dv_{lt}}{dt} - rtc \frac{dv_{lc}}{dt} - \frac{1}{A_t} \frac{dq_{res}}{dt} = 0 \quad (4.3.31)$$

Mas,

$$q_{res} = IP (PE - P_{wf}) \quad (4.3.32)$$

e,

$$P_{wf} = P_{t1} + \rho_l g(z_{can} - z_p) \quad (4.3.33)$$

onde,

- IP : Índice de produtividade, $\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}$
 PE : Pressão estática, Pa
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade do tubo perfurado, Pa
 P_{wf} : Pressão de fluxo, Pa
 q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s
 rtc : Relação entre as áreas do espaço anular e do tubo
 v_{lc} : Velocidade do líquido no espaço anular da câmara, m/s
 v_{lt} : Velocidade do líquido no tubo, m/s
 z_{can} : Profundidade média dos canhoneados, m
 z_p : Profundidade do tubo perfurado, m

Derivando-se (4.3.32) e (4.3.33), e combinando as equações resultantes obtém-se :

$$\frac{dq_{res}}{dt} = - IP \frac{dP_{t1}}{dt} \quad (4.3.34)$$

Substituindo-se (4.3.34) em (4.3.31) obtém-se a equação final que permite determinar P_{t1} .

$$\frac{dv_l}{dt} - rtc \frac{dv_{lc}}{dt} + \frac{IP}{A_t} \frac{dP_{t1}}{dt} = 0 \quad (4.3.35)$$

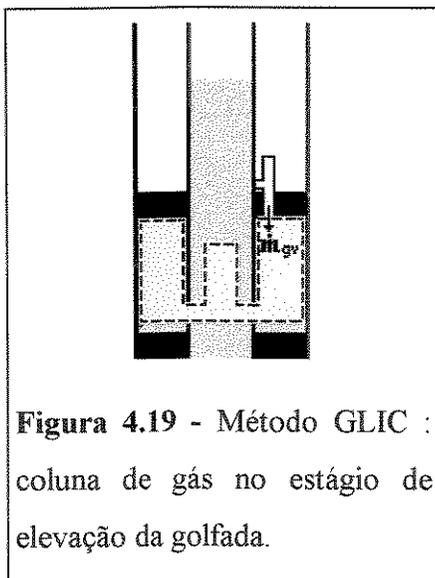
4.3.3 Estágio 3 - elevação

Este estágio inicia-se quando gás é injetado na coluna de produção, através do tubo perfurado, e encerra-se quando o topo da golfada de líquido chega à superfície. Compõe o sistema físico : o espaço anular, a coluna de gás no anular da câmara e na coluna de produção, a golfada e o filme de líquido.

Espaço anular coluna - revestimento de produção

Continua valendo o mesmo sistema de equações desenvolvido para o estágio anterior : equações (4.1.9),(4.3.1), (4.3.3), (4.3.4) e (4.3.5).

Coluna de gás



Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.19) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \frac{d}{dt} \left[\int_{vc1} \rho dV + \int_{vc2} \rho dV \right] \\ &= \frac{d}{dt} (\rho_{gc} A_{an} LC) + \frac{d}{dt} (\rho_B A_B h_B) \\ &= A_{an} LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} + \frac{d}{dt} (\rho_B A_B h_B) \quad (4.3.36) \end{aligned}$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\dot{m}_{gv} \quad (4.3.37)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do espaço anular, m^2
 A_B : Área da bolha de gás, m^2
 h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
 LC : Comprimento da câmara de acumulação, m
 \dot{m}_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
 ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m^3
 ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m^3

Substituindo-se (4.3.36) e (4.3.37) em (4.2) tem-se, para o balanço de massa na coluna de gás :

$$A_{an} LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} + \frac{d}{dt} (\rho_B A_B h_B) - \dot{m}_{gv} = 0 \quad (4.3.38)$$

Para um comprimento de câmara (LC) igual a zero a equação (4.3.38) reduz-se à equação (4.1.22), derivada da aplicação do balanço de massa na bolha de gás no método intermitente convencional ; e que, desenvolvida, resulta na equação (4.1.26). Portanto a equação final para o balanço de massa na coluna de gás, para este estágio do método intermitente com câmara, é obtida simplesmente adicionando-se, à equação (4.1.26), o primeiro termo da equação (4.3.38). Ou seja,

$$A_{an} LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} + A_B \rho_B \frac{dh_B}{dt} + A_B h_B \frac{d\rho_B}{dt} - 2\pi(r-y) \rho_B h_B \frac{dy}{dt} - \dot{m}_{gv} = 0 \quad (4.3.39)$$

Balanço de momento - divide-se o volume de controle, para aplicação do balanço de momento na coluna de gás, no anular da câmara e na coluna de produção.

Balanço de momento no anular da câmara - obtém-se a equação do balanço de momento neste volume de controle simplesmente fazendo-se $h_{lc} = 0$ na equação (4.3.11).

$$\frac{dP_{c3}}{dt} - \frac{dP_{c4}}{dt} + g LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} = 0 \quad (4.3.40)$$

onde,

- LC : Comprimento da câmara de acumulação, m
 P_{c3} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{c4} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, Pa
 g : Aceleração da gravidade, m/s²
 ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m³

Balanço de momento na coluna de produção - o escoamento configura-se, na coluna de produção, exatamente igual ao método intermitente convencional. A equação para o balanço de momento é, portanto, igual à equação (4.1.28).

Para os demais componentes do sistema físico - golfada e filme de líquido, as equações obtidas com a aplicação dos balanços de massa e momento são as mesmas do método intermitente convencional : (4.1.35), (4.1.40) e (4.1.46).

Equações constitutivas

As equações do espaço anular, (4.1.9), (4.3.1), (4.3.3), (4.3.4) e (4.3.5), mais as equações (4.3.39), (4.3.40), (4.1.28), (4.1.35), (4.1.40) e (4.1.46), derivadas das aplicações dos balanços de massa e momento, formam um sistema de 11 equações com 15 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se, além das equações constitutivas (4.1.32), (4.1.48) e (4.1.50), a equação (4.3.41), derivada da equação de estado para os gases reais e que parte da definição da densidade média do gás no espaço anular da câmara.

$$\frac{d\rho_{gc}}{dt} = \frac{M}{2R} \left(\frac{1}{Z_{t1} T_{t1}} \frac{dP_{t1}}{dt} + \frac{1}{Z_{c3} T_{c3}} \frac{dP_{c3}}{dt} \right) \quad (4.3.41)$$

onde,

- M : Massa molecular do gás, kg/mol
 P_{c3} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, Pa

- P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade do tubo perfurado, Pa
 R : Constante universal dos gases, $J.mol^{-1}.K^{-1}$
 T_{c3} : Temperatura do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, K
 T_{t1} : Temperatura do gás na profundidade do tubo perfurado, K
 Z_{c3} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c3} e T_{c3}
 Z_{t1} : Fator de compressibilidade do gás a P_{t1} e T_{t1}
 ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m^3

4.3.4 Estágio 4 - produção da golfada

Inicia-se quando o topo da golfada de líquido chega à superfície e termina quando a base da golfada chega à superfície. O sistema de equações é o mesmo do estágio anterior, apenas substituindo a equação (4.1.46) pela equação (4.1.53).

4.3.5 Estágio 5 - descompressão

É dividido nas mesmas fases do método intermitente convencional.

4.3.5.1 Fase 1 : descompressão até o fechamento da válvula de *gas lift*

Nesta fase a válvula de *gas lift* continua aberta, permitindo fluxo de gás para o anular da câmara. Assim como no método intermitente convencional o líquido do reservatório acumula-se no filme na parede da tubulação. Compõe o sistema físico : o espaço anular, o filme de líquido e a coluna de gás.

Coluna de gás

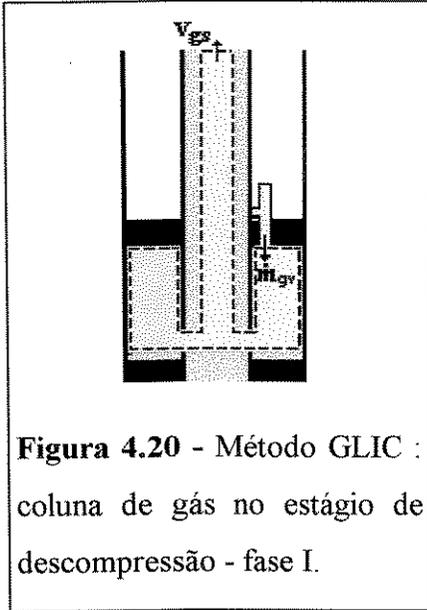


Figura 4.20 - Método GLIC :
coluna de gás no estágio de
descompressão - fase I.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.20) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \frac{d}{dt} \left[\int_{vc_{an}} \rho dV + \int_{vc} \rho dV \right] \\ &= \frac{d}{dt} (\rho_{gc} A_{an} LC) + \frac{d}{dt} (\rho_g A_B z_p) \\ &= A_{an} LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} + z_p \frac{d}{dt} (\rho_g A_B) \end{aligned} \quad (4.3.42)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho_{gs} v_{gs} A_B - \dot{m}_{gv} \quad (4.3.43)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do espaço anular, m²
- A_B : Área da bolha de gás, m²
- LC : Comprimento da câmara de acumulação, m
- \dot{m}_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
- v_{gs} : Velocidade da coluna de gás na superfície, m/s
- z_p : Profundidade do tubo perfurado, m
- ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m³
- ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{ts} e T_{ts} , kg/m³
- ρ_{gt} : Massa específica do gás na coluna de produção, kg/m³

Substituindo-se (4.3.42) e (4.3.43) em (4.2) e fazendo-se alguns arranjos obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de gás.

$$A_{an} LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} + A_B z_p \frac{d\rho_{gt}}{dt} - 2\pi(r-y) \rho_{gt} z_p \frac{dy}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} A_B - \dot{m}_{gv} = 0$$

... (4.3.44)

Balanço de momento - o escoamento configura-se, no anular da câmara, igual ao do estágio anterior ; e, na coluna de produção, igual ao do método intermitente convencional para esta mesma fase do estágio de descompressão. Valem para este estágio, portanto, as equações (4.3.40) e (4.1.73), respectivamente derivadas da aplicação do balanço de momento no anular da câmara e na coluna de produção.

Para o filme de líquido as equações obtidas com a aplicação dos balanços de massa e de momento são as mesmas do método intermitente convencional para este estágio do ciclo de produção: (4.1.57) e (4.1.69).

Equações constitutivas

As equações do espaço anular, (4.1.9), (4.3.1), (4.3.3), (4.3.4) e (4.3.5), mais as equações (4.1.57), (4.1.69), (4.1.73), (4.3.40) e (4.3.44), derivadas da aplicação dos balanços de massa e momento nos demais componentes do sistema físico, formam um sistema de 10 equações com 12 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se as equações constitutivas (4.1.75) e (4.3.41), já definidas.

4.3.5.2 Fase 2 : descompressão enquanto $v_f > 0$

Nesta fase a válvula de *gas lift* permanece fechada, não ocorrendo, portanto, fluxo de gás para o anular da câmara. Continua a ocorrer, porém, fluxo de gás do anular da câmara para a coluna de produção. Compõe o sistema físico : a coluna de gás, o filme e a coluna de líquido.

Admite-se as seguintes hipóteses para esta fase do estágio de descompressão :

- 1) o líquido do reservatório acumula-se na coluna de produção e no anular da câmara ;
- 2) a coluna de líquido que se forma não impede a circulação do gás.

Coluna de gás

Balanço de massa - como a válvula de *gas lift* encontra-se fechada não mais existe fluxo de gás para dentro do volume de controle. A equação final para o balanço de massa na coluna de gás é obtida, portanto, simplesmente fazendo-se $m_{gv} = 0$ na equação (4.3.44).

$$A_{an} LC \frac{d\rho_{gc}}{dt} + A_B z_p \frac{d\rho_{gt}}{dt} - 2\pi(r - y) \rho_{gt} z_p \frac{dy}{dt} + \rho_{gs} v_{gs} A_B = 0 \quad (4.3.45)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do espaço anular, m^2
- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- r : Raio do tubo, m
- y : Espessura do filme de líquido, m
- v_{gs} : Velocidade da coluna de gás na superfície, m/s
- z_p : Profundidade do tubo perfurado, m
- ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m^3
- ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{ts} e T_{ts} , kg/m^3
- ρ_{gt} : Massa específica do gás na coluna de produção, kg/m^3

Balanço de momento - continuam valendo as mesmas equações derivadas no estágio anterior : (4.3.40) e (4.1.73).

Coluna de líquido

O líquido da formação passa a acumular-se na coluna de produção e no espaço anular da câmara de acumulação.

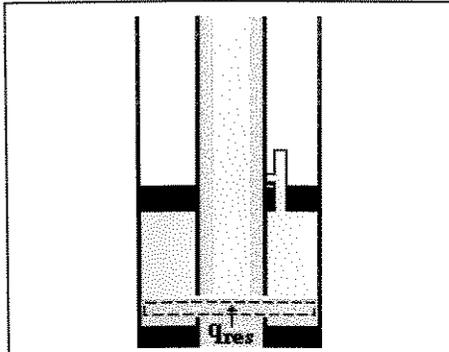


Figura 4.21 - Método GLIC :
coluna de líquido no estágio de
descompressão - fase II.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.21) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \rho_l \frac{d}{dt} [(A_B + A_{an}) h_l] \\ &= \rho_l (A_B + A_{an}) \frac{dh_l}{dt} + \rho_l h_l \frac{dA_B}{dt} \end{aligned} \quad (4.3.46)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \rho_l q_{res} \quad (4.3.47)$$

onde,

- h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
 q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s
 ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m³

Substituindo-se (4.3.46) e (4.3.47) em (4.2) e utilizando-se (4.1.25) obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de líquido.

$$(A_B + A_{an}) \frac{dh_l}{dt} - 2\pi h_l (r - y) \frac{dy}{dt} - q_{res} = 0 \quad (4.3.48)$$

Balanço de momento - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.21), e considerando-se apenas as componentes gravitacional e de pressão, tem-se :

$$(P_{t1} - P_{t3}) A_t - \rho_l g A_t h_l = 0 \quad (4.3.49)$$

onde,

- g : Aceleração da gravidade, m/s²
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade do tubo perfurado, Pa
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa

Simplificando e derivando-se (4.3.49) obtém-se a equação final para o balanço de momento na coluna de líquido.

$$\frac{dP_{t1}}{dt} - \frac{dP_{t3}}{dt} - \rho_l g \frac{dh_l}{dt} = 0 \quad (4.3.50)$$

Para o filme de líquido as equações obtidas com a aplicação dos balanços de massa e de momento são as mesmas do método intermitente convencional para este estágio do ciclo de produção : (4.1.76) e (4.1.80).

Equações constitutivas

As equações (4.1.69), (4.1.73), (4.1.76), (4.3.40), (4.3.45), (4.3.48) e (4.3.50), derivadas da aplicação dos balanços de massa e momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 7 equações com 9 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se as equações constitutivas (4.1.90) e (4.3.51), derivadas da equação de estado dos gases reais.

$$\frac{d\rho_{gc}}{dt} = \frac{M}{Z_{e3} R T_{e3}} \frac{dP_{e3}}{dt} \quad (4.3.51)$$

onde,

- P_{e3} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, Pa
- T_{e3} : Temperatura do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, K
- Z_{e3} : Fator de compressibilidade do gás a P_{e3} e T_{e3}
- ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m^3

4.3.5.3 Fase 3 : descompressão para $v_f < 0$

Nesta fase a velocidade do filme de líquido é descendente, ou seja, o líquido do filme retorna para o fundo do poço, incorporando-se à coluna de líquido em formação. Compõe o sistema físico : a coluna de gás, o filme e a coluna de líquido.

Coluna de gás

Balanço de massa - vale a equação (4.1.97), derivada da aplicação do balanço de massa na coluna de gás para este estágio no método intermitente convencional.

Balanço de momento - utiliza-se diretamente apenas a equação (4.3.40), derivada da aplicação do balanço de momento na coluna de gás do anular da câmara, e válida também para esta fase do estágio de descompressão. Já a equação obtida com a aplicação do balanço de momento na coluna de gás no tubo é utilizada, como demonstrado no método intermitente convencional, para determinar a velocidade média da coluna de gás.

Coluna de líquido

Passa a se incorporar à coluna de líquido também o líquido que cai do filme na parede da tubulação.

Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.21) obtém-se, para o primeiro termo, a equação (4.3.46) - desenvolvida no estágio anterior. Já o segundo termo altera-se devido ao líquido que cai da parede da tubulação e incorpora-se à coluna de líquido. Tem-se, portanto, para o segundo termo da equação (4.2) :

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \rho_l q_{res} - \rho_l q_f \quad (4.3.52)$$

onde,

- q_f : Vazão do filme de líquido, m^3/s
- q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m^3/s
- ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Substituindo-se (4.3.46) e (4.3.52) em (4.2) e utilizando-se (4.1.25) obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de líquido.

$$(A_B + A_{an}) \frac{dh_i}{dt} - 2\pi h_i (r - y) \frac{dy}{dt} - (q_{res} + q_f) = 0 \quad (4.3.53)$$

Balanço de momento - continua valendo a equação (4.3.50), derivada da aplicação do balanço de momento na coluna de líquido no estágio anterior.

Filme de líquido

Continua valendo a equação (4.1.94), derivada da aplicação do balanço de massa no filme de líquido, para este estágio, no método intermitente convencional.

Equações constitutivas

As equações (4.1.94), (4.1.97), (4.3.40), (4.3.50) e (4.3.53), derivadas das aplicações dos balanços de massa e momento, formam um sistema de 5 equações com 7 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se as equações constitutivas (4.1.90) e (4.3.51), derivadas da equação de estado dos gases reais.

4.3.6 Estágio 6 - Alimentação

Neste estágio líquido da formação e do filme na parede da tubulação incorporam-se à coluna de líquido já formada nos estágios anteriores. Quando a altura inicial da coluna de líquido for restabelecida gás é então reinjetado na coluna de produção, reiniciando o ciclo de produção.

Compõe o sistema físico : o filme e a coluna de líquido. Continuam valendo, para este estágio, as equações (4.1.94), (4.1.109) e (4.3.53).

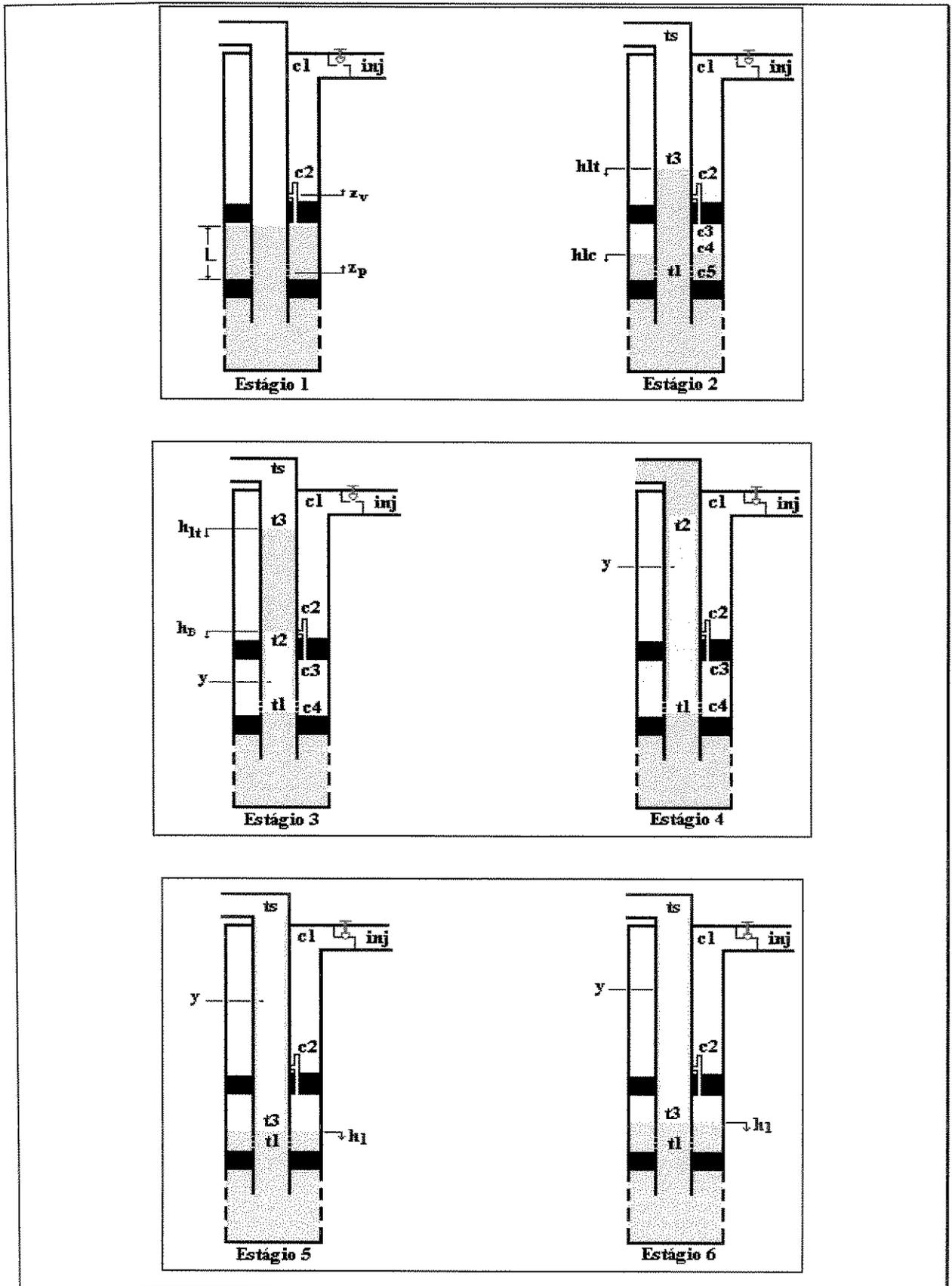


Figura 4.22 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação.

4.4 MODELO IV : *Pig Lift*

Assim como nos métodos anteriores o ciclo de produção foi dividido em estágios, conforme relacionados na Tabela 4.4 abaixo.

Tabela 4.4- Estágios do ciclo de produção para o método Pig Lift.

Estágio	DESCRIÇÃO	INICIO	FIM
1	Transferência	abertura da válvula motora na superfície.	injeção de gás na coluna de produção.
2	Elevação da golfada	injeção de gás na coluna de produção.	chegada do topo da golfada à superfície
3	Produção da golfada	chegada do topo da golfada à superfície	chegada do pig-espuma à superfície.
4	Descompressão	chegada do pig-espuma à superfície.	pressão do gás no fundo retorna ao seu valor inicial
5	Alimentação	pressão do gás no fundo retorna ao seu valor inicial	comprimento da coluna de líquido igual ao valor inicial.

Admite-se que as velocidades do pig-espuma e da coluna de gás são iguais em todos os estágios do ciclo de produção.

4.4.1 Estágio 1 - transferência

Neste estágio gás é injetado na coluna de injeção, transferindo o líquido da coluna de injeção para a coluna de produção. O controle da injeção de gás é realizado, na superfície, por uma válvula motora tendo em série um *bean*¹ de injeção na abertura 20/64 “ . Compõe o sistema físico : a coluna de gás e a coluna de líquido.

¹*bean* : termo inglês utilizado na indústria de petróleo para designar uma válvula controladora de gás tipo agulha.

Coluna de gás

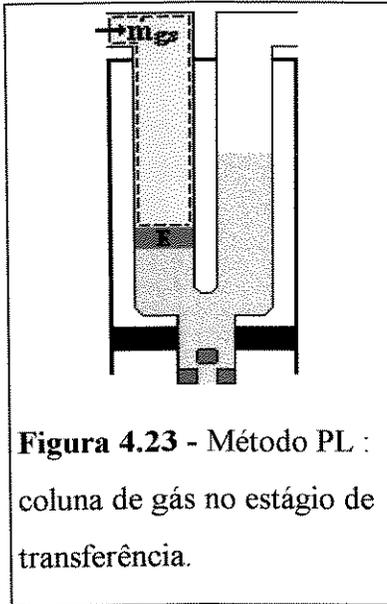


Figura 4.23 - Método PL :
coluna de gás no estágio de
transferência.

Balço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.23) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= A_t \frac{d}{dt} [\rho_{gti} (z_p - h_e)] \\ &= A_t \left[(z_p - h_e) \frac{d\rho_{gti}}{dt} - \rho_{gti} \frac{dh_e}{dt} \right] \end{aligned} \quad (4.4.1)$$

$$\int_{sc} \rho (\bar{v}_r \cdot \bar{n}) dA = -\dot{m}_{gs} \quad (4.4.2)$$

onde,

A_t : Área da seção transversal do tubo, m²

h_e : Altura do pig-espuma, m

\dot{m}_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s

z_p : Profundidade da extremidade das colunas de injeção e de produção, m

ρ_{gti} : Massa específica do gás na coluna de injeção, kg/m³

Substituindo-se (4.4.1) e (4.4.2) em (4.2) tem-se, para o balanço de massa na coluna de gás :

$$A_t \left[(z_p - h_e) \frac{d\rho_{gti}}{dt} - \rho_{gti} \frac{dh_e}{dt} \right] - \dot{m}_{gs} = 0 \quad (4.4.3)$$

Tem-se ainda, de (4.1.7) e (4.4.2), que

$$\frac{dm_g}{dt} - \dot{m}_{gs} = 0 \quad (4.4.4)$$

onde,

m_g : Massa de gás, kg

\dot{m}_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s

Balanço de momento - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.23) e desprezando-se os termos de aceleração e de fluxo de momento tem-se :

$$A_t (P_{c1} - P_{c2}) - \frac{f_g \rho_{gti} v_e^2 (z_p - h_e) A_t}{2D} + \rho_{gti} g A_t (z_p - h_e) = 0 \quad (4.4.5)$$

onde,

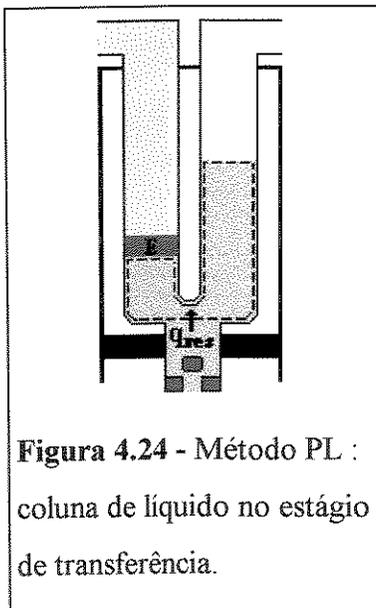
- D : Diâmetro do tubo, m
 f_g : Fator de fricção do gás ;
 P_{c1} : Pressão do gás, na coluna de injeção, na superfície, Pa
 P_{c2} : Pressão do gás, na coluna de injeção, no topo da coluna de líquido, Pa
 v_e : Velocidade do pig-espuma, m/s
 ρ_{gti} : Massa específica do gás na coluna de injeção, kg/m³

Diferenciando-se a equação (4.4.5) obtém-se, após alguns rearranjos, a equação final para o balanço de momento na coluna de gás.

$$\frac{dP_{c1}}{dt} - \frac{dP_{c2}}{dt} + (z_p - h_e) \left(g - \frac{f_g v_e^2}{2D} \right) \frac{d\rho_{gti}}{dt} - \frac{f_g \rho_{gti} v_e (z_p - h_e)}{D} \frac{dv_e}{dt} + \left(\frac{f_g \rho_{gti} v_e^2}{2D} - \rho_{gti} g \right) \frac{dh_e}{dt} = 0$$

... (4.4.6)

Coluna de líquido



Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 4.24) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \rho_l A_t \frac{d}{dt} (h_l + h_e) \quad (4.4.7)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = - \rho_l q_{res} \quad (4.4.8)$$

onde,

h_e : Altura do pig-espuma, m

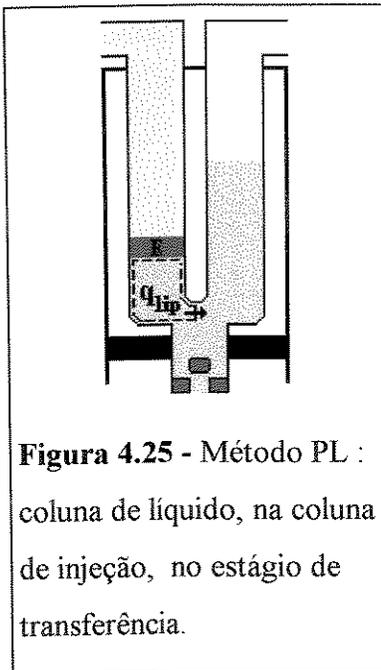
h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m

q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s

Substituindo-se (4.4.7) e (4.4.8) em (4.2) obtém-se , após alguns rearranjos, a equação final para o balanço de massa da coluna de líquido :

$$\frac{dh_l}{dt} + \frac{dh_e}{dt} - \frac{q_{res}}{A_t} = 0 \quad (4.4.9)$$

Balanço de momento - observa-se do balanço de massa que a velocidade do líquido na coluna de produção é, devido à contribuição da formação, maior que a velocidade do líquido na coluna de injeção. Para considerar a velocidade correta do líquido em cada coluna, no cálculo da componente de atrito, divide-se o volume de controle para aplicação do balanço de momento.



Balanço de momento na coluna de injeção - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido da coluna de injeção (Figura 4.25) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho v dV &= \rho_l A_t \frac{d}{dt} [v_e h_e] \\ &= \rho_l A_t \left(v_e \frac{dh_e}{dt} + h_e \frac{dv_e}{dt} \right) \end{aligned} \quad (4.4.10)$$

$$\int_{sc} \rho v (\bar{v}_r \cdot \bar{n}) dA = \rho_l v_e q_{lip} \quad (4.4.11)$$

onde,

q_{lip} : Vazão de líquido da coluna de injeção para a coluna de produção, m³/s

v_e : Velocidade do pig-espuma, m/s

Tem-se, para a resultante das forças na coluna de líquido, que

$$\sum F = A_t (P_{c2} - P_{t1}) - \frac{f_l \rho_l v_e^2 h_e A_t}{2 D} + \rho_l g h_e A_t \quad (4.4.12)$$

Obtém-se a equação final para o balanço de momento na coluna de injeção substituindo-se as equações (4.4.10), (4.4.11) e (4.4.12) na equação (4.4) e considerando-se

que : $q_{lip} = v_e A_t$ e $\frac{d h_e}{d t} = -v_e$.

$$h_e \frac{d v_e}{d t} - \frac{(P_{c2} - P_{t1})}{\rho_l} + \frac{f_l v_e^2 h_e}{2 D} - g h_e = 0 \quad (4.4.13)$$

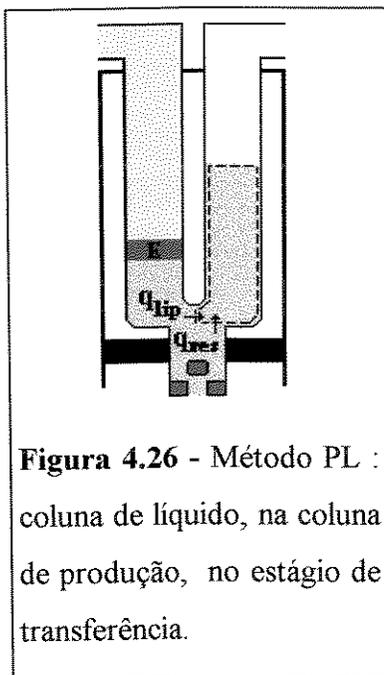


Figura 4.26 - Método PL : coluna de líquido, na coluna de produção, no estágio de transferência.

Balanço de momento na coluna de produção - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido da coluna de produção (Figura 4.26) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{d t} \int_{v_c} \rho v dV &= \rho_l A_t \frac{d}{d t} [v_l h_l] \\ &= \rho_l A_t \left(v_l \frac{d h_l}{d t} + h_l \frac{d v_l}{d t} \right) \end{aligned} \quad (4.4.14)$$

$$\int_{s_c} \rho v (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\rho_l v_e q_{lip} - \rho_l v_{res} q_{res} \quad (4.4.15)$$

onde,

h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m

q_{lip} : Vazão de líquido da coluna de injeção para a coluna de produção, m³/s

q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s

v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s

v_{res} : Velocidade do líquido na entrada do tubo, m/s

ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3

Tem-se, para a resultante das forças na coluna de líquido, que

$$\sum F = A_t (P_{t1} - P_{t3}) - \frac{f_l \rho_l v_l^2 h_l A_t}{2 D} + \rho_l g h_l A_t \quad (4.4.16)$$

onde,

P_{t1} : Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, Pa

P_{t3} : Pressão na coluna de produção no topo da golfada de líquido, Pa

Obtém-se, substituindo-se (4.4.14), (4.4.15) e (4.4.16) na equação (4.4) e considerando-se que $q_{lip} = v_e A_t$ e $q_{res} = v_{res} A_t$:

$$h_l \frac{dv_l}{dt} + v_l \frac{dh_l}{dt} - v_{res}^2 - v_e^2 - \frac{(P_{t1} - P_{t3})}{\rho_l} + \frac{f_l v_l^2 h_l}{2 D} + g h_l = 0 \quad (4.4.17)$$

A equação final para o balanço de momento na coluna de produção é obtida substituindo-se $\frac{dh_l}{dt} = v_l$ e $v_l = v_e + \frac{q_{res}}{A_t}$ na equação (4.4.17).

$$h_l \frac{dv_l}{dt} + 2 v_e \frac{q_{res}}{A_t} - \frac{(P_{t1} - P_{t3})}{\rho_l} + \frac{f_l v_l^2 h_l}{2 D} + g h_l = 0 \quad (4.4.18)$$

Equações constitutivas

As equações (4.4.3), (4.4.4), (4.4.6), (4.4.9), (4.4.13) e (4.4.18), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 6 equações com 9 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se então três equações constitutivas : a primeira - (4.4.19) - utiliza a definição de velocidade; a segunda - (4.4.20) - parte da definição de densidade média na coluna de gás; e a terceira - (4.4.25) - parte, assim como no método com câmara, da necessidade de uma equação para calcular P_{t1} .

$$v_e + \frac{dh_e}{dt} = 0 \quad (4.4.19)$$

$$\frac{d\rho_{gti}}{dt} = \frac{M}{2R} \left(\frac{1}{Z_{c1} T_{c1}} \frac{dP_{c1}}{dt} + \frac{1}{Z_{c2} T_{c2}} \frac{dP_{c2}}{dt} \right) \quad (4.4.20)$$

onde,

- P_{c1} : Pressão do gás, na coluna de injeção, na superfície, Pa
 P_{c2} : Pressão do gás, na coluna de injeção, no topo da coluna de líquido, Pa
 ρ_{gti} : Massa específica do gás na coluna de injeção, kg/m³

Obtém-se a equação para cálculo de P_{t1} a partir de (4.4.9). Derivando-se (4.4.9) tem-se :

$$\frac{dv_l}{dt} - \frac{dv_e}{dt} - \frac{1}{A_t} \frac{dq_{res}}{dt} = 0 \quad (4.4.21)$$

Mas,

$$q_{res} = IP (PE - P_{wf}) \quad (4.4.22)$$

e,

$$P_{wf} = P_{t1} + \rho_l g (z_{can} - z_p) \quad (4.4.23)$$

onde,

- IP : Índice de produtividade, m³/s/Pa
 P_{wf} : Pressão de fluxo, Pa
PE : Pressão estática, Pa
 z_{can} : Profundidade média dos canhoneados, m

Derivando-se (4.4.22) e (4.4.23), e combinando-se as equações resultantes obtém-se que :

$$\frac{dq_{res}}{dt} = - IP \frac{dP_{t1}}{dt} \quad (4.4.24)$$

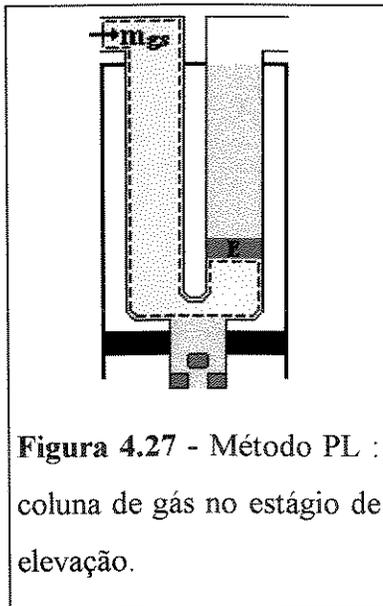
Substituindo-se (4.4.24) na equação (4.4.21) obtém-se a equação final que permite determinar P_{t1} .

$$\frac{dv_l}{dt} - \frac{dv_e}{dt} + \frac{IP}{A_t} \frac{dP_{t1}}{dt} = 0 \quad (4.4.25)$$

4.4.2 Estágio 2 - elevação

Neste estágio a golfada de líquido é elevada até a superfície pela expansão do gás. Inicia-se quando a coluna de gás alcança a extremidade das duas colunas - injeção e produção, e termina quando o topo da golfada de líquido chega à superfície. Assume-se as mesmas hipóteses do método intermitente com pistão : que o *fall-back* de líquido é igual a zero e que o líquido da formação acumula-se na coluna de produção sem sofrer interferência do gás circulante. Compõe o sistema físico : a coluna de gás, a golfada de líquido e a coluna de líquido da formação.

Coluna de gás



Balanço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás Figura 4.27) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= A_t \frac{d}{dt} [\rho_g (z_p + h_e)] \\ &= A_t \left[(z_p + h_e) \frac{d\rho_g}{dt} + \rho_g \frac{dh_e}{dt} \right] \end{aligned} \quad (4.4.26)$$

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = -\dot{m}_{gs} \quad (4.4.27)$$

onde,

z_p : Profundidade da extremidade das colunas de injeção e de produção, m

h_e : Altura do pig-espuma, m

\dot{m}_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s

ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³

Substituindo-se (4.4.26) e (4.4.27) em (4.2) tem-se, para o balanço de massa na coluna de gás

$$A_t \left[(z_p + h_e) \frac{d\rho_g}{dt} + \rho_g \frac{dh_e}{dt} \right] - \dot{m}_{gs} = 0 \quad (4.4.28)$$

Tem-se ainda, de (4.1.7) e (4.4.27) que

$$\frac{dm_g}{dt} - \dot{m}_{gs} = 0 \quad (4.4.29)$$

Mas ρ_g - densidade média da coluna de gás - pode ser escrita como :

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g} = \frac{m_{gti} + m_{gtp}}{V_g} = \frac{\rho_{gti} V_{gti} + \rho_{gtp} V_{gtp}}{V_g} = \frac{\rho_{gti} z_p A_t + \rho_{gtp} h_e A_t}{A_t(z_p + h_e)}$$

onde,

m_g : Massa de gás, kg

m_{gti} : Massa de gás na coluna de injeção, kg

m_{gtp} : Massa de gás na coluna de produção, kg

V_g : Volume total ocupado pelo gás, m³

V_{gti} : Volume ocupado pelo gás na coluna de injeção, m³

V_{gtp} : Volume ocupado pelo gás na coluna de produção, m³

ρ_g : Massa específica do gás, kg/m³

ρ_{gti} : Massa específica do gás na coluna de injeção, kg/m³

ρ_{gtp} : Massa específica do gás na coluna de produção, kg/m³

resultando finalmente em :

$$\rho_g = \frac{\rho_{gti} z_p + \rho_{gtp} h_e}{z_p + h_e} \quad (4.4.30)$$

Demonstra-se, derivando-se (4.4.30), que :

$$\frac{d\rho_g}{dt} = \frac{z_p}{(z_p + h_e)^2} \left[(\rho_{gtp} - \rho_{gtn}) \frac{dh_e}{dt} + (z_p + h_e) \frac{d\rho_{gtn}}{dt} + \left(h_e + \frac{h_e^2}{z_p} \right) \frac{d\rho_{gtp}}{dt} \right] \quad (4.4.31)$$

Pode-se demonstrar também que substituindo-se (4.4.30) e (4.4.31) em (4.4.28) chega-se à equação (4.4.32) abaixo, que é a forma final do balanço de massa na coluna de gás.

$$h_e \frac{d\rho_{gtp}}{dt} + z_p \frac{d\rho_{gtn}}{dt} + \rho_{gtp} \frac{dh_e}{dt} - \frac{1}{A_t} \frac{dm_g}{dt} = 0 \quad (4.4.32)$$

Balanço de momento - a exemplo do que foi feito no estágio anterior divide-se, devido à necessidade de se determinar P_{gt1} , o volume de controle para aplicação do balanço de momento.

Balanço de momento na coluna de injeção - aplicando-se a equação (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de gás na coluna de injeção e desprezando-se os termos de aceleração e de fluxo tem-se :

$$(P_{c1} - P_{gt1}) - \frac{f_g \rho_{gtn} v_e^2 z_p}{2D} + \rho_{gtn} g z_p = 0 \quad (4.4.33)$$

onde,

f_g : Fator de fricção do gás.

P_{c1} : Pressão do gás, na coluna de injeção, na superfície, Pa

P_{gt1} : Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, considerando apenas a coluna de gás, Pa

v_g : Velocidade do gás, m/s

que após derivada e rearranjada fica :

$$\frac{dP_{c1}}{dt} - \frac{dP_{gt1}}{dt} - \left(\frac{f_g v_e^2 z_p}{2D} - g z_p \right) \frac{d\rho_{gt1}}{dt} - \frac{f_g \rho_{gt1} v_e z_p}{D} \frac{dv_e}{dt} = 0 \quad (4.4.34)$$

Balço de momento na coluna de produo - aplicando-se a equao (4.4) no volume de controle coincidente com a coluna de gs na coluna de produo e desprezando-se os termos de acelerao e de fluxo tem-se :

$$(P_{gt1} - P_{t2}) - \frac{f_g \rho_{gtp} v_e^2 h_e}{2D} - \rho_{gtp} g h_e = 0 \quad (4.4.35)$$

onde,

- f_g : Fator de fricco do gs ;
- h_e : Altura do pig-espuma, m
- P_{gt1} : Presso na extremidade das colunas de injeo e produo, considerando apenas a coluna de gs, Pa
- P_{t2} : Presso na coluna de produo no topo da bolha de gs, Pa
- v_e : Velocidade do pig-espuma, m/s
- ρ_{gtp} : Massa especfica do gs na coluna de produo, kg/m³

que, aps derivada e rearranjada fica :

$$\frac{dP_{gt1}}{dt} - \frac{dP_{t2}}{dt} - \left(\frac{f_g v_e^2 h_e}{2D} + g h_e \right) \frac{d\rho_{gtp}}{dt} - \frac{f_g \rho_{gtp} v_e h_e}{D} \frac{dv_e}{dt} - \left(\frac{f_g \rho_{gtp} v_e^2}{2D} + \rho_{gtp} g \right) \frac{dh_e}{dt} = 0 \quad (4.4.36)$$

Golfada de liquido

As equaes resultantes da aplicao dos balanos de massa e de momento na golfada de liquido so, com os ajustes necessrios, as mesmas obtidas para o *Gas Lift* Intermitente com Pistao.

Balço de massa - substituindo-se na equao (4.2.1) h_p por h_e tem-se, para o balço de massa na golfada de liquido :

$$\frac{dh_i}{dt} - \frac{dh_e}{dt} = 0 \quad (4.4.37)$$

Balanço de momento - substituindo-se na equação (4.2.2) h_p por h_e e v_p por v_e tem-se, para o balanço de massa na golfada de líquido :

$$(h-h_k) \frac{dv_e}{dt} - \frac{(P_{12}-P_{13})}{\rho} + \frac{f_i v_e^2 (h-h_k)}{2D} + g(h-h_k) = 0 \quad (4.4.38)$$

onde,

- P_{12} : Pressão na coluna de produção no topo da bolha de gás, Pa
 P_{13} : Pressão na coluna de produção no topo da golfada de líquido, Pa

Coluna de líquido

Valem para este componente, neste estágio, as equações (4.2.7) e (4.2.9), respectivamente derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento na coluna de líquido no método intermitente com pistão. Repete-se abaixo, enumeradas na sequência deste capítulo, as duas equações acima.

$$\frac{dh_{ires}}{dt} - \frac{q_{res}}{A_t} = 0 \quad (4.4.39)$$

$$\frac{dP_{t1}}{dt} - \frac{dP_{gt1}}{dt} - \rho_l g \frac{dh_{ires}}{dt} = 0 \quad (4.4.40)$$

onde,

- h_{ires} : Altura da coluna de líquido alimentado pelo reservatório, m
 q_{res} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s
 P_{gt1} : Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, considerando apenas a coluna de gás, Pa
 P_{t1} : Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, Pa

Equações constitutivas

As equações (4.4.29),(4.4.32), (4.4.34), (4.4.36), (4.4.37), (4.4.38), (4.4.39) e (4.4.40), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 8 equações com 11 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se três equações constitutivas : a primeira - (4.4.41) - parte da definição de velocidade como taxa de variação da posição e as outras duas - (4.4.42) e (4.4.43) - utilizam a equação de estado dos gases reais para definir a densidade média em cada coluna - de injeção e de produção.

$$v_e - \frac{dh_e}{dt} = 0 \quad (4.4.41)$$

$$\frac{d\rho_{gni}}{dt} = \frac{M}{R} \frac{1}{Z_{c1} T_{c1}} \frac{dP_{c1}}{dt} \quad (4.4.42)$$

$$\frac{d\rho_{gtp}}{dt} = \frac{M}{R} \frac{1}{Z_{c1} T_{c1}} \frac{dP_{c1}}{dt} \quad (4.4.43)$$

A formulação correta para a densidade do gás em cada coluna, relacionadas nas equações (4.4.44) e (4.4.45), deu problemas devido ao aumento elevado na pressão P_{c1} durante o estágio de produção da golfada, o que não se observa na prática. Este tipo de problema é semelhante ao ocorrido com o método intermitente convencional : aumento elevado na pressão P_{11} , durante o estágio de produção da golfada, ao adotar-se para o cálculo da densidade média do gás a média entre as pressões P_{11} e P_{12} . Assim como no método intermitente convencional o problema foi contornado adotando-se, para a densidade média, a densidade no ponto 1 da coluna de injeção - ponto à jusante do bean.

$$\frac{d\rho_{gni}}{dt} = \frac{M}{2R} \left(\frac{1}{Z_{c1} T_{c1}} \frac{dP_{c1}}{dt} + \frac{1}{Z_{11} T_{11}} \frac{dP_{g1}}{dt} \right) \quad (4.4.44)$$

$$\frac{d\rho_{gtp}}{dt} = \frac{M}{2R} \left(\frac{1}{Z_{11} T_{11}} \frac{dP_{g1}}{dt} + \frac{1}{Z_{12} T_{12}} \frac{dP_{12}}{dt} \right) \quad (4.4.45)$$

4.4.3 Estágio 3 - produção da golfada

O sistema de equações para este estágio é o mesmo do estágio anterior, substituindo-se apenas a equação (4.4.38), relativa ao balanço de momento na golfada de líquido, pela equação (4.4.46).

$$(z_p - h_l) \frac{dv_e}{dt} - \frac{(P_{t2} - P_{ts})}{\rho_l} + \frac{f_l v_e^2 (z_p - h_e)}{2D} + g(z_p - h_e) + 0,3 v_e^2 = 0 \quad (4.4.46)$$

4.4.4 Estágio 4 - descompressão do gás

Neste estágio todo o gás injetado é produzido na superfície. Inicia-se quando o pig-espuma chega à superfície, após a produção da golfada de líquido, e termina quando a pressão do gás na extremidade da coluna for igual ao valor no início do ciclo. Admite-se para este estágio que o fluido da formação passa a acumular-se nas duas colunas - injeção e produção, também sem sofrer influência do gás circulante. E, por outro lado, esta coluna de líquido que se forma não impede a circulação do gás. Ou seja, colunas de líquido e gás são tratadas de forma independente, sem interferência entre si. Compõe o sistema físico : a coluna de gás e a coluna de líquido da formação.

Coluna de gás

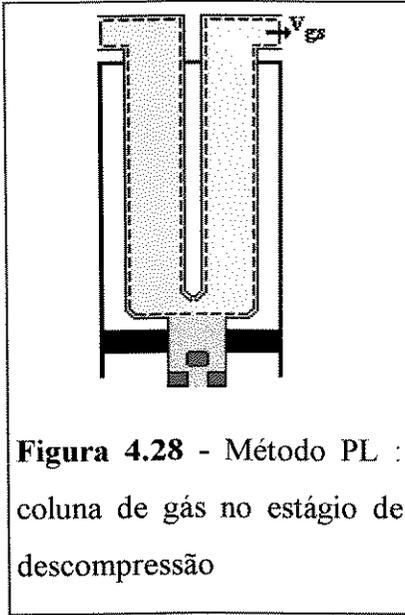


Figura 4.28 - Método PL :
coluna de gás no estágio de
descompressão

Balço de massa - aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de gás (Figura 4.28) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= A_t \frac{d}{dt} [\rho_g 2 z_p] \\ &= 2 A_t z_p \frac{d\rho_g}{dt} \end{aligned} \quad (4.4.47)$$

onde,

- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- z_p : Profundidade da extremidade das colunas de injeção e de produção, m
- ρ_g : Massa específica do gás, kg/m^3

De (4.4.31), para $h_e = z_p$, tem-se que

$$\frac{d\rho_g}{dt} = 0.5 \left(\frac{d\rho_{gti}}{dt} + \frac{d\rho_{gtp}}{dt} \right) \quad (4.4.48)$$

Substituindo-se (4.4.48) em (4.4.47) tem-se, para o primeiro termo do balanço de massa na coluna de gás :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = A_t z_p \left(\frac{d\rho_{gti}}{dt} + \frac{d\rho_{gtp}}{dt} \right) \quad (4.4.49)$$

Tem-se para o segundo termo que

$$\int_{sc} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho_{gs} v_{gs} A_t \quad (4.4.50)$$

onde,

v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
 ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{ts} e T_{ts} , kg/m³

Substituindo-se (4.4.49) e (4.4.50) em (4.2) obtém-se :

$$z_p \left(\frac{d\rho_{g^{ti}}}{dt} + \frac{d\rho_{g^{tp}}}{dt} \right) + \rho_{gs} v_{gs} = 0 \quad (4.4.51)$$

Definindo-se a velocidade média do gás como a média aritmética entre a velocidade na superfície e a velocidade à jusante do *bean* de injeção, tem-se :

$$v_g = 0.5(v_{gc1} + v_{gs}) \quad (4.4.52)$$

onde,

v_g : Velocidade do gás, m/s
 v_{gc1} : Velocidade do gás à jusante do *bean* de injeção, m/s

Considerando-se que neste estágio não ocorre injeção de gás pelo *bean*, portanto $v_{gc1} = 0$, a velocidade do gás na superfície é

$$v_{gs} = 2 v_g \quad (4.4.53)$$

Obtém-se a equação final para o balanço de massa na coluna de gás substituindo-se (4.4.53) em (4.4.51)

$$z_p \left(\frac{d\rho_{g^{ti}}}{dt} + \frac{d\rho_{g^{tp}}}{dt} \right) + 2 \rho_{gs} v_g = 0 \quad (4.4.54)$$

Balanço de momento - continua valendo, para o balanço de momento na coluna de injeção, a equação (4.4.34) do estágio anterior. Para o balanço de momento na coluna de produção vale a equação (4.4.36) com as seguintes modificações : faz-se

$h_e = z_p$; $\frac{dh_e}{dt} = 0$ e $\frac{dP_{t2}}{dt} = 0$. Mostra-se, abaixo, a equação final para o balanço de momento na coluna de gás da coluna de produção .

$$\frac{dP_{g1}}{dt} - \left(\frac{f_g v_g^2 z_p}{2D} + g z_p \right) \frac{d\rho_{gp}}{dt} - \frac{f_g \rho_{gp} v_g z_p}{D} \frac{dv_g}{dt} = 0 \quad (4.4.55)$$

Coluna de líquido

Balanço de massa - continua valendo, com pequena modificação, a mesma equação desenvolvida no estágio anterior. Modifica-se o balanço de massa porque admite-se, neste estágio, que o líquido da formação distribui-se para as duas colunas. Mostra-se, na equação (4.4.56), a equação final para o balanço de massa na coluna de líquido neste estágio.

$$\frac{dh_{res}}{dt} - \frac{q_{res}}{2 A_i} = 0 \quad (4.4.56)$$

Balanço de momento - continua valendo a equação (4.4.40), desenvolvida para este componente no estágio anterior.

Equações constitutivas

As equações (4.4.34), (4.4.35), (4.4.40), (4.4.54) e (4.4.56) derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, formam um sistema de 5 equações com 7 variáveis. Para fechar o sistema utiliza-se então duas equações constitutivas - (4.4.55) e (4.4.56) - que partem, respectivamente, da definição da densidade média do gás nas colunas de injeção e produção.

$$\frac{d\rho_{gn}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{M}{R} \left(\frac{1}{Z_{c1} T_{c1}} \frac{dP_{c1}}{dt} + \frac{1}{Z_{t1} T_{t1}} \frac{dP_{gt1}}{dt} \right) \quad (4.4.57)$$

$$\frac{d\rho_{gtp}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{M}{R} \frac{1}{Z_1 T_1} \frac{dP_{g1}}{dt} \quad (4.4.58)$$

4.4.5 Estágio 5 - Alimentação

Neste estágio o líquido do reservatório acumula-se nas colunas de produção e elevação. Quando o nível de líquido inicial é restabelecido, gás é novamente injetado na superfície, reiniciando-se o ciclo de produção. Compõe o sistema físico apenas a coluna de líquido

Balanço de massa - continua valendo a equação (4.4.56) do estágio anterior.

Balanço de momento - é obtida da equação (4.4.40), derivada do balanço de momento para este componente no estágio anterior, fazendo-se $\frac{dP_{g1}}{dt} = 0$.

$$\frac{dP_{11}}{dt} - \rho_l g \frac{dh_{res}}{dt} = 0 \quad (4.4.59)$$

As equações (4.4.56) e (4.4.59), derivadas da aplicação dos balanços de massa e de momento nos componentes do sistema físico, fecham o sistema de equações para este estágio do ciclo de produção do método Pig Lift.

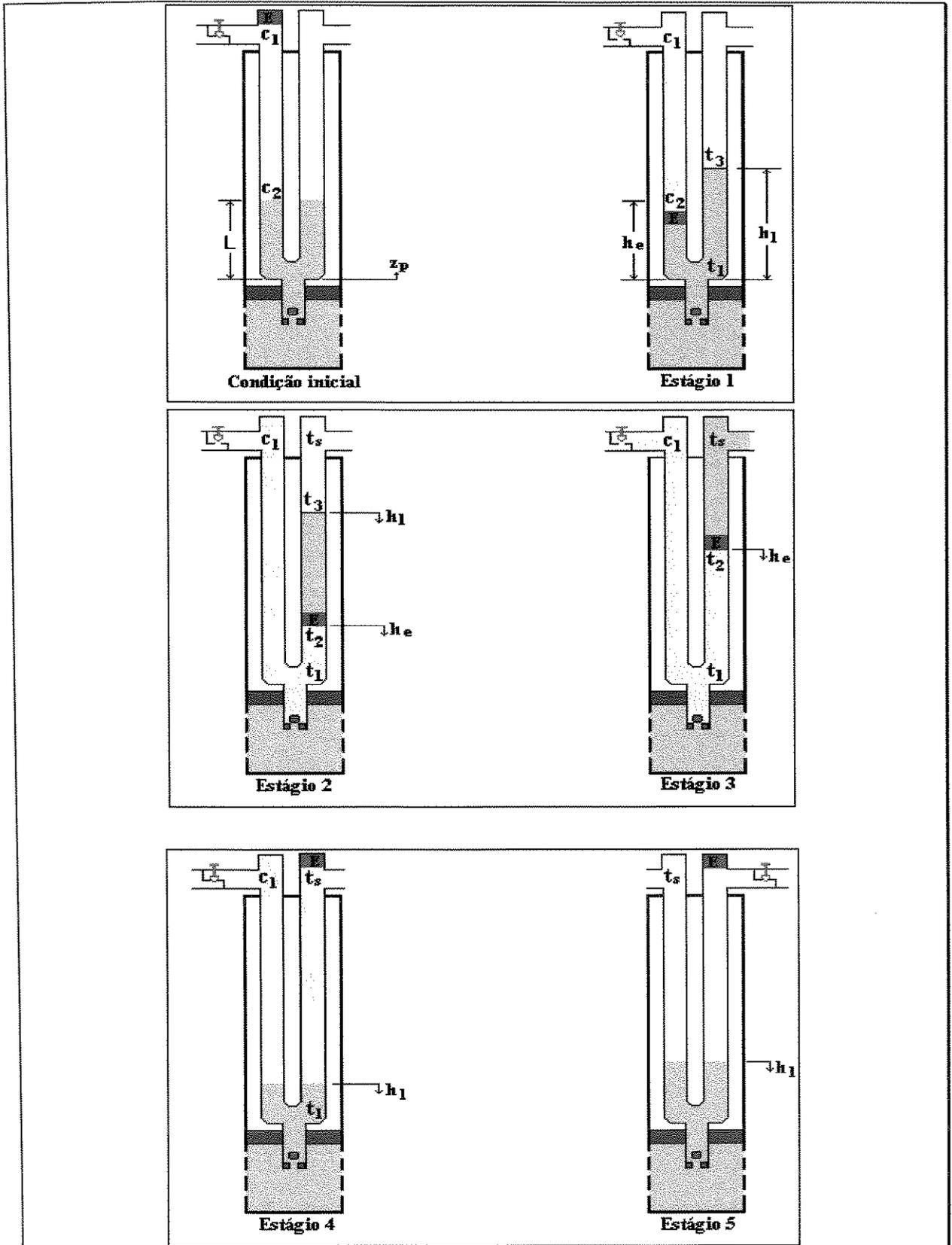


Figura 4.29 - Posição das variáveis em cada estágio do ciclo de produção do método Pig Lift.

5. Simulação computacional

5.1. Solução dos modelos

Os modelos são solucionados resolvendo-se numericamente os sistemas de equações obtidos para cada estágio do ciclo de produção. Toda programação foi implementada no software Mathematica, utilizando-se, para a solução numérica do sistema de equações, a função NDSolve, cuja sintaxe é :

$$\text{NDSolve}[\{\text{eq}_1, \text{eq}_2, \dots\}, \{y_1, y_2, \dots\}, \{t, t_{\min}, t_{\max}\}],$$

onde,

$\{\text{eq}_1, \text{eq}_2, \dots\}$ é uma lista com as Equações Diferenciais Ordinárias do sistema, mais as respectivas condições iniciais ;

$\{y_1, y_2, \dots\}$ é uma lista das variáveis (funções) a serem obtidas numericamente ;

$\{t, t_{\min}, t_{\max}\}$ representa o range de variação da variável independente t.

Definidas as EDO's, e as variáveis, ficam faltando apenas as condições iniciais de cada estágio. Relaciona-se, a seguir, as equações diferenciais ordinárias que compõem os sistemas de equações para cada método, assim como as condições iniciais de cada variável em cada estágio do ciclo de produção.

5.1.1. Método *Gas Lift* Intermitente Convencional

Sistema de equações

Resume-se, na Tabela 5.1, o sistema de equações e as variáveis para cada estágio do ciclo de produção.

Tabela 5.1 - Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método GLI.

Estágio	Equações - 4.1.	Variáveis
1	6, 10, 17, 18,19	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, \rho_{c1}, \rho_{c2}$
2	6, 9, 17, 18, 19, 26, 28, 32,35, 40, 46, 48, 50	$h_B, h_l, m_{tc}, P_{t1}, P_{t2}, P_{c1}, P_{c2}, \rho_B, \rho_{c1}, \rho_{c2}, v_B, v_l, y$
3	6, 9, 17, 18, 19, 26, 28, 32, 35, 40, 48, 50, 53	$h_B, h_l, m_{tc}, P_{t1}, P_{t2}, P_{c1}, P_{c2}, \rho_B, \rho_{c1}, \rho_{c2}, v_B, v_l, y$
4.1	6, 9, 17, 18, 19, 57, 69, 72, 73, 75	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, P_{t1}, \rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_g, v_f, v_g, y$
4.2	76, 80, 83, 84, 87, 89, 90	$h_l, P_{t1}, P_{gt1}, \rho_g, v_f, v_g, y$
4.3	89, 94, 97, 107, 108	$h_l, P_{t1}, P_{gt1}, \rho_{gt1}, y$
5	94, 107, 109	h_l, P_{t1}, y

Condições iniciais

Estágio 1

Inicia-se com a abertura da válvula motora na superfície e termina com a abertura da válvula de *gas lift*. As condições iniciais para este estágio são :

Pressão no revestimento na profundidade da válvula de *gas lift* - P_{c2} : é igual à pressão no domo da válvula de *gas lift* (P_{bt}), calculada utilizando-se a equação (5.1), onde P_{to} e P_{vo} são respectivamente as pressões no tubo e no espaço anular no instante de abertura da válvula de *gas lift*, e R_v é a relação A_v/A_b , função do modelo e sede da válvula de *gas lift*.

$$P_{bt} = P_{vo} (1 - R_v) + P_{to} R_v \quad (5.1)$$

P_{to} é calculada pela equação (5.2) abaixo,

$$P_{to} = P_{t3} + \rho_l gL \quad (5.2)$$

e P_{vo} é obtida da relação P_{to}/P_{vo} - dado de entrada do simulador.

P_{t3} é calculada utilizando-se a equação (5.3),

$$P_{t3} = P_{ts} e^{\frac{M g z_v}{Z R T}} \quad (5.3)$$

onde M , massa molecular do gás, é igual a 29 d_g .

A massa específica do líquido (ρ_l) - é calculada pela equação (5.4),

$$\rho_l = d_l \rho_w \quad (5.4)$$

onde ρ_w - massa específica da água doce - é igual a 1,0 g/cm^3 ; e a densidade do líquido (d_l) é calculada pela equação (5.5) abaixo.

$$d_l = \frac{BSW}{100} d_w + \left(1 - \frac{BSW}{100}\right) d_o \quad (5.5)$$

onde BSW é a porcentagem de água no líquido produzido e d_o é a densidade relativa do óleo (água = 1,0).

Finalmente, assume-se o valor de 1.07 para d_w e calcula-se d_o a partir da equação (5.6).

$$d_o = \frac{141.5}{131.5 + API} \quad (5.6)$$

onde API é a densidade do óleo em grau API.

Os valores de P_{ts} , d_g , BSW e API são obtidos dos dados de entrada. Já o valor de L - comprimento inicial da golfada de líquido - é obtido a partir da relação L/H , também fornecida na entrada de dados do simulador.

Pressão no revestimento na superfície - P_{c1} : é calculada a partir da equação (5.7).

$$P_{c1} = \frac{P_{c2}}{e^{\frac{M g z_v}{Z_{c2} R T_{c2}}}} \quad (5.7)$$

Massa específica do gás na profundidade da válvula de gas lift - ρ_{c2} : é calculada a partir da equação (5.8).

$$\rho_{c2} = \frac{P_{c2} M}{Z_{c2} R T_{c2}} \quad (5.8)$$

Massa específica do gás na superfície - ρ_{c1} : é calculada a partir da equação (5.9).

$$\rho_{c1} = \frac{P_{c1} M}{Z_{c1} R T_{c1}} \quad (5.9)$$

Massa de gás no espaço anular - m_{tc} : é calculada a partir da equação (5.10).

$$m_{tc} = \frac{P_{tc} M V_{tc}}{Z_{tc} R T_{tc}} \quad (5.10)$$

onde,

$$P_{tc} = \frac{1}{2}(P_{c1} + P_{c2}) \quad (5.11)$$

$$T_{tc} = \frac{1}{2}(T_{c1} + T_{c2}) \quad (5.12)$$

e Z_{tc} é calculado para P_{tc} e T_{tc} .

Variável de controle : Considera-se que a válvula de *gas lift* assume apenas duas posições : ou totalmente aberta ou totalmente fechada. A válvula estará fechada quando a resultante das forças que atuam no fole e na esfera da ponta de haste for negativa ; e, aberta, caso a resultante destas forças seja positiva.

Calcula-se a resultante das forças - rF - a partir da equação (5.13),

$$rF = [(P_{c2} - P_{bt}) - (P_{c2} - P_{to}) Rv] A_b \quad (5.13)$$

onde A_b é a área do fole da válvula de *gas lift*.

A cada instante de tempo o valor de rF é calculado. No início do estágio o seu valor é positivo, indicando que a válvula de *gas lift* encontra-se fechada. Porém à medida que a pressão no revestimento aumenta seu valor diminui, até tornar-se igual a zero. Neste instante a válvula de *gas lift* se abre, iniciando o segundo estágio.

Estágio 2

Inicia-se com a abertura da válvula de *gas lift* e termina quando o topo da golfada de líquido chega à superfície. As condições iniciais para as variáveis do espaço anular, respectivamente P_{c1} , P_{c2} , ρ_{c1} , ρ_{c2} e m_{lc} , são iguais àquelas do final do estágio anterior. Para as demais variáveis adotam-se os seguintes valores iniciais :

Altura da base da golfada - h_B : adota-se um valor igual a 5% do comprimento inicial da golfada de líquido (L). Ou seja , $h_B = 0,05 L$;

Altura da coluna de fluido - h_l : adota-se, com o objetivo de preservar o balanço de massa de líquido, o valor dado pela equação (5.14) :

$$h_l = \left(1 + 0,05 \frac{A_B}{A_t} \right) L \quad (5.14)$$

Pressão no tubo na profundidade da válvula de gas lift - P_{t1} : é igual à pressão de tubo P_{to} , calculada a partir da equação (5.2).

Pressão no topo da bolha de gás - P_{t2} : considerando-se que o comprimento da bolha de gás inicial é pequeno adota-se um valor igual à pressão na profundidade da válvula de *gas lift* - P_{to} .

Densidade média da bolha de gás - ρ_B : é calculada a partir da equação (5.15).

$$\rho_B = \frac{P_{t1} M}{Z_{t1} R T_{t1}} \quad (5.15)$$

Velocidade da golfada de líquido - v_l : adota-se o valor de 0.0152 m/s ;

Velocidade da bolha de gás - v_B : é calculada utilizando-se a equação (4.1.49).

Espessura do filme de líquido - y : adota-se um valor igual a 0.01 D .

A partir do estágio 3 - de produção da golfada (inclusive) - a condição inicial de cada variável é igual ao valor da variável no final do estágio imediatamente anterior.

5.1.2. Método *Gas Lift* Intermitente com Pistão

Sistema de equações

Resume-se, na Tabela 5.2, o sistema de equações e as variáveis para cada estágio do ciclo de produção.

Tabela 5.2- Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método GLIP.

Estágio	Equações - 4.	Variáveis
1	1.6, 1.10, 1.17, 1.18, 1.19	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, \rho_{c1}, \rho_{c2}$
2	1.6, 1.9, 1.17, 1.18, 1.19, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.7, 2.9, 2.10, 2.11	$h_p, h_l, h_{res}, m_{tc}, P_{t1}, P_{t2}, P_{c1}, P_{c2}, P_{gt1}, \rho_B, \rho_{c1}, \rho_{c2}, v_p$
3	1.6, 1.9, 1.17, 1.18, 1.19, 2.1, 2.2, 2.3, 2.7, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12	$h_p, h_l, h_{res}, m_{tc}, P_{t1}, P_{t2}, P_{c1}, P_{c2}, P_{gt1}, \rho_B, \rho_{c1}, \rho_{c2}, v_p$
4.1	1.6, 1.9, 1.17, 1.18, 1.19, 2.7, 2.9, 2.13, 2.14, 2.15	$h_l, m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, P_{t1}, P_{gt1}, \rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_g, v_g$
4.2	2.7, 2.9, 2.16, 2.19	$h_l, P_{t1}, P_{gt3}, \rho_{gt3}$
5	2.7, 1.109	h_l, P_{t1}

Condições iniciais

Estágio 1

Este estágio é idêntico ao estágio equivalente no GLI. Valem portanto, para as condições iniciais das variáveis no método GLIP, os mesmos valores assumidos no método GLI.

Estágio 2

Também aqui as condições iniciais das variáveis são as mesmas do GLI. Cita-se abaixo, devido às suas particularidades, algumas variáveis deste método.

Altura do pistão - h_p : variável idêntica a h_B no GLI. Adota-se, portanto, um valor igual a 5% do comprimento inicial da golfada de líquido (L). Ou seja , $h_p = 0,05 L$;

Altura da coluna de fluido - h_l : é calculada utilizando-se a equação (5.14). Porém como no método GLIP tem-se, por hipótese, que $A_B = A_t$, h_l é igual a 1,05 L.

Velocidade do pistão - v_p : mesmo valor adotado para v_l no GLI : 0.0152 m/s. No método GLIP as velocidades do pistão, da bolha de gás e da golfada de líquido são, por hipótese, iguais.

Pressão no tubo, considerando apenas a coluna de gás, na profundidade da válvula de gas lift - P_{gt1} : é igual à pressão de tubo P_{to} , calculada a partir da equação (5.2).

A partir do estágio 3 - de produção da golfada (inclusive) - a condição inicial de cada variável é igual ao valor da variável no final do estágio imediatamente anterior.

5.1.3. Método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação

Sistema de equações

Resume-se , na Tabela 5.3, o sistema de equações e as variáveis para cada estágio do ciclo de produção.

Tabela 5.3- Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método GLIC.

Estágio	Equações - 4.	Variáveis
1	3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, \rho_{c1}, \rho_{c2}$
2	1.9, 3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.8, 3.11, 3.15, 3.21, 3.28, 3.29, 3.30, 3.35	$h_{lt}, h_{lc}, m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{c4}, P_{t1}, \rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_{gc}, v_{lt}, v_{lc}$
3	1.9, 1.28, 1.32, 1.35, 1.40, 1.46, 1.48, 1.50, 3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.39, 3.40, 3.41	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{t1}, P_{t2}, \rho_B, \rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_{gc}, v_l, v_B, h_l, h_B, y$
4	1.9, 1.28, 1.32, 1.35, 1.40, 1.48, 1.50, 1.53, 3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.39, 3.40, 3.41	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{t1}, P_{t2}, \rho_B, \rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_{gc}, v_l, v_B, h_l, h_B, y$
5.1	1.9, 1.57, 1.69, 1.73, 1.75, 3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.40, 3.41, 3.44	$m_{tc}, P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{t1}, \rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_{gc}, \rho_{gt}, v_g, v_f, y$
5.2	1.69, 1.73, 1.76, 1.90, 3.40, 3.45, 3.48, 3.50, 3.51	$h_l, P_{c3}, P_{t1}, P_{t3}, \rho_{gc}, \rho_{gt}, v_g, v_f, y$
5.3	1.90, 1.94, 1.97, 3.40, 3.50, 3.51, 3.53	$h_l, P_{c3}, P_{t1}, P_{t3}, \rho_{gc}, \rho_{gt3}, y$
6	1.94, 1.109, 3.53	h_l, P_{t1}, y

Condições iniciais

Estágio 1

Este estágio é, a menos do valor da pressão P_{t0} - pressão no tubo no instante de abertura da válvula de *gas lift*, idêntico ao estágio equivalente no GLI. A pressão P_{t0} é, neste estágio do método GLIC, igual à pressão P_{t3} - cujo valor é dado pela equação (5.3). As demais variáveis possuem as mesmas condições iniciais do GLI

Estágio 2

É o estágio de transferência do líquido do espaço anular da câmara para a coluna de produção. Inicia-se com a abertura da válvula de *gas lift* e termina quando o gás injetado atinge o tubo perfurado.

As condições iniciais para as pressões, densidades e massa de gás no espaço anular, respectivamente P_{c1} , P_{c2} , ρ_{c1} , ρ_{c2} e m_{lc} , são iguais àquelas do final do estágio anterior. Para as demais variáveis adotam-se os seguintes valores iniciais :

Altura da coluna de líquido no espaço anular da câmara - h_{lc} : adota-se um valor inicial igual a 95 % do comprimento da câmara. Ou seja, $h_{lc} = 0,95 LC$.

Altura do topo da coluna de líquido no tubo - h_{lt} : assume o mesmo valor de h_{lc} . Ou seja : $h_{lt} = 0,95 LC$.

Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift* - P_{c3} : como o espaço anular da câmara comunica-se, pela sua parte superior, com a coluna de produção - por meio de um simples orifício ou de uma válvula de alívio - a pressão P_{c3} , no instante de abertura da válvula de *gas lift*, é igual a P_{c3} - calculada pela equação (5.3).

Pressão do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, P_{c4} : no instante inicial a pressão no topo da coluna de líquido (P_{c4}) é igual à pressão à jusante da válvula de *gas lift* - P_{c3} .

Pressão no tubo na profundidade do tubo perfurado - P_{t1} : calculada utilizando-se a seguinte equação : $P_{t1} = P_{c3} + \rho_l g L$.

Velocidade do líquido no espaço anular da câmara, - v_{lc} : adota-se um valor igual a 0.0003 m/s.

Velocidade do líquido no tubo - v_{lt} : é calculada utilizando-se a equação (4.3.15).

Massa específica do gás no espaço anular da câmara - ρ_{gc} : é obtida pela média aritmética da massa específica do gás nos pontos 3 e 4 - $\rho_{gc} = 0,5(\rho_{c3} + \rho_{c4})$; ρ_{c3} e ρ_{c4} são calculadas utilizando-se a equação (5.7).

Estágio 3

É o estágio de elevação da golfada. Inicia-se quando o gás injetado atinge o tubo perfurado, elevando a golfada de líquido, e termina quando o topo da golfada chega à superfície. As condições iniciais para as variáveis m_{lc} , P_{c1} , P_{c2} , ρ_{c1} , ρ_{c2} , P_{c3} , ρ_{gc} e P_{t1} são iguais àquelas do final do estágio anterior. Para as demais variáveis adotam-se os mesmos valores iniciais, ou procedimentos, do GLI.

5.1.4. Método *Pig Lift*

Sistema de equações

Resume-se , na Tabela 5.4, o sistema de equações e as variáveis para cada estágio do ciclo de produção.

Tabela 5.4- Sistema de equações e variáveis em cada estágio do método *Pig Lift*..

Estágio	Equações - 4.	Variáveis
1	4.3, 4.4, 4.6, 4.9, 4.13 ,4.18, 4.19, 4.20, 4.21	$h_e, h_l, m_g, P_{c1}, P_{c2}, P_{t1}, v_e, v_l, \rho_{gti}$
2	4.29, 4.32, 4.34, 4.36, 4.37, 4.38 ,4.39 , 4.40, 4.41, 4.44, 4.45	$h_e, h_l, h_{lres}, m_g, P_{c1}, P_{gt1}, P_{t1}, P_{t2}, v_e, \rho_{gti}, \rho_{gtp}$
3	4.29, 4.32, 4.34, 4.36, 4.37, 4.39 , 4.40, 4.41, 4.44, 4.45, 4.46	$h_e, h_l, h_{lres}, m_{tc}, P_{c1}, P_{gt1}, P_{t1}, P_{t2}, v_e, \rho_{gti}, \rho_{gtp}$
4	4.34, 4.35, 4.40, 4.54, 4.56, 4.55, 4.56	$h_l, P_{c1}, P_{gt1}, P_{t1}, \rho_{gti}, \rho_{gtp}, v_g$
5	4.56, 4.59	h_l, P_{t1}

Condições iniciais

Estágio 1

É o estágio de transferência do líquido da coluna de injeção para a coluna de produção. Inicia-se com a abertura da válvula motora na superfície e termina quando o gás injetado atinge a extremidade das duas colunas - injeção e produção. As condições iniciais para as variáveis deste estágio são :

Altura da espuma - h_e : assume-se que, no instante inicial, o pig-espuma encontra-se na coluna de injeção, no topo da coluna de líquido. Ou seja, assume-se que h_e é igual a L - comprimento inicial da golfada de líquido.

Altura do topo da golfada de líquido - h_1 : no instante inicial o topo da golfada de líquido encontra-se a uma altura igual ao comprimento da golfada inicial : $h_1 = L$.

Massa de gás - m_g : calcula-se a massa de gás inicial pelo produto entre a massa específica média do gás na coluna de injeção pelo volume livre da coluna.

Pressão do gás, na coluna de injeção, na superfície - P_{c1} : a pressão P_{c1} é igual à pressão no tubo, na superfície. Ou seja, $P_{c1} = P_{ts}$.

Pressão do gás, na coluna de injeção, no topo da coluna de líquido - P_{c2} : calcula-se P_{c2} , a partir de P_{c1} , aplicando-se a equação abaixo :

$$P_{c2} = P_{c1} e^{\frac{M_g(z_p - L)}{ZRT}}$$

Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção - P_{t1} : é calculada utilizando-se a seguinte equação : $P_{t1} = P_{c2} + \rho_l gL$

Velocidade do pig-espuma - v_e : adota-se um valor inicial igual a 0.0003 m/s.

Velocidade da golfada de líquido - v_l : é calculada utilizando-se a equação (4.4.9).

Massa específica do gás na coluna de injeção - ρ_{gti} : é obtida pela média aritmética da massa específica do gás nos pontos 1 e 2 - $\rho_{gti} = 0,5(\rho_{c1} + \rho_{c2})$; ρ_{c1} e ρ_{c2} são calculadas utilizando-se a equação (5.7).

Estágio 2

É o estágio de elevação da golfada. Inicia-se quando o gás injetado atinge a extremidade da coluna de produção e termina quando o topo da golfada chega à superfície. As condições iniciais para as variáveis $m_g, P_{c1}, P_{t1}, \rho_{gti}$ e v_e são iguais àquelas do final do estágio anterior. Para as demais variáveis adotam-se os seguintes valores :

Altura da espuma - h_e : adota-se um valor igual a 0,05 L.

Altura do topo da golfada de líquido - h_1 : chega-se, pela aplicação da equação (5.14), ao valor de 1,05 L.

Altura da coluna de líquido alimentada pelo reservatório - h_{res} : todo o volume de líquido alimentado pelo reservatório no estágio de transferência é produzido na superfície junto

com a golfada de líquido. No início do estágio de elevação, portanto, não há líquido acumulado devido à alimentação do reservatório. Ou seja, $h_{res} = 0$.

Pressão na coluna de produção no topo da bolha de gás - P_{t2} : é igual ao valor de P_{t1} no final do estágio de transferência.

Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, considerando-se apenas a coluna de gás - P_{gt1} : é também igual ao valor de P_{t1} no final do estágio de transferência.

Massa específica do gás na coluna de produção - ρ_{gtp} : é igual ao valor de ρ_{gti} no final do estágio de transferência.

A partir do estágio 3 - de produção da golfada (inclusive) - a condição inicial de cada variável é igual ao valor da variável no final do estágio imediatamente anterior.

5.2. Parâmetros : de poço e de projeto - valores simulados

Os parâmetros envolvidos nos métodos intermitentes são divididos, do ponto de vista do dimensionamento, em duas categorias :

1. Aqueles sob os quais tem-se pouco ou nenhum controle - aqui definidos como parâmetros do poço. São aqueles que se referem às condições mecânicas do poço - diâmetro do revestimento e profundidade do canhoneio ; às propriedades dos fluidos produzidos - API, BSW, RGL, densidades da água e do gás ; às características do reservatório - pressão estática e índice de produtividade ; às condições de operação na superfície - pressão disponível do gás e pressão na cabeça do poço.
2. Aqueles sob os quais tem-se total controle - aqui definidos como parâmetros de projeto. São o diâmetro da coluna; a profundidade de injeção; o modelo e a sede da válvula de *gas lift*, o comprimento inicial da coluna de líquido (golfada); o volume de gás a ser injetado por ciclo; e a pressão no revestimento no instante de abertura da válvula de *gas lift*.

Mostra-se, na Tabela 5.5, as características de um poço, definido como poço base, que será utilizado como exemplo para análise e comparação entre os métodos. Os parâmetros de poço, criteriosamente definidos, fazem do poço base um poço representativo de um grande número de casos práticos. Além dos parâmetros do poço constam, na Tabela 5.5, o diâmetro da coluna, a profundidade e o modelo da válvula de *gas lift*. O que significa que estes parâmetros de projeto são também mantidos fixos durante todas as simulações.

Nas simulações que se seguem as variáveis são, portanto : o volume de gás injetado (V_{gi}), o comprimento inicial da golfada de líquido (L) e a pressão de abertura da válvula de *gas lift* (P_{vo}). O diâmetro da sede foi posteriormente fixado, após uma comparação entre os diâmetros mais comumente utilizados.

Optou-se por trabalhar com os parâmetros adimensionalizados, de forma a permitir uma possível generalização. Relaciona-se, abaixo, os adimensionais utilizados :

- V_{gi}/V_{gr} relação entre o volume de gás injetado por ciclo (V_{gi}) e o volume de gás de referência (V_{gr}), abaixo definido.
- L / H relação entre o comprimento da golfada de líquido inicial (L) e a altura estática de líquido (H).
- P_{to}/P_{vo} relação entre as pressões de tubo e revestimento no instante de abertura da válvula de *gas lift* - respectivamente P_{to} e P_{vo} .

Tabela 5.5 - Características do poço base.

Condições Mecânicas	
Profundidade de canhoneio - [m]	1500
Revestimento de produção - [in - lb/ft]	5 ½ - 15.5
Características do Reservatório	
Pressão estática (PE)- [kgf/cm ²]	85,20
Índice de produtividade (IP) - [(m ³ /d)/(kgf/cm ²)]	1,00
Propriedades dos Fluidos	
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
Condições operacionais	
Pressão na cabeça - [kgf/cm ²]	7,0
Pressão do compressor - [kgf/cm ²]	70
Temperatura na superfície - [°F]	80
Parâmetros de projeto	
Coluna de produção - [in]	2 3/8
OD da válvula de <i>gas lift</i> - [in]	1 ½
Profundidade da válvula de <i>gas lift</i> - [m]	1480

O volume de gás de referência (V_{gr}) expressa “o volume ocupado, na condição padrão, pela massa de gás contida no tubo, submetida a uma pressão igual à média entre a pressão de abertura da válvula de *gas lift* (P_{vo}) e a pressão de tubo de projeto (P_{tp})¹”. Segundo Liao⁽⁸⁾ este é o volume requerido, por ciclo, para obter-se a vazão máxima de produção.

Com o objetivo de simplificar a notação o ponto de operação é definido, para cada método de elevação, por uma lista das variáveis adimensionais, em percentual. Nos métodos *Gas Lift* Intermitente Convencional (GLI) e *Gas Lift* Intermitente com Pistão (GLIP) o ponto de operação será representado na forma $\{ L/H, P_{to}/P_{vo}, V_{gi}/V_{gr} \}$. No método *Gas Lift* Intermitente com Câmara (GLIC) o ponto de operação será representado na forma $\{ L/H, V_{gi}/V_{gr} \}$, já que a pressão de abertura da válvula é mantida constante em todas as simulações. No método *Pig Lift* (PL) o ponto de operação será representado por $\{ L/H \}$, já que a única variável em cada simulação é o comprimento da golfada inicial. Exemplificando, o ponto de operação $\{50,70,80\}$ corresponde, no GLI, a uma simulação para um comprimento da golfada inicial igual a 0,5 vezes a altura estática de líquido; uma pressão de tubo de projeto igual a 0,7 vezes a pressão de abertura da válvula de *gas lift* e um volume de gás injetado igual a 0,8 vezes o volume de gás de referência.

5.3. Principais variáveis do sistema

Mostra-se, nas Figuras de 5.1 a 5.16, o comportamento das principais variáveis do sistema, para cada método de elevação e para um determinado ponto de operação.

¹ P_{tp} é definida como a pressão no tubo na superfície (P_{ts}) mais a hidrostática do líquido na coluna de produção no início do estágio de elevação ($\rho g h_l$); no caso das instalações convencionais e com pistão, portanto, é igual à pressão de tubo no instante de abertura da válvula de *gas lift* (P_{to}); e, no caso das instalações com câmara e *pig lift*, é igual à pressão no tubo imediatamente após o estágio de transferência.

5.3.1. Método *Gas Lift* Intermitente convencional

Mostra-se, respectivamente nas Tabelas 5.6 e 5.7, os trechos correspondentes a cada estágio do ciclo de produção e os eventos para cada ponto mostrado nas Figuras de 5.1 a 5.4.

Tabela 5.6- Estágios do ciclo de produção para o método GLI.

Estágio	Trecho
Injeção de gás	AC
Elevação da golfada de líquido	BD
Produção da golfada de líquido	DE
Descompressão do gás - Fase II	EF
Descompressão do gás - Fase III	FG
Alimentação	GH

Tabela 5.7- Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.1 a 5.4.

Ponto	Evento
A	Abre-se a válvula motora na superfície
B	Abre-se a válvula de <i>gas lift</i> no fundo do poço
C	Fecha-se a válvula motora na superfície
D	Topo da golfada de líquido chega à superfície.
E	Base da golfada chega à superfície
F	Velocidade do filme de líquido torna-se igual a zero.
G	Concluída a descompressão do gás
H	Altura de líquido inicial restabelecida.

O estágio Descompressão - Fase I não existe para o exemplo mostrado; isto porque a válvula de *gas lift* fecha-se imediatamente antes da base da golfada atingir a superfície.

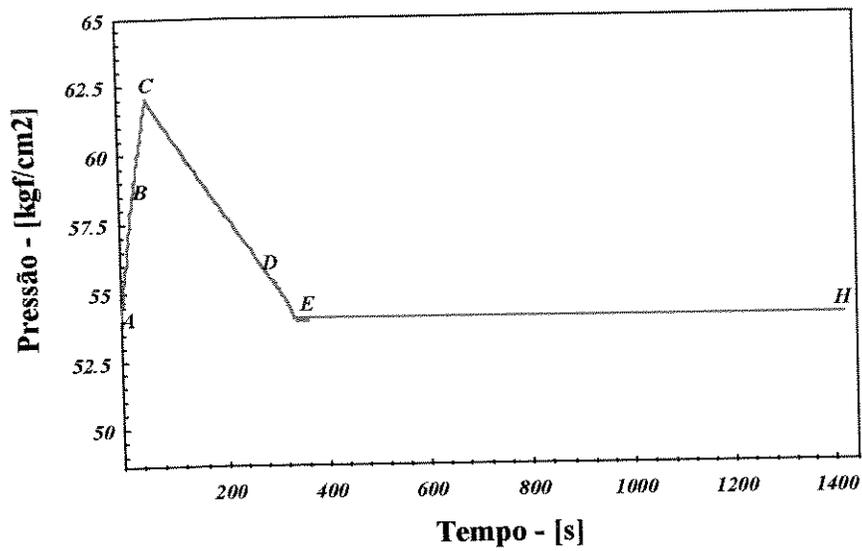


Figura 5.1 - Pressão do gás na superfície (P_{c1}), para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

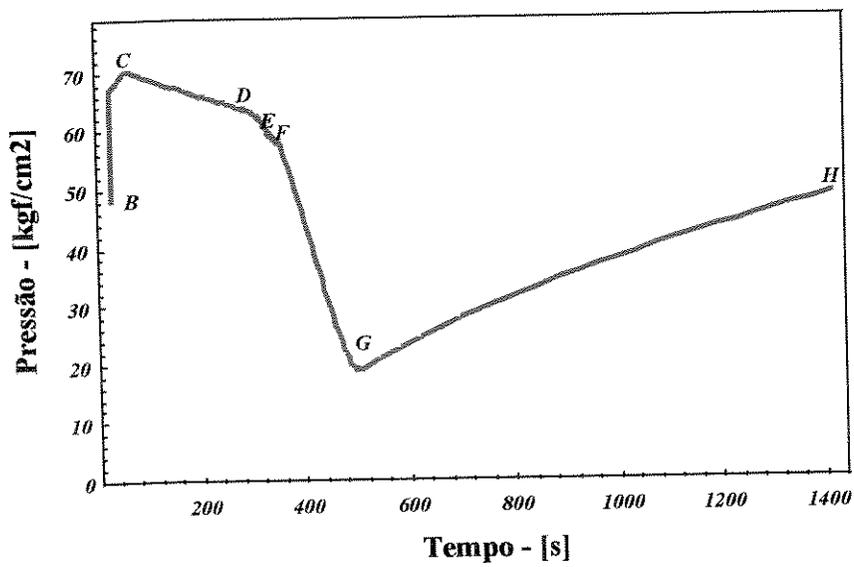


Figura 5.2 - Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

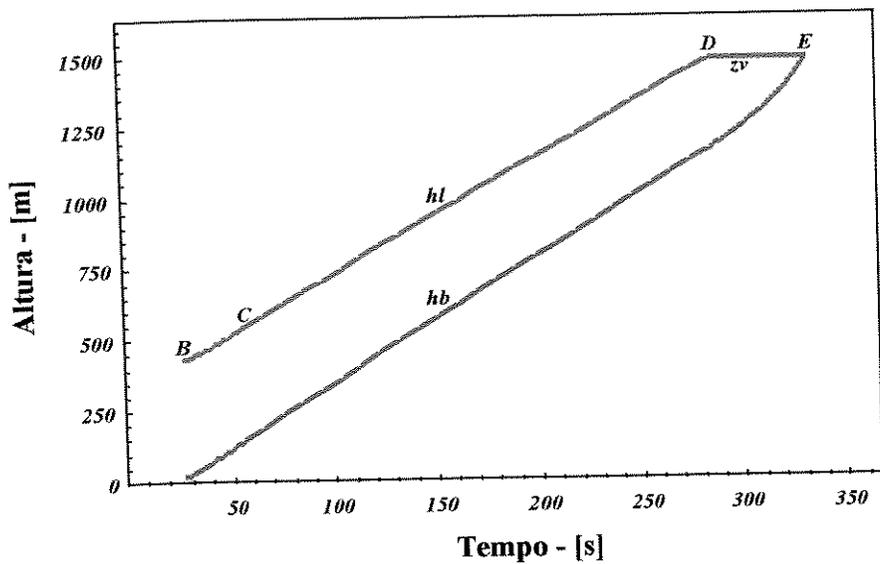


Figura 5.3 - Posição do topo (h_l) e da base da golfada (h_b), para o método GLI- poço base e ponto operacional {50,70,80}.

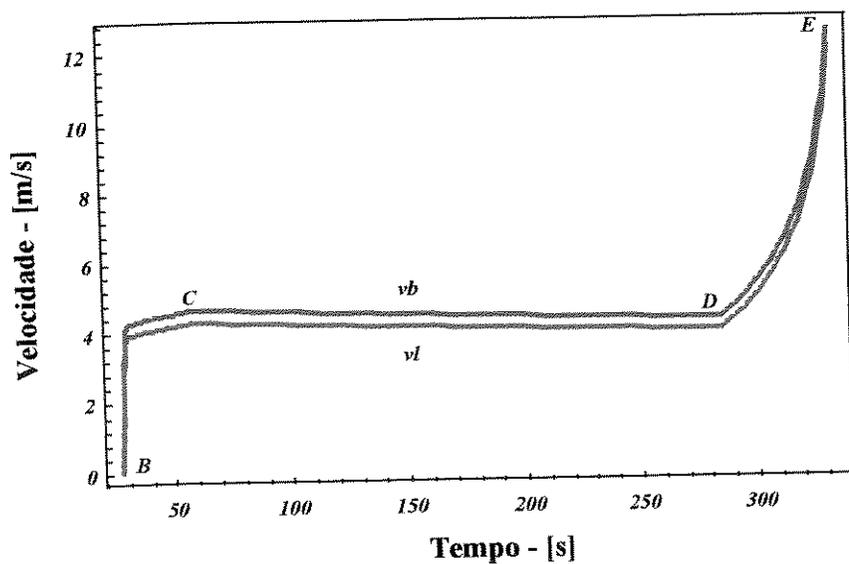


Figura 5.4 - Velocidades da bolha de gás (v_b) e da golfada de líquido (v_l), para o método GLI - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

5.3.2. Método *Gas Lift* Intermitente com Pistão

Mostra-se, respectivamente nas Tabelas 5.8 e 5.9, os trechos correspondentes a cada estágio do ciclo de produção e os eventos para cada ponto nas Figuras de 5.5 a 5.8.

Tabela 5.8 - Estágios do ciclo de produção para o método GLIP.

Estágio	Trecho
Injeção de gás	AC
Elevação da golfada de líquido	BD
Produção da golfada de líquido	DE
Descompressão do gás - Fase II	EF
Alimentação	FG

Tabela 5.9- Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.5 a 5.8.

Ponto	Evento
A	Abre-se a válvula motora na superfície
B	Abre-se a válvula de <i>gas lift</i> no fundo do poço
C	Fecha-se a válvula motora na superfície
D	Topo da golfada de líquido chega à superfície.
E	Base da golfada chega à superfície
F	Concluída a descompressão do gás
G	Altura de líquido inicial restabelecida.

Assim como no método intermitente convencional não existe a fase I do estágio de descompressão - a válvula de *gas lift* fecha-se antes da base da golfada atingir a superfície.

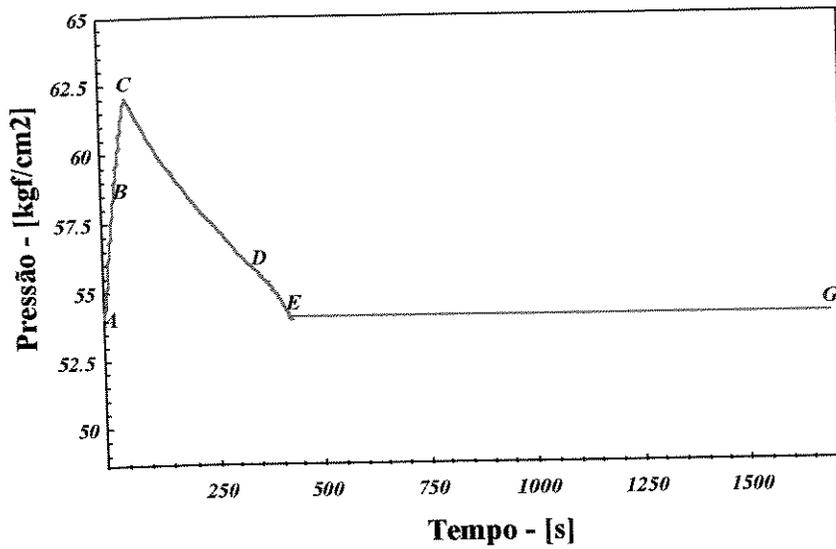


Figura 5.5- Pressão de gás na superfície (P_{cl}), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

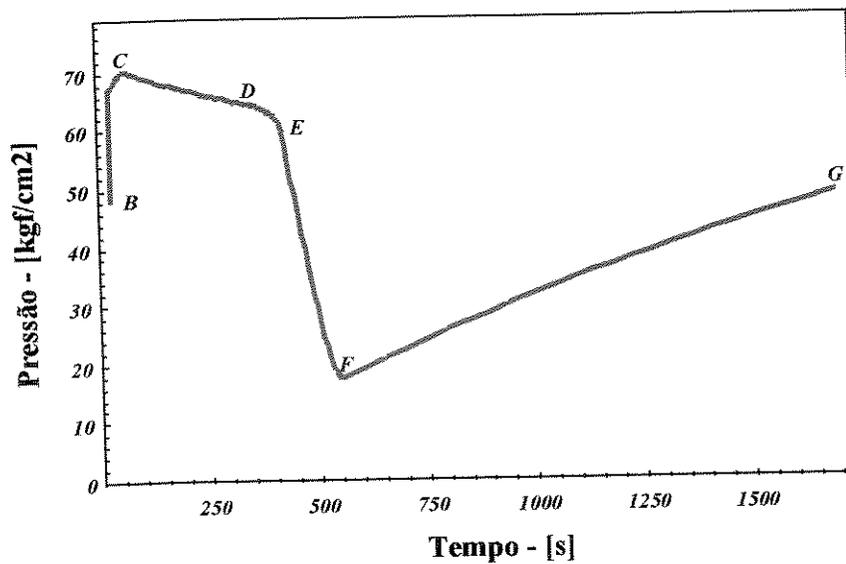


Figura 5.6 - Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

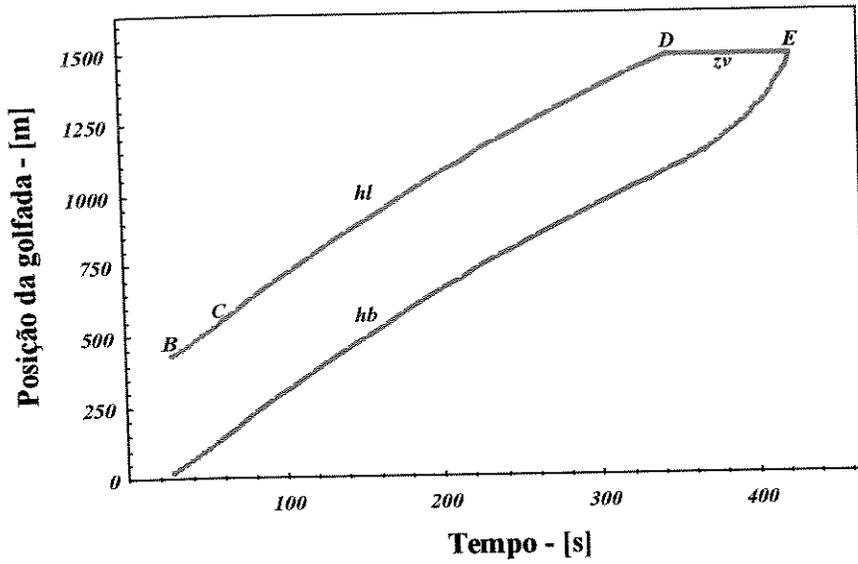


Figura 5.7 - Posição do topo (h_l) e da base da golfada (h_b), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

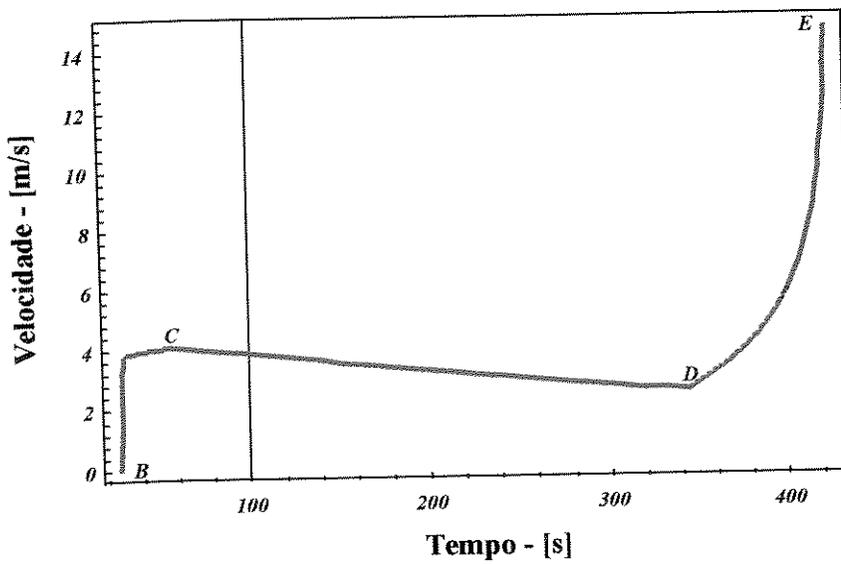


Figura 5.8 - Velocidades da bolha de gás (v_B) e da golfada de líquido (v_l), para o método GLIP - poço base e ponto operacional {50,70,80}.

5.3.3. Método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação

Mostra-se, respectivamente nas Tabelas 5.10 e 5.11, os trechos correspondentes a cada estágio do ciclo de produção e os eventos para cada ponto nas Figuras de 5.9 a 5.12.

Tabela 5.10 - Estágios do ciclo de produção para o método GLIC.

Estágio	Trecho
Injeção de gás	AD
Transferência de líquido	BC
Elevação da golfada de líquido	CF
Produção da golfada de líquido	FG
Descompressão do gás - Fase II	GH
Descompressão do gás - Fase III	HI
Alimentação	IJ

Tabela 5.11- Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.9 a 5.12.

Ponto	Evento
A	Abre-se a válvula motora na superfície
B	Abre-se a válvula de <i>gas lift</i>
C	Inicia-se a injeção de gás na coluna de produção
D	Fecha-se a válvula motora na superfície
E	Fecha-se a válvula de <i>gas lift</i>
F	Topo da golfada de líquido chega à superfície.
G	Base da golfada chega à superfície
H	Velocidade do filme de líquido torna-se igual a zero.
I	Concluída a descompressão do gás
J	Altura de líquido inicial restabelecida.

Assim como no método intermitente convencional não existe a fase I do estágio de descompressão - a válvula de *gas lift* fecha-se antes da base da golfada atingir a superfície.

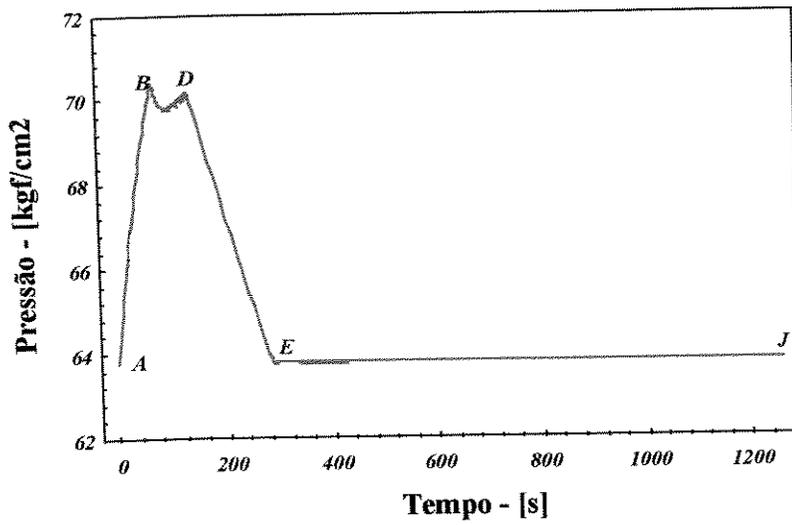


Figura 5.9 - Pressão de gás na superfície (P_{c1}), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {10,80}.

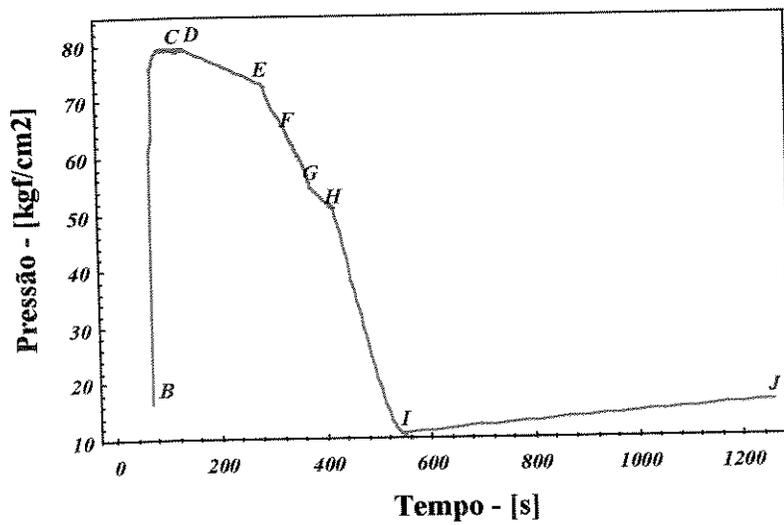


Figura 5.10 - Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {10,80}.

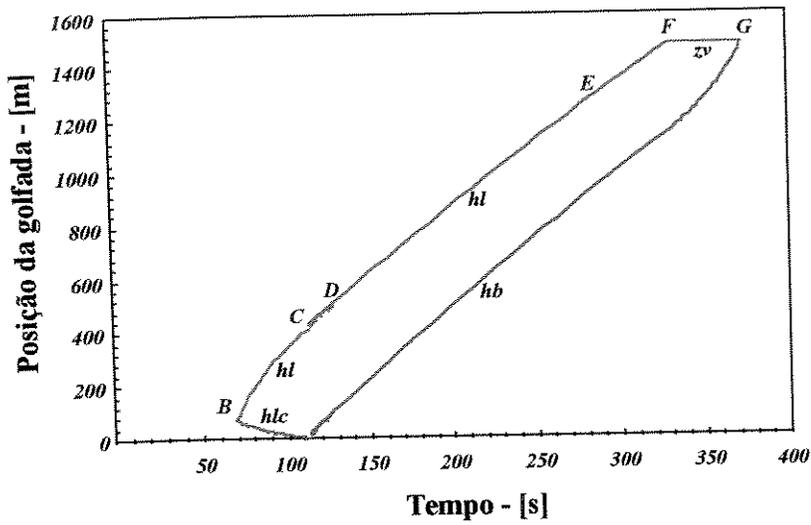


Figura 5.11 - Posição do topo (h_l) e da base da golfada (h_b), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {10,80}.

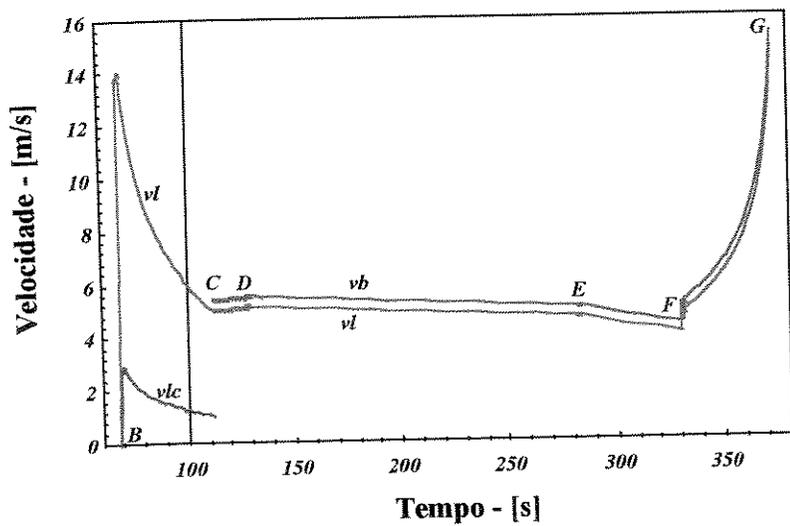


Figura 5.12 - Velocidades da bolha de gás (v_b) e da golfada de líquido (v_l), para o método GLIC - poço base e ponto operacional {10,80}.

5.3.4. Método *Pig Lift*

Mostra-se, respectivamente nas Tabelas 5.12 e 5.13, os trechos correspondentes a cada estágio do ciclo de produção e os eventos para cada ponto nas Figuras de 5.13 a 5.16.

Tabela 5.12 - Estágios do ciclo de produção para o método *Pig Lift*.

Estágio	Trecho
Transferência de líquido	AB
Elevação da golfada de líquido	BC
Produção da golfada de líquido	CD
Descompressão do gás	DE
Alimentação	EF

Tabela 5.13- Eventos correspondentes a cada ponto nas Figuras 5.13 a 5.16

Ponto	Evento
A	Abre-se a válvula motora na superfície
B	Inicia-se a injeção de gás na coluna de produção
C	Topo da golfada de líquido chega à superfície
D	Base da golfada de líquido chega à superfície
E	Pressão inicial de gás no fundo restabelecida
F	Altura de líquido inicial restabelecida.

Nas simulações adotou-se o procedimento de descompressão POD2.

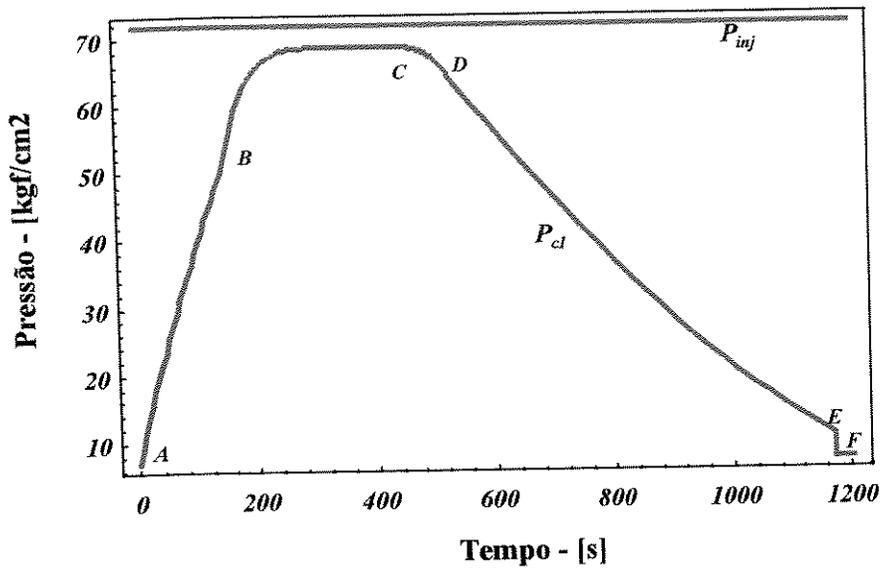


Figura 5.13 - Pressão de gás na superfície (P_{cl}), para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}.

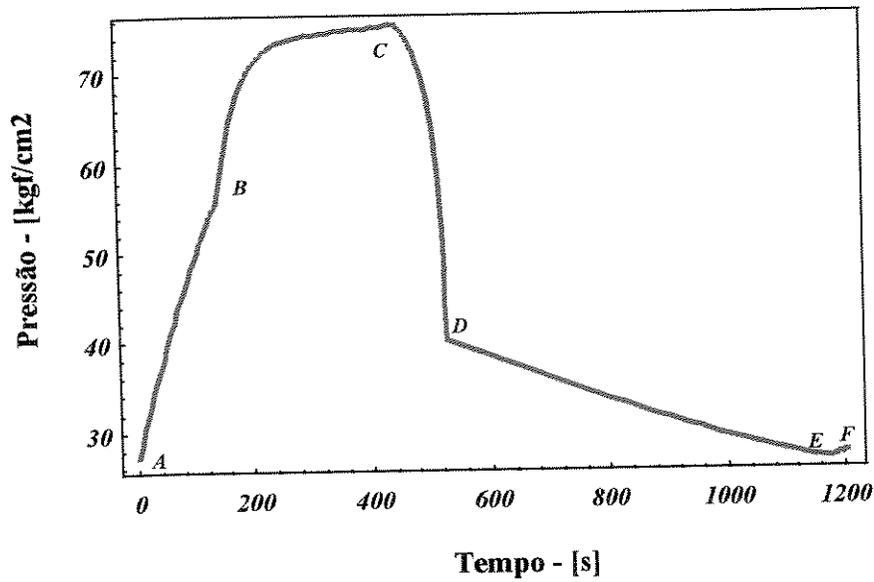


Figura 5.14 - Pressão de fundo em fluxo (P_{wf}), para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}.

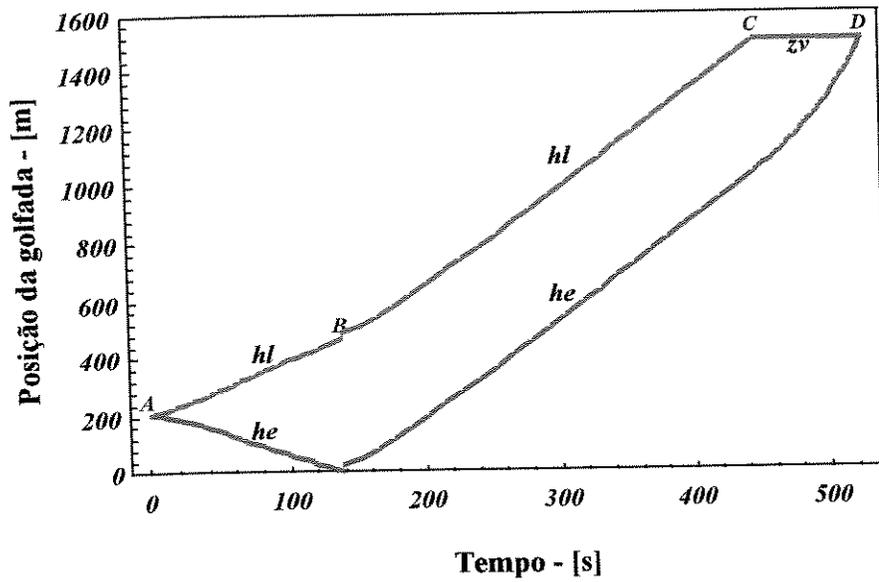


Figura 5.15 - Posição do topo (h_l) e da base da golfada ($h_B = h_e$), para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}.

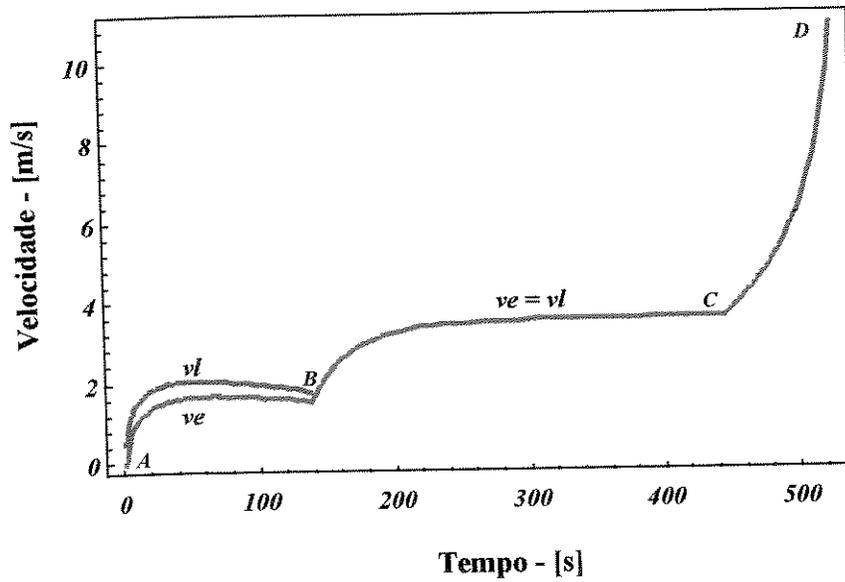


Figura 5.16 - Velocidades da bolha de gás ($v_B = v_e$) e da golfada de líquido (v_l), para o método Pig Lift - poço base e ponto operacional {25}.

5.4. Validação dos simuladores

Apenas dois simuladores puderam ser validados : o *Gas Lift* Intermitente Convencional e o *Pig Lift*.

Como Liao⁽⁸⁾ valida seu simulador comparando seus resultados com os dados experimentais de Brown⁽³⁾, Brill⁽⁵⁾ e Neely⁽⁶⁾, o simulador do Gas Lift Intermitente Convencional foi validado comparando-se os seus resultados com aqueles obtidos por Liao⁽⁸⁾. Mostra-se, na Tabela 5.14, os resultados obtidos por Liao⁽⁸⁾ e pelo simulador para o poço exemplo utilizado pelo autor.

Tabela 5.14- Comparação entre os resultados deste simulador com os dados obtidos por Liao⁽⁸⁾ em seu poço exemplo..

Parâmetro	Dados do trabalho de Liao		Dados do simulador
	Valor	Referência	
Volume da golfada final - [m ³]	0,309	Figura 29	0,299
Volume produzido por 'entrainment' - [m ³]	0,077	Figura 30	0,030
Volume produzido total - [m ³]	0,387	Figura 31	0,330
Recuperação de líquido - [%]	0,740	Figura 32	0,610
Tempo de elevação - [s]	275	Figura 33	289
Tempo de descompressão - [s]	275	Figura 34	394
Tempo de ciclo - [s]	1249	Figura 35	1253
Número de ciclos	69	Figura 36	69
Vazão de líquido - [m ³ /d]	26,39	Figura 37	22,73
Vazão de gás - [m ³ /d]	8500	Figura 38	10308
Pressão média de fluxo - [kgf/cm ²]	33,33	Figura 41	37,83

Os valores do volume de líquido produzido na superfície, na forma de golfada, e do tempo de elevação da golfada, aproximam-se nos dois simuladores. As maiores diferenças, que se refletem na vazão diária, ocorrem devido às diferentes formas de calcular a produção de líquido durante o estágio de descompressão : Liao⁽⁸⁾, admitindo que velocidade do filme de líquido é igual a zero, calcula esta produção considerando somente o líquido disperso na

coluna de gás; já neste trabalho, que não considera líquido disperso na coluna de gás, todo o líquido produzido após a golfada ocorre devido ao arraste do filme de líquido.

Já o simulador do método Pig Lift foi apenas parcialmente verificado, comparando-se os seus resultados com os dados de campo de algumas variáveis (Tabela 5.15). Como o índice de produtividade do poço não era conhecido os resultados de vazão de líquido fornecidos pelo simulador não puderam ser verificados. Verificou-se apenas o tempo de viagem da golfada até a superfície (tempo do estágio de transferência mais o tempo do estágio de elevação da golfada), a velocidade média de elevação da golfada, a pressão máxima de operação do gás na superfície e o tempo total de descompressão.

Tabela 5.15 - Dados operacionais do poço com Pig Lift.

Condições mecânicas	
Profundidade de canhoneio - [m]	1291
Revestimento de produção - [in x lb/ft]	7 - 23.0
Características de Reservatório	
Pressão estática (PE) - [kgf/cm ²]	79
Índice de produtividade (IP) - [m ³ /d / kgf/cm ²]	-
Propriedades dos Fluidos	
Grau API do óleo	41
Densidade relativa do gás (Ar = 1)	0,73
Densidade relativa da água produzida (Água = 1)	1,07
RGL [m ³ / m ³]	0
BSW - [%]	50
Condições operacionais	
Pressão na cabeça - [kgf/cm ²]	6,0
Pressão de compressão - [kgf/cm ²]	63
Temperatura na superfície - [F]	80
Coluna de produção - [in]	2 3/8

Os valores de L/H e de PePh - dados de entrada do simulador, respectivamente iguais a 0,15 e 0,65, foram obtidos a partir dos seguintes dados operacionais: da vazão de produção - 17 m³/d ; do tempo de ciclo - 42 minutos ; e da pressão estática do poço - 79 kgf/cm² . Mostra-se, na Tabela 5.16, os dados obtidos com o simulador e aqueles medidos diretamente no poço.

Tabela 5.16 - Dados do simulador *Pig Lift* e obtidos do poço.

Variável	Dados do simulador	Dados operacionais
Tempo de viagem da golfada - do início da injeção de gás até o topo da golfada chegar à superfície..	327 segundos	de 300 a 360 segundos
Velocidade média de elevação da golfada - estágio de elevação.	5,76 m/s	compatível com o valor recomendado: 5 a 6,0 m/s
Pressão máxima de operação na superfície.	720 psi	700 psi
Tempo de descompressão	433 segundos	de 120 a 180 segundos.

As variáveis tempo de viagem da golfada e pressão de operação na superfície, calculadas pelo simulador, aproximam-se bem daquelas medidas diretamente no poço, mostrando que, para estas variáveis, o modelo desenvolvido representa bem o sistema. A grande diferença observada com relação ao tempo de descompressão ocorre basicamente porque o simulador foi rodado para o procedimento de descompressão POD1 - que utiliza apenas a linha de produção para a descompressão do gás, enquanto o poço opera com o procedimento de descompressão POD2 - utiliza também a linha de injeção para a descompressão do gás.

6. GLI - ciclo de produção estabilizado

Em um regime cíclico, mas estabilizado, o volume produzido na superfície, em cada ciclo de produção, deve ser igual ao volume fornecido pelo reservatório.

Isto se verifica, intrinsecamente, nos métodos Gas Lift Intermitente com Pistão (GLIP) e *Pig Lift* (PL), onde assume-se que não ocorra perda de massa do líquido durante o estágio de elevação. Nestes métodos o volume produzido em cada ciclo de produção é sempre igual ao volume da coluna de líquido inicial. Assim, fixado o comprimento da coluna inicial, a vazão de produção fica dependente apenas do número de ciclos realizados ao longo de um dia.

Isto não acontece, porém, com os métodos *Gas Lift* Intermitente Convencional (GLI) e *Gas Lift* Intermitente com Câmara (GLIC), nos quais o volume de líquido produzido na superfície não é igual ao volume de líquido inicial na coluna de produção. Nestes métodos os volumes produzidos na superfície e pelo reservatório serão iguais, no primeiro ciclo, apenas se todo o *fall-back* de líquido retornar para o fundo do poço, incorporando-se à nova coluna de líquido. Isto significa uma espessura de filme residual na parede da tubulação igual a zero. É o que faz Chacin⁽⁸⁾ no seu modelo para o *Gas Lift* Intermitente com Pistão, quando joga todo o líquido do *fall back* para o fundo do poço e adota a área da bolha (A_B) igual à área do tubo (A_t). No modelo deste trabalho, porém, parte da massa de líquido não produzida fica na parede da tubulação após concluído o ciclo. E, com isso, os volumes de líquido produzido na superfície e alimentado pelo reservatório não serão iguais entre si, o que caracteriza o primeiro ciclo como um ciclo transiente.

Mostra-se na Figura 6.1, para o poço base e o método intermitente convencional, os volumes produzido na superfície e alimentado pelo reservatório, no primeiro ciclo de produção, em função do valor de L/H , para um volume de gás injetado igual ao mínimo necessário para abrir a válvula de *gas lift*, sede de $1/2''$ e P_{to}/P_{vo} igual a 0,70.

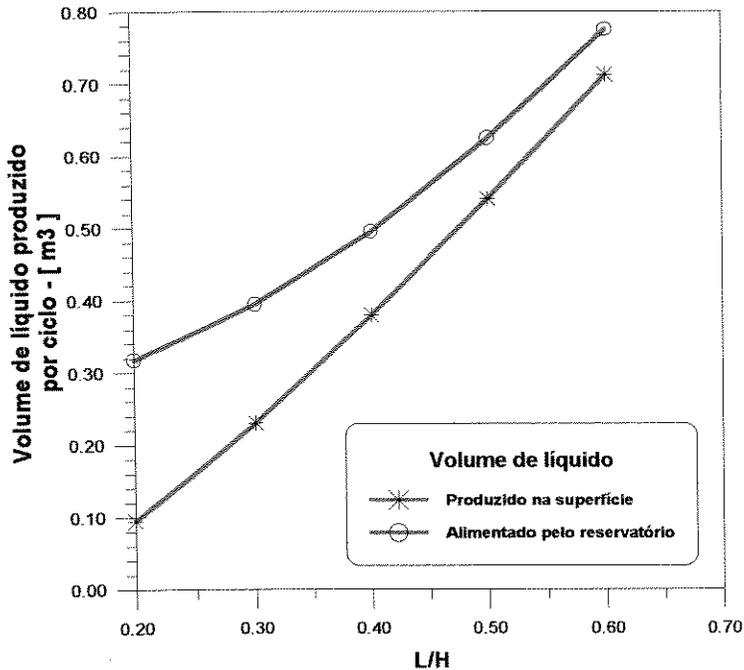


Figura 6.1 - Volume produzido, na superfície e pelo reservatório, no primeiro ciclo de produção do método *GLI* - poço base, sede 1/2", $V_{gi} = V_{gv}$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Observa-se na Figura 6.1 que : 1) o volume produzido pelo reservatório é maior que aquele produzido na superfície, 2) a diferença diminui com o aumento do valor de L/H , ou seja, com o comprimento da coluna inicial. No caso, para L/H igual a 0,20, por exemplo, esta diferença é, em valores absolutos, da ordem de 0,22 m³ e, em termos relativos, da ordem de 70 % (adotando-se a vazão do reservatório como referência).

A coluna de líquido que se forma na coluna de produção, durante os estágios de descompressão e alimentação, tem duas fontes de suprimento: o reservatório e o filme de líquido que se formou na parede da tubulação pelo líquido que não foi produzido nos estágios de produção e descompressão. Se toda a coluna fosse produzida na superfície, ou se todo o líquido deixado para trás como *fall back* retornasse para o fundo do poço, o reservatório entraria apenas com a parte da coluna de líquido que foi produzida na superfície (Figura 6.2). Ter-se-ia, neste caso, um ciclo estável de produção já a partir do primeiro ciclo.

Porém como nem toda a coluna inicial é produzida, e nem todo o líquido na parede da tubulação retorna para o fundo do poço, ficando aderido à parede da tubulação como um filme, o reservatório fornece, durante o primeiro ciclo, um volume de líquido maior que aquele produzido na superfície (Figura 6.3).

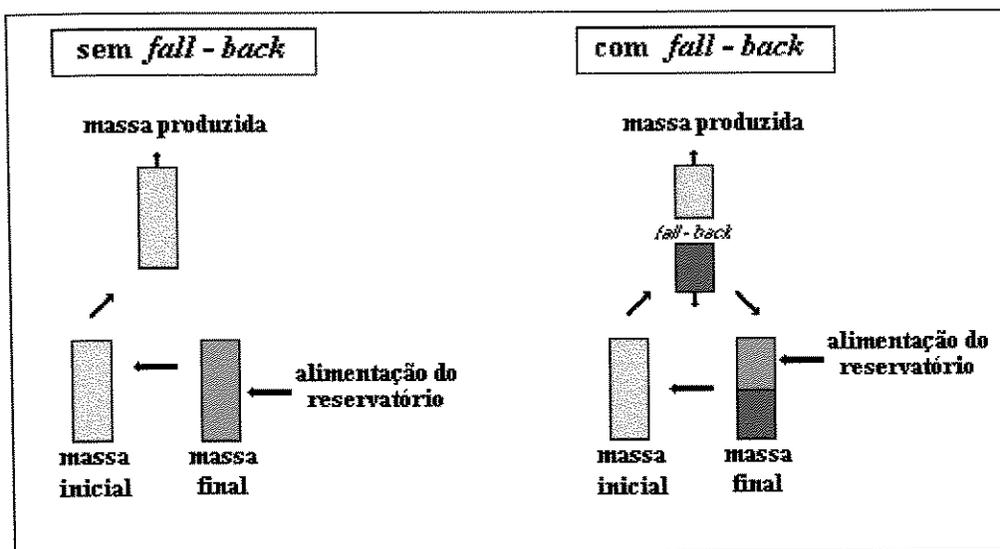


Figura 6.2 - Modelo sem filme de líquido: ciclo estabilizado com e sem *fall-back*.

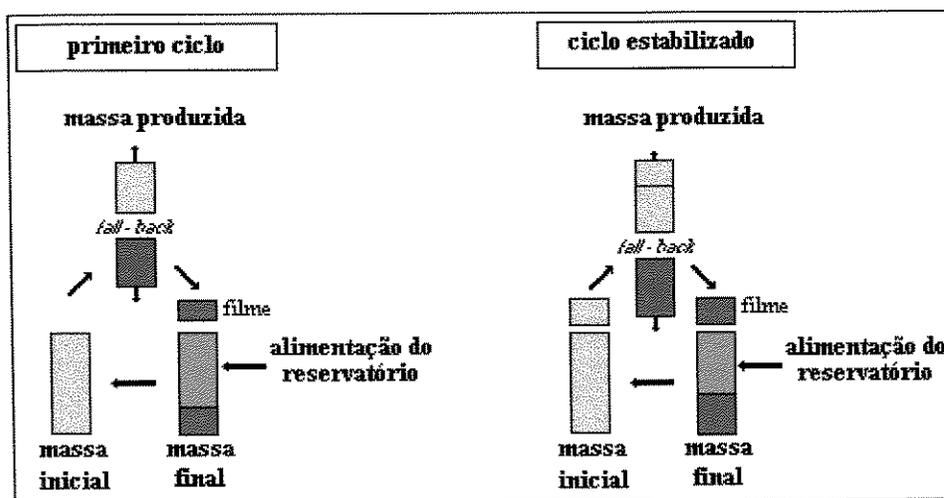


Figura 6.3- Modelo com filme de líquido: primeiro ciclo e ciclo estabilizado.

Portanto quanto menor o *fall-back* de líquido (mais líquido é produzido na superfície) e quanto maior o tempo de alimentação (mais tempo tem o filme de líquido para retornar para o fundo do poço), menor será a diferença entre os dois volumes: produzido na superfície e alimentado pelo reservatório. É o que se observa na Figura 6.1: quanto maior o comprimento da coluna inicial, menor a diferença entre os dois volumes. Isto ocorre porque quanto maior o comprimento da coluna inicial, menor o *fall-back* de líquido e maior o tempo de alimentação.

Mostra-se, na Figura 6.4, como varia a relação V_{ls}/V_{lres} com a recuperação de líquido por ciclo; onde V_{ls} é o volume de líquido total (golfada + filme) produzido na superfície, e V_{lres} é o volume de líquido alimentado pelo reservatório. Os valores foram calculados para um volume de gás injetado igual ao mínimo necessário para abrir a válvula de *gas lift* e para relações P_{to}/P_{vo} e L/H representadas na figura. Observa-se que quanto maior o valor de L/H , para um mesmo P_{to}/P_{vo} , maior é a recuperação de líquido e, portanto, maior é a relação V_{ls}/V_{lres} . O mesmo verifica-se para os menores valores de P_{to}/P_{vo} para um mesmo L/H .

Portanto assumir que a produção por ciclo é igual ao volume de líquido produzido na superfície no primeiro ciclo pode resultar em valores bastantes inferiores ao volume real de produção em um ciclo estabilizado. Conclui-se, assim, que um valor confiável para o volume produzido por ciclo somente pode ser obtido com um ciclo estabilizado de produção. No presente trabalho buscou-se o ciclo estável de produção, considerado como tal aquele onde são iguais os volumes de líquido produzido na superfície e alimentado pelo reservatório.

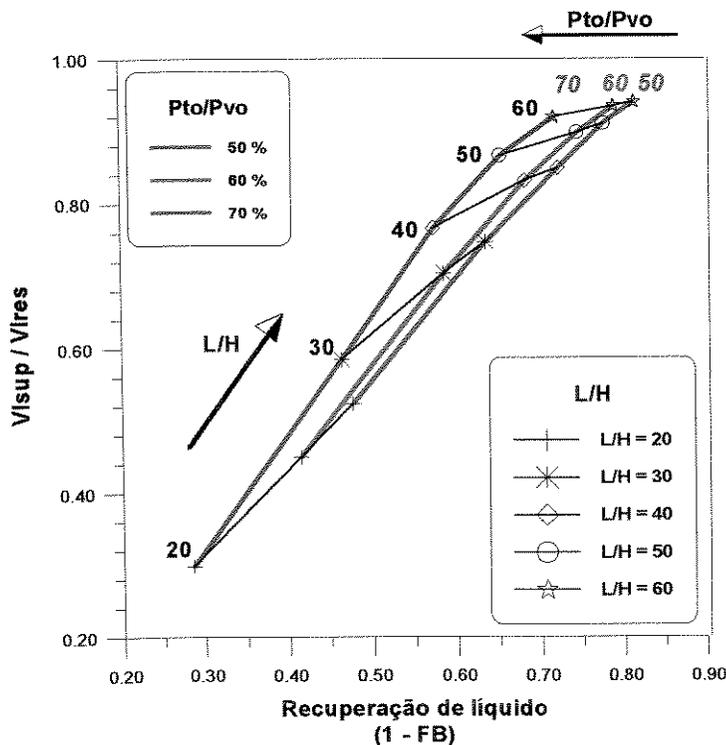


Figura 6.4 - Razão entre o volume de líquido produzido na superfície (V_{ls}) e o volume de líquido alimentado pelo reservatório (V_{lres}), em função da recuperação de líquido por ciclo, para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede $\frac{1}{2}$ " e $V_{gi} = V_{gv}$.

6.1. O modelo para os ciclos subsequentes de produção

A única diferença do segundo para o primeiro ciclo de produção consiste na presença de um filme de líquido, acima da coluna de líquido inicial, durante o estágio de elevação. Nenhum dos trabalhos pesquisados faz referência a este segundo ciclo, e, portanto, à interação entre filme e golfada de líquido. Considera-se, neste trabalho, que todo o líquido depositado na parede do tubo incorpora-se à golfada de líquido à medida que esta viaja até a superfície.

A única alteração no modelo ocorre, portanto, apenas no estágio de elevação. Passam a compor o sistema físico, neste estágio : o espaço anular, a bolha de gás, a golfada de líquido, e os filmes de líquido abaixo e acima da golfada, respectivamente definidos, a partir de agora, como inferior e superior.

Continuam valendo as mesmas equações já desenvolvidas para o espaço anular, a bolha de gás e o filme abaixo da coluna de líquido. Altera-se o balanço de massa na golfada de líquido e, portanto, a equação daí derivada. E uma nova variável, a espessura do filme de líquido superior - y_s , passa a compor o sistema.

Balanço de massa na golfada de líquido

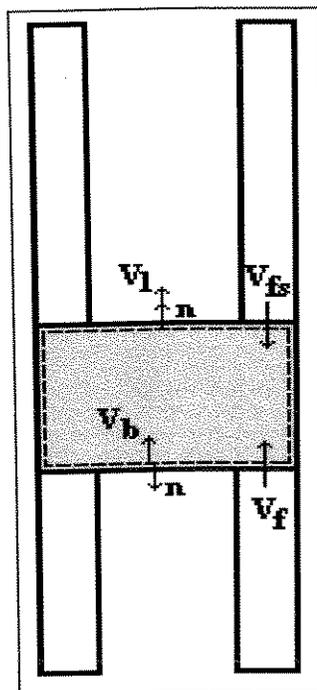


Figura 6.5 - Estágio de elevação do segundo ciclo de produção do método *Gas Lift* Intermitente Convencional : balanço de massa na golfada de líquido.

Aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com a coluna de líquido (Figura 6.5) tem-se, para o primeiro termo :

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV = \rho_l A_l \frac{d}{dt} (h_l - h_B) \quad (6.1)$$

Devido à presença do filme de líquido passa a ocorrer, agora, fluxo de massa também pela parte superior da superfície de controle. Desta forma o segundo termo do balanço de massa passa a ser igual a:

$$\int_{SC} \rho(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{A} = \int_{SC\ INF} \rho(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{A} + \int_{SC\ SUP} \rho(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{A} \quad (6.2)$$

sendo ;

$$\int_{SC\ INF} \rho(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{A} = -\rho_l (v_f - v_B) (A_t - A_B) \quad (6.3)$$

e,

$$\begin{aligned} \int_{SC\ SUP} \rho(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{A} &= -\rho_l (v_{fs} + v_l) A_f \\ &= -\rho_l v_{fs} A_{fs} - \rho_l v_l A_{fs} \\ &= -\rho_l q_f - \rho_l v_l A_{fs} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Somando-se 6.1, 6.3 e 6.4, tem-se :

$$\rho_l A_t \frac{d}{dt} (h_l - h_B) - \rho_l (v_f - v_B) (A_t - A_B) - \rho_l q_f - \rho_l v_l A_{fs} = 0 \quad (6.5)$$

Dividindo por ρ_l e desenvolvendo-se (6.5) tem-se :

$$A_t \frac{dh_l}{dt} - A_t \frac{dh_B}{dt} + A_t \frac{dh_B}{dt} - A_B \frac{dh_B}{dt} - v_f (A_t - A_B) - q_f - \frac{dh_l}{dt} A_{fs} = 0 \quad (6.6)$$

Simplificando-se (6.6) chega-se à formulação final para o balanço de massa na coluna de líquido :

$$(A_t - A_{fs}) \frac{dh_l}{dt} - A_B \frac{dh_B}{dt} - v_f (A_t - A_B) - q_f = 0 \quad (6.7)$$

onde :

$$A_{fs} = \pi r^2 - \pi (r - y_s)^2 \quad (6.8)$$

Já a vazão do filme de líquido, cuja demonstração encontra-se no Apêndice A, é dada por :

$$q_f = \frac{\rho_l g 2\pi r y_s^3}{3 \mu} \quad (6.9)$$

Se $y_s=0$, caso do primeiro ciclo, a equação 6.7 reduz-se à equação 4.1.40, que é a equação derivada do balanço de massa, na golfada de líquido, para o primeiro ciclo de produção.

Balanço de massa no filme de líquido superior

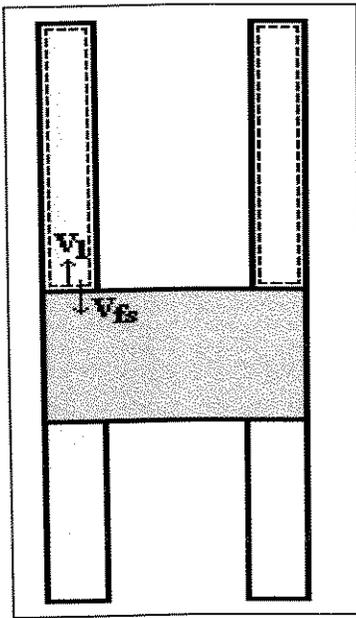


Figura 6.6 - Estágio de elevação do segundo ciclo de produção do método *Gas Lift* Intermitente Convencional: balanço de massa no filme de líquido

Aplicando-se a equação (4.2) no volume de controle coincidente com o filme de líquido superior (Figura 6.6) tem-se, respectivamente para o primeiro e segundo termos :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV &= \rho_l \frac{d}{dt} [A_{fs} (h_l - h_B)] \\ &= \rho_l \left[(z_v - h_l) \frac{dA_{fs}}{dt} - A_{fs} \frac{dh_l}{dt} \right] \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} \int_{sc} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA &= \rho_l (v_{fs} + v_l) A_{fs} \\ &= \rho_l q_f + \rho_l v_l A_{fs} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Substituindo-se (6.10) e (6.11) em (4.2), e simplificando-se, tem-se :

$$(z_v - h) \frac{dA_{fs}}{dt} - A_{fs} \frac{dh}{dt} + q_f + v_l A_{fs} = 0 \quad (6.12)$$

Considerando-se que $A_{fs} \frac{dh}{dt} = v_l A_{fs}$ e $\frac{dA_{fs}}{dt} = 2\pi(r - y_s) \frac{dy_s}{dt}$ obtém-se, finalmente, a equação final para o balanço de massa no filme de líquido superior :

$$2\pi(z_v - h)(r - y_s) \frac{dy_s}{dt} + q_f = 0 \quad (6.13)$$

Obtém-se, substituindo-se (4.1.40) por (6.7) e acrescentando-se (6.13) no sistema de equações do estágio de elevação no primeiro ciclo, o sistema de equações para este estágio no segundo ciclo de produção.

O sistema de equações desenvolvido para este segundo ciclo aplica-se também para os demais ciclos de produção. Para cada ciclo tem-se uma espessura de filme inicial, até o ciclo de estabilização, diferente do ciclo anterior. Aplica-se, inclusive, ao primeiro ciclo de produção, fazendo $y_s = 0$ na equação 6.7 e $h_l = 0$ na equação 6.13.

Mostra-se na Figura 6.7, para o poço base e o ponto operacional $\{30,70,50\}$, a vazão de equilíbrio resultante após a simulação de vários ciclos de produção.

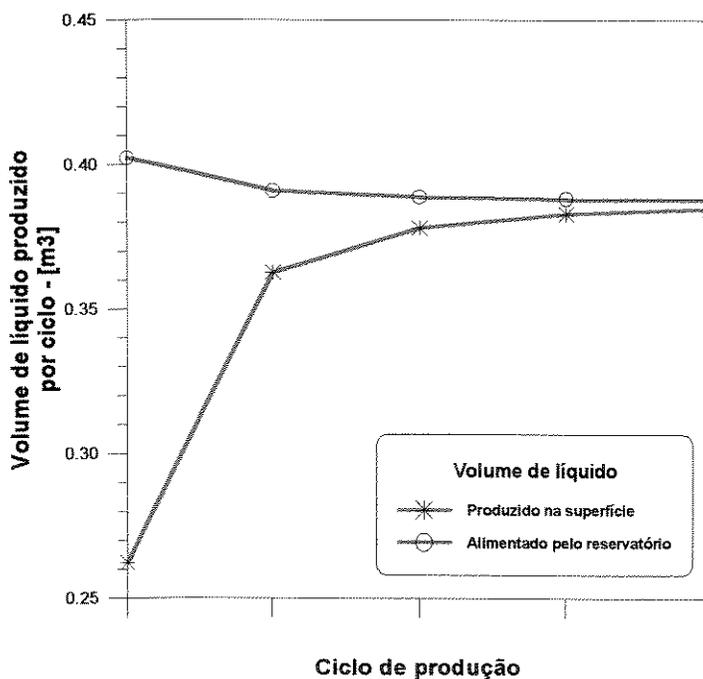


Figura 6.7 - Produção de líquido para vários ciclos de produção do método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2" e ponto operacional $\{30,70,50\}$

Verifica-se, neste caso, que o volume de equilíbrio está mais próximo do volume fornecido pelo reservatório, durante o primeiro ciclo, do que daquele produzido na superfície. Assim, um erro menor seria cometido assumindo-se, para a produção do ciclo estabilizado, a vazão produzida pelo reservatório no primeiro ciclo.

As maiores variações nos volumes, principalmente no volume produzido na superfície, ocorrem do primeiro para o segundo ciclo de produção. No segundo ciclo de produção todo o filme de líquido superior incorpora-se à golfada de líquido durante sua viagem até a superfície. Caso este fenômeno não interferisse no escoamento, o volume produzido na superfície durante o segundo ciclo seria igual ao volume alimentado pelo reservatório no primeiro ciclo. Não é, porém, o que ocorre. À medida que o filme incorpora-se à golfada esta tem sua massa e seu comprimento aumentados, o que causa o aumento das forças que se opõem ao escoamento: gravidade e atrito. Como as condições operacionais são as mesmas do primeiro ciclo, ou seja, mesmo volume de gás injetado e mesma pressão de abertura da válvula de *gas lift*, a velocidade média da golfada de líquido é menor. Com isto a golfada de líquido demora mais tempo para chegar à superfície, aumentando assim o *fall-back* de líquido. Este efeito repete-se nos ciclos seguintes, porém de forma cada vez menos acentuada, até se alcançar uma estabilização.

Na Figura 6.8 estão representadas duas definições para o *fall-back* de líquido. Pela primeira definição (FB1) calcula-se o *fall-back* de líquido 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. Calculado desta forma o *fall-back* 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 (Figura 6.9). Pela segunda definição (FB2) calcula-se o *fall-back* de líquido utilizando-se o seu conceito corrente: como a razão entre a diferença das massas de líquido inicial e produzida na superfície e a massa inicial da golfada. A redução no valor do *fall-back* de líquido indica que o volume produzido na superfície aumenta a cada ciclo.

A variação do volume de líquido alimentado pelo reservatório a cada ciclo (Figura 6.7) é relativamente menos significativa porque o aumento na pressão média de fluxo, em função do aumento das componentes de atrito e de gravidade, ocorre no estágio de elevação, quando a pressão média de fluxo já é relativamente alta.

Caso se queira, portanto, utilizar o primeiro ciclo de produção como representativo dos demais ciclos é preferível adotar, para o volume produzido por ciclo, o volume alimentado pelo reservatório, e não o volume produzido na superfície.

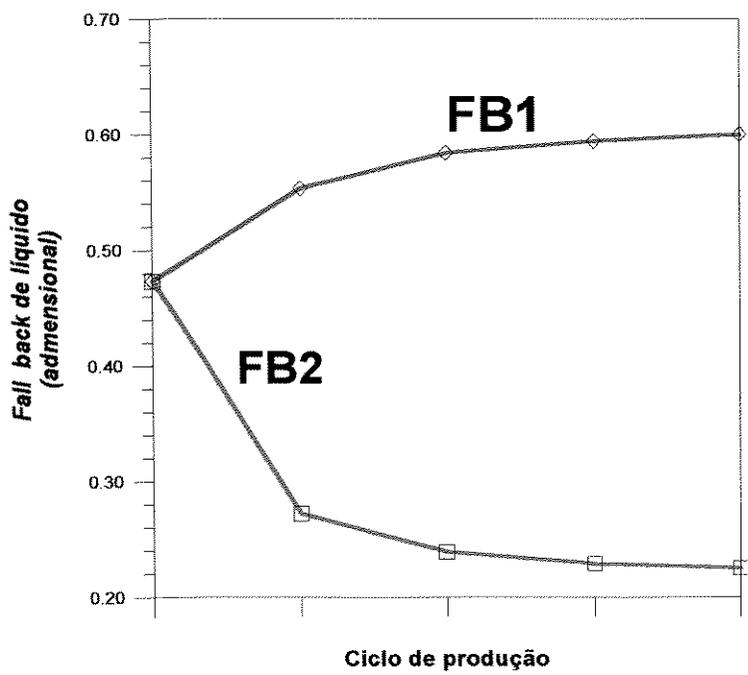


Figura 6.8 - *Fall-back* de líquido para os primeiros cinco ciclos de produção do método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2" e ponto operacional {30,70,50}.

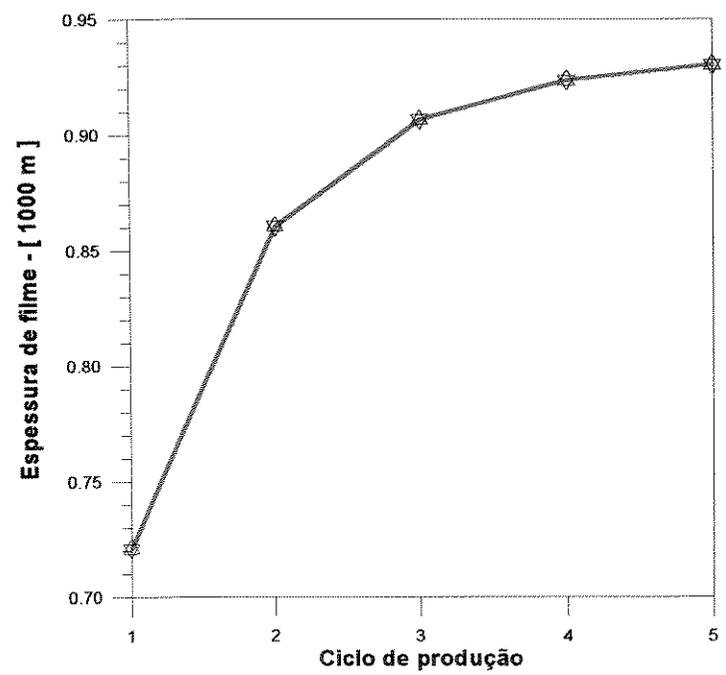


Figura 6.9 - Espessura do filme de líquido, após o estágio de produção da golfada, para os primeiros cinco ciclos de produção do método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2" e ponto operacional {30,70,50}

7. Parâmetros de projeto - influência

Apresenta-se neste capítulo, para o GLI, GLIC, GLIP e PL, a análise da influência dos parâmetros de projeto no comportamento da produção diária,

Ao contrário dos métodos pneumáticos contínuos, onde o cálculo da vazão passa necessariamente pelo cálculo da pressão média de fluxo, os métodos intermitentes permitem duas formas de análise e determinação da vazão de produção diária: (1) como nos métodos contínuos, via pressão média de fluxo; (2) adotada neste trabalho, via produto entre o volume de líquido produzido por ciclo e o número de ciclos realizado por dia (função do período do ciclo).

Portanto as grandezas de interesse estudadas neste capítulo são: 1) o volume de líquido produzido por ciclo ; 2) o tempo de duração (período) de cada ciclo ; 3) a vazão de produção diária.

Os parâmetros de projeto que influenciam estas grandezas são: 1) o volume de gás injetado - V_{gi} ; 2) o diâmetro da sede da válvula de *gas lift* ; 3) o comprimento inicial da golfada - L ; 4) a relação P_{to}/P_{vo} .

Sendo porém necessário reduzir o tempo de computação dos diversos casos a serem apresentados neste capítulo, alguns parâmetros de projeto foram fixados para alguns métodos, considerando-se os critérios de projeto normalmente utilizados e as particularidades inerentes a cada um.

7.1. Método : *Gas Lift* Intermitente convencional

Viu-se, no capítulo anterior, que o cálculo correto do volume de líquido produzido por ciclo para este método de elevação deve ser obtido com um ciclo estabilizado de produção.

Mas viu-se, também, que o volume produzido pelo reservatório no primeiro ciclo é uma boa estimativa do volume produzido no ciclo estabilizado. Assim, sendo necessário reduzir o tempo de computação, os resultados a seguir foram obtidos com o primeiro ciclo de produção, usando-se, como estimativa para o volume produzido por ciclo, o volume alimentado pelo reservatório no primeiro ciclo.

Ressalte-se que, no caso do Gas Lift Intermitente Convencional, em todos os trabalhos anteriores os resultados foram obtidos apenas para o primeiro ciclo de produção, tanto nos trabalhos experimentais - Brown ⁽³⁾, Brill ⁽⁵⁾ e Neely ⁽⁶⁾, como nos trabalhos de modelagem - Liao ⁽⁸⁾. Em geral, para estes autores, o volume produzido por ciclo é assumido igual ao volume produzido na superfície durante o primeiro ciclo. No entanto este valor pode não ser, dependendo das condições operacionais, uma boa aproximação (capítulo 6).

7.1.1. Influência do volume de gás injetado

As simulações foram realizadas para o poço base, considerando-se um diâmetro de sede igual a 1/2" (0.5 in), um comprimento de coluna inicial igual à metade da altura estática ($L/H = 0,5$) e uma pressão de gás no revestimento, no instante de abertura da válvula de *gas lift*, igual a 1,43 vezes a pressão de tubo ($P_{to}/P_{vo} = 0.7$). Nestas condições o volume de gás de referência (V_{gr}) é de 168 m³; o volume inicial da golfada (V_{lini}) é de 0.83 m³, e o volume de gás de injeção necessário para abrir a válvula de *gas lift* (V_{gv}) é de 69 m³ std.

7.1.1.1. No volume de líquido produzido por ciclo

Mostra-se, na Figura 7.1, o volume de líquido produzido por ciclo em função do volume de gás injetado.

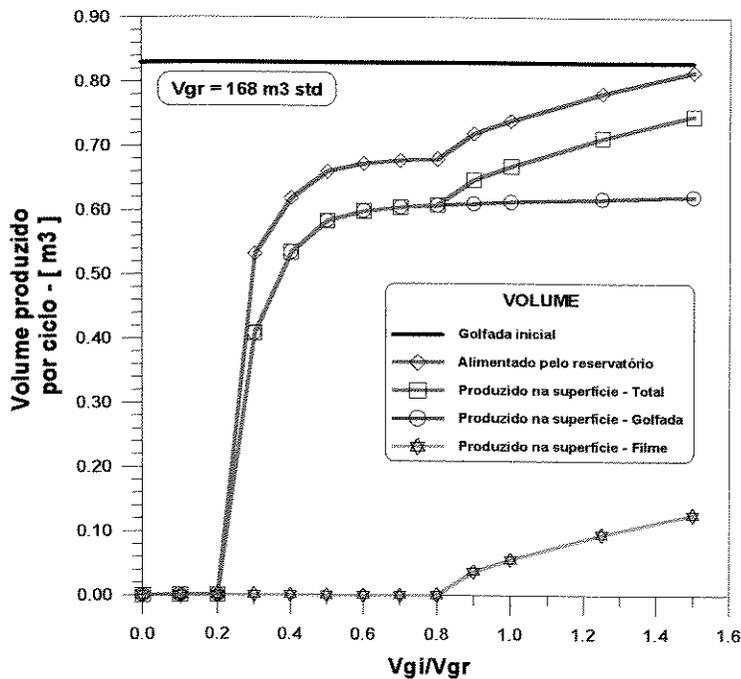


Figura 7.1 - Volume de líquido produzido no primeiro ciclo, em função do adimensional V_{gi} / V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede $\frac{1}{2}$ ", $L/H = 0,5$ e $P_{to} / P_{vo} = 0,7$

Para as condições da Figura 7.1 pode-se afirmar que :

- o volume de líquido alimentado pelo reservatório é sempre maior que o volume de líquido produzido na superfície ;
- a produção de líquido ocorre somente após um volume mínimo de gás injetado. Neste caso, entre 20 a 30 % do volume de referência ;
- o volume de líquido produzido na superfície na forma de golfada praticamente estabiliza-se em 70% do volume inicial, após um volume de gás injetado em torno de 60 % do volume de gás de referência ;

- o volume de líquido produzido na superfície devido ao arraste do filme torna-se significativo apenas para um volume de gás acima de 80 % do volume de referência; representa, para V_{gi}/V_{gr} igual a 1,5, 20% do volume produzido na forma de golfada, i.e., 15% do volume total produzido;
- o volume total de líquido produzido na superfície, na forma de golfada e filme de líquido, aumenta com o aumento no volume de gás injetado ; chega a 90% do volume inicial da golfada para V_{gi}/V_{gr} igual a 1,5.

Estes resultados estão de acordo com os dados experimentais de Brown ⁽³⁾ : quanto maior o volume de gás injetado maior é a produção de líquido por ciclo de produção. Explica-se este efeito do volume de gás injetado pela forma como ocorre o *fall-back* de líquido: devido à velocidade de penetração da bolha de gás no líquido. Como esta velocidade de penetração é admitida constante para o sistema analisado (capítulo 4), tem-se que quanto mais rápido a golfada chegar à superfície menos tempo haverá para ocorrer perda de massa. Observa-se, na Figura 7.2, que o tempo de elevação diminui com o aumento no volume de gás injetado, tendendo a uma estabilização. Isto explica a maior produção da golfada de líquido no ciclo e sua tendência à estabilização, observada para altos volumes de gás de injeção.

A maior produção via arraste do filme de líquido, observada a partir de V_{gi}/V_{gr} igual a 0,8, está associada à abertura da válvula de *gas lift* por algum tempo após a produção da golfada. Mostra-se, na Figura 7.3, , os tempos decorridos, desde o início do ciclo até o fechamento da válvula de *gas lift*, para cada volume de gás injetado. Mostra-se também, para efeito de comparação, os tempos decorridos até o topo e a base da golfada chegarem à superfície.

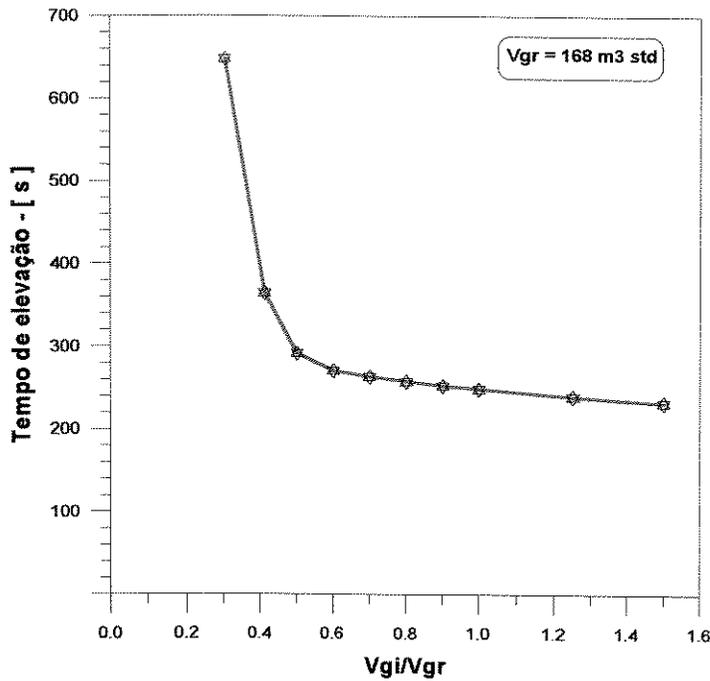


Figura 7.2 - Tempo de elevação da golfada, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2", $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$

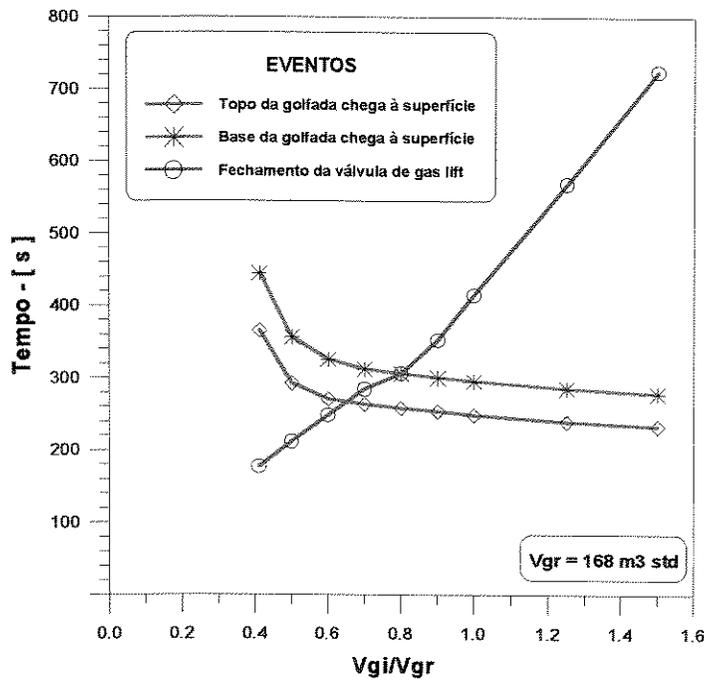


Figura 7.3 - Tempo de fechamento da válvula de *gas lift*, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2", $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Pode-se concluir, para as condições da Figura 7.3, que :

- para valores de V_{gi}/V_{gr} menores que 0,65, aproximadamente, a válvula de *gas lift* fecha-se durante o estágio de elevação da golfada ;

- para valores de V_{gi}/V_{gr} entre 0,65 e 0,80 a válvula de *gas lift* fecha-se durante o estágio de produção da golfada ;
- para valores de V_{gi}/V_{gr} igual a 0.80 a válvula de *gas lift* fecha-se somente após a produção da golfada ; injetando, portanto, gás na coluna de produção e provendo, assim, energia para a manutenção do carreamento do filme de líquido pelo fluxo de gás.

Observou-se, portanto, com relação à influência do volume de gás injetado no volume de líquido produzido por ciclo, que :

- quanto maior o volume de gás injetado maior a produção de líquido (golfada + filme) por ciclo ;
- existe um volume de gás injetado a partir do qual a produção via golfada de líquido permanece praticamente constante ;
- a produção via arraste de filme de líquido torna-se significativa apenas a partir do momento que a válvula de *gas lift* permanece aberta após a produção da golfada ;

7.1.1.2. No tempo de ciclo

A influência do volume de gás injetado no tempo de ciclo ocorre principalmente nos estágios de elevação e descompressão. O tempo de elevação reduz-se, como já mostrado na Figura 7.2, com o aumento no volume de gás injetado, mantendo, porém, uma tendência à estabilização. Já o tempo de descompressão aumenta sempre com o aumento no volume de gás injetado.

Mostra-se, na Figura 7.4, o tempo decorrido entre o instante de abertura da válvula de *gas lift* e os eventos que caracterizam o final de cada estágio: elevação (topo da golfada chega à superfície), produção (base da golfada chega à superfície), descompressão (pressão no fundo restabelecida) e alimentação (coluna de líquido restabelecida). A curva correspondente ao final do ciclo de alimentação indica o tempo de ciclo total.

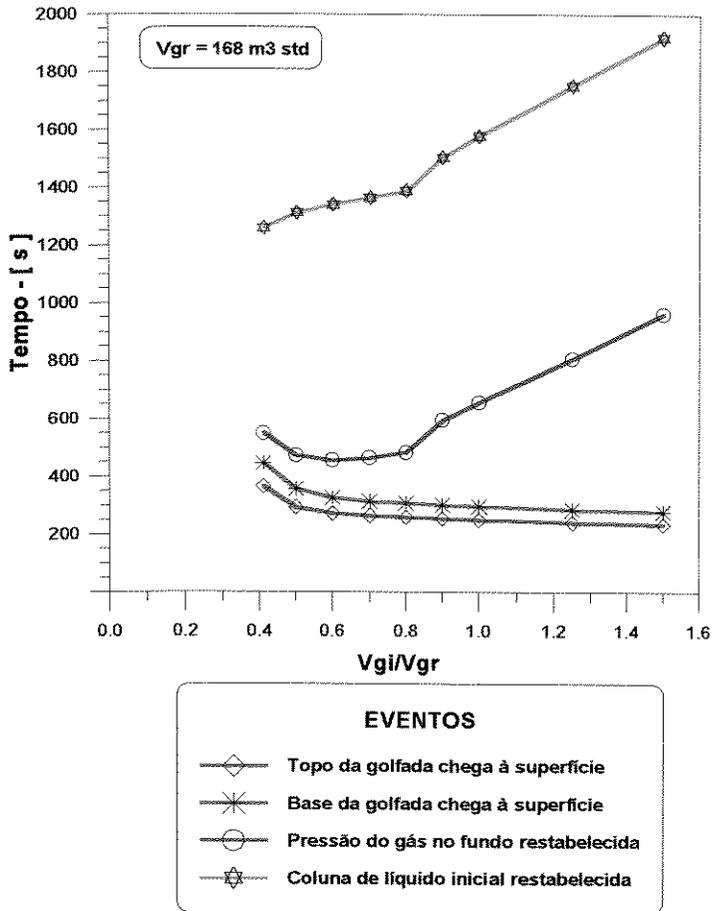


Figura 7.4 - Tempo decorrido, até o final de cada estágio do ciclo de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional, tendo-se como referência o instante de abertura da válvula de *gas lift* - poço base, sede $\frac{1}{2}$ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Para valores de V_{gi}/V_{gr} até 0,8, aproximadamente, a variação no tempo de ciclo com o volume de gás injetado não é muito acentuada. Porém após este valor o tempo de ciclo aumenta rapidamente com o aumento no volume do gás injetado, basicamente em função do aumento, também acentuado, no

tempo de descompressão. Que, por sua vez, aumenta porque a válvula de *gas lift* permanece aberta após a produção da golfada de líquido.

7.1.1.3. Na produção diária

A produção diária é o produto do volume de líquido produzido por ciclo pelo número de ciclos por dia (inverso do tempo do ciclo). Assim, o efeito do volume de gás injetado na produção diária é uma combinação dos seus efeitos no volume produzido por ciclo e no tempo de ciclo.

Observa-se (Figura 7.4) que a ciclagem variou de 70 a 46 ciclos/dia - correspondente à variação no tempo de ciclo de 1260 a 1920 segundos, diminuindo com o aumento do volume de gás injetado. Ao mesmo tempo o volume produzido no ciclo, tomando-se por base o volume de líquido alimentado pelo reservatório, variou de 0,61 a 0,81 m³, aumentando com o

aumento do volume de gás injetado (Figura 7.1). Mostra-se, na Figura 7.5 a variação da vazão de produção, em função do volume de gás injetado por ciclo.

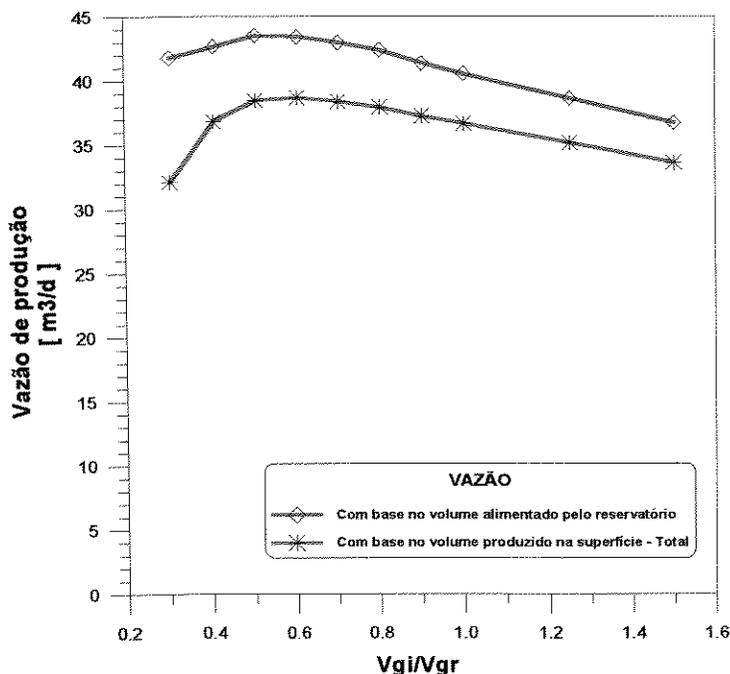


Figura 7.5 - Vazão de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede $\frac{1}{2}$ ", $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

As duas curvas de vazão, que têm como base o volume de líquido produzido na superfície e o volume de líquido alimentado pelo reservatório, apresentam o mesmo tipo de comportamento com relação ao volume de gás injetado por ciclo: a produção de líquido aumenta inicialmente com o aumento no volume de gás injetado, para cair após V_{gi}/V_{gr} maior que 0,5. Isto ocorre porque para valores de V_{gi}/V_{gr} maiores que 0,5 o aumento no volume de líquido produzido por ciclo (Figura 7.1) não mais compensa o aumento verificado no tempo de ciclo (Figura 7.4).

A sensibilidade da vazão de líquido à variação no volume de gás injetado mostra a importância desta variável no método intermitente convencional. Tomando-se como base o volume produzido pelo reservatório tem-se, para o range analisado de V_{gi}/V_{gr} - 0,3 a 1,5, uma variação absoluta de $7 \text{ m}^3/\text{d}$ na vazão de líquido (vazão varia de 37 a $44 \text{ m}^3/\text{d}$), correspondendo a uma variação de 19 % em relação à vazão mínima .

7.1.2. Influência da sede da válvula de *gas lift*

Uma das principais conclusões do trabalho de Brown⁽³⁾ refere-se ao diâmetro da sede a ser utilizado na válvula de *gas lift*: quanto maior o diâmetro da sede maior seria a eficiência de elevação do método. Dos diâmetros testados, dentro de um range de 5/16" a 1" (0.3125 a 1 in), Brown⁽³⁾ recomenda a utilização de sede de 1 in. Liao⁽⁸⁾, no seu modelo mecanicista, obtém resultados semelhantes ao de Brown⁽³⁾, sugerindo, porém, que uma sede com diâmetro de 3/4" (0.75 in) seria suficiente para uma boa eficiência de elevação.

Nas simulações efetuadas com o modelo observou-se, porém, que a utilização de sede com diâmetro de 3/4", apesar de gerar maiores volumes de produção por ciclo, resultava em menores volumes na produção diária. Passou-se, então, a analisar o sistema utilizando-se sedes com outros diâmetros (1/4", 3/8", e 1/2").

7.1.2.1. No volume de líquido por ciclo

Mostra-se, na Figura 7.6, o volume de líquido produzido no primeiro ciclo de produção, para os diâmetros de 1/4", 3/8", 1/2" e 3/4" (0.25, 0.375, 0.5 e 0.75 in). Dois conjuntos de curvas são apresentados: um para o volume alimentado pelo reservatório e outro para o volume de líquido produzido na superfície. Para o diâmetro de 1/2" as curvas coincidem com aquelas mostradas na Figura 7.1. Para baixos valores da relação V_{gi}/V_{gr} as sedes de maior diâmetro resultam em maiores volumes de líquido produzido no ciclo; para os valores mais altos da relação V_{gi}/V_{gr} as sedes de menor diâmetro passam a produzir mais líquido, ultrapassando, às vezes, o volume produzido pelas sedes de maior diâmetro. Para as condições da Figura 7.6 a sede de diâmetro 1/4" produz, para uma relação V_{gi}/V_{gr} igual a 1,25, o mesmo volume de líquido produzido com uma sede de 3/4".

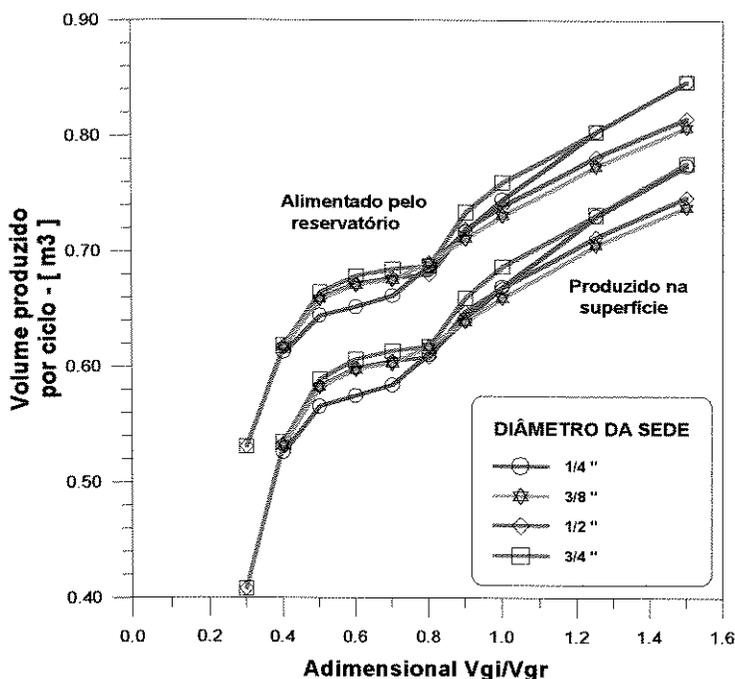


Figura 7.6 - Volume produzido por ciclo, para diâmetros de sede de 1/4, 3/8, 1/2 e 3/4 in, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Há porém um aspecto importante a ser considerado: o limite mínimo de injeção de gás (V_{gv}). Antes de se injetar gás na coluna de produção é necessário, antes de tudo, abrir a válvula de *gas lift*. Estas válvulas são, normalmente, do tipo desbalanceadas; isto é, existe uma diferença entre as suas pressões de abertura e de fechamento. Isto significa que é necessário injetar no espaço anular um determinado volume de gás para aumentar a pressão no revestimento, inicialmente à pressão de fechamento, até a pressão de abertura da válvula. Este se constitui, portanto, no volume mínimo de gás a ser injetado no poço. Demonstra-se (Apêndice B) que este volume é diretamente proporcional à relação entre as pressões de revestimento e de tubo, no instante de abertura da válvula, e ao fator R_v da válvula de *gas lift*. Assim, para uma mesma relação P_{to}/P_{vo} , quanto maior for o diâmetro da sede maior será o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift*. Mostra-se, na Figura 7.7, para os diâmetros de 1/2" e 3/4", e em função da relação P_{to}/P_{vo} , o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* (V_{gv}).

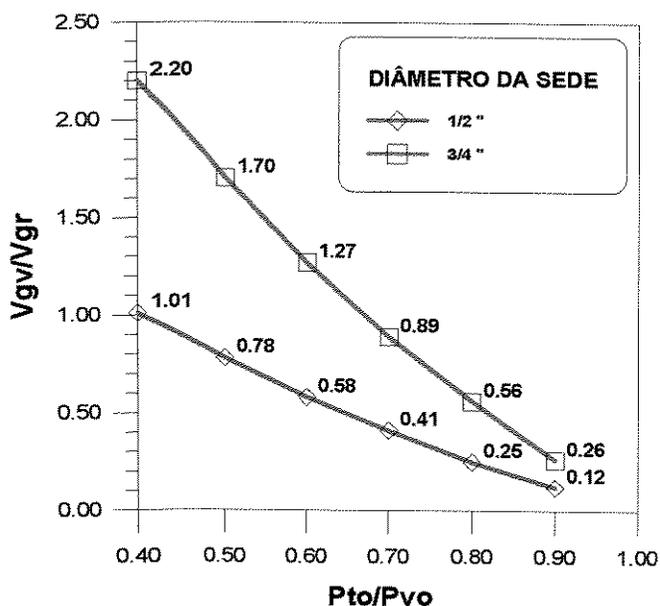


Figura 7.7 - Relação entre o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* (V_{gv}) e o volume de gás de referência (V_{gr}), para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional, em função da relação P_{to}/P_{vo} - poço base.

Observa-se da Figura 7.7 que :

- quanto maior a relação P_{to}/P_{vo} , menor o volume de gás necessário para abrir a válvula ;
- para uma mesma relação P_{to}/P_{vo} o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* é maior para as sedes de 3/4" do que para as sedes de 1/2" ;
- para a relação P_{to}/P_{vo} analisada - 0,70, os volumes necessários são de 41 e 89 % do volume de referência, respectivamente, para sedes de 1/2" e 3/4".

Portanto não é possível injetar, na coluna de produção, volume de gás correspondente a V_{gi}/V_{gr} menor que 0,89 para sede de 3/4" , e menor que 0,41 para sede de 1/2" . No caso das Figuras 7.1 e 7.6 os pontos para V_{gi}/V_{gr} menor que estes valores foram obtidos utilizando-se válvulas tipo piloto (Santos⁽²⁰⁾). Mostra-se, na Figura 7.8, o volume de líquido produzido por ciclo considerando-se estes limites mínimos de injeção.

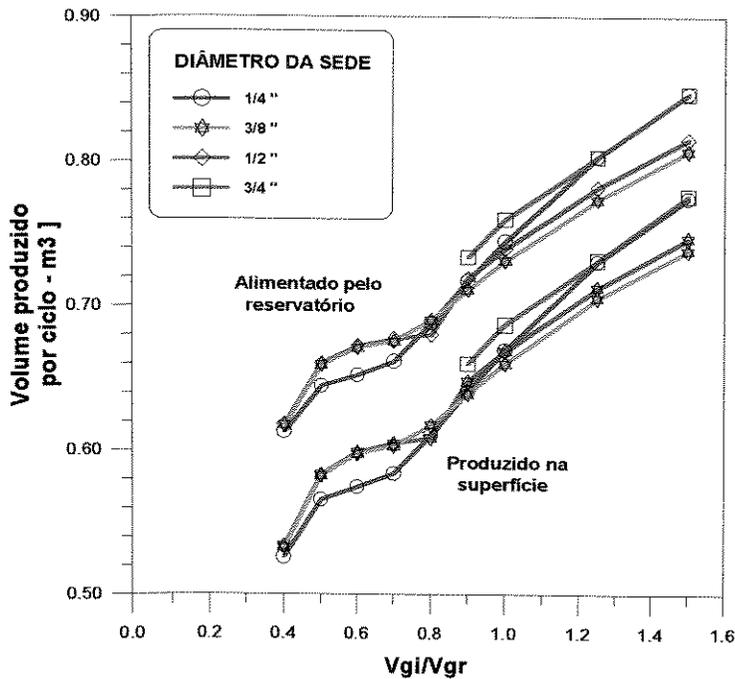


Figura 7.8 - Volume produzido por ciclo em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o *Gas Lift* Intermitente Convencional, considerando-se o limite mínimo de injeção de gás e tendo como parâmetro a sede da válvula de *gas lift* - poço base, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

7.1.2.2. Na vazão de produção diária

Mostra-se, na Figura 7.9, a variação da vazão de produção em função do volume de gás injetado em cada ciclo de produção, tendo-se como parâmetro o diâmetro da sede da válvula de *gas lift*.

Observa-se que as maiores vazões são obtidas com sede de 1/2" ou 3/8", para V_{gi}/V_{gr} igual a 0.50. Apesar da sede com diâmetro de 3/4" apresentar os maiores volumes de produção no ciclo, o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* é da ordem de 90% do volume de referência; isso implica em um tempo de descompressão muito elevado, reduzindo, em consequência, o número de ciclos e a vazão de produção diária.

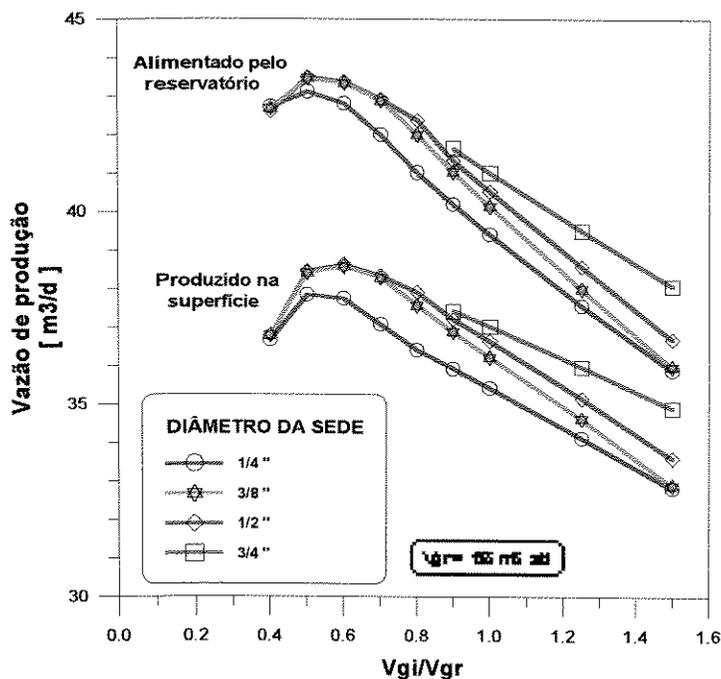


Figura 7.9 - Vazão de produção em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional, tendo como parâmetro a sede da válvula de *gas lift* - poço base, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Um problema coloca-se, portanto, para o *Gas Lift* Intermitente Convencional. Se, por um lado, com uma sede de maior diâmetro obtém-se um maior volume de líquido por ciclo, por outro lado o volume de gás requerido para abrir a válvula pode ser muito elevado (dependendo da capacidade do espaço anular e da relação P_{to}/P_{vo}), reduzindo conseqüentemente a produção diária. Isto torna-se tanto mais grave, como mostrado na Figura 7.7, quanto menor a relação P_{to}/P_{vo} .

A solução para este problema é a utilização de válvulas tipo piloto, desenvolvida para o GLI com a finalidade de se obter uma válvula com o maior diâmetro de sede possível e que ao mesmo tempo permitisse um melhor controle do volume de gás injetado. Este tipo de válvula é dividido em duas seções : piloto e principal. O volume de gás necessário para abrir a válvula é função da sede da seção piloto - disponível em vários diâmetros, enquanto que a passagem de gás, e conseqüentemente a eficiência de elevação, é ditada pelo diâmetro da sede da seção principal - geralmente de 9/16".

Apesar de desenvolvida especialmente para o GLI este tipo de válvula não é de uso muito comum. Na Petrobrás, por exemplo, todos os poços que operam com o GLI utilizam apenas as válvulas tipo desbalanceadas, as mesmas consideradas neste trabalho. Como se verá, porém, este tipo de válvula aplica-se muito bem, em função da baixa relação P_{to}/P_{vo} , nas instalações com câmara de acumulação.

7.1.3. Influência do comprimento inicial da golfada de líquido - adimensional L/H .

7.1.3.1. No volume de líquido produzido por ciclo

Tem-se, para uma mesma relação P_{to}/P_{vo} e uma mesma relação V_{gi}/V_{gr} , que quanto maior o comprimento inicial da golfada menor é o *fall-back* de líquido no final do ciclo de produção (Figura 7.10). Ou seja, maior é a recuperação de líquido. A explicação é que quanto maior o comprimento da golfada de líquido menor é a distância a ser percorrida pela golfada até a superfície. Assim, para velocidades médias aproximadamente iguais, graças à manutenção das relações P_{to}/P_{vo} e V_{gi}/V_{gr} , menor será o tempo de viagem da golfada até a superfície e, portanto, menor será a perda de massa devido à velocidade de penetração da bolha de gás.

Isto explica o menor *fall-back* apenas durante o estágio de elevação, mas e durante o estágio de produção da golfada, como se comporta o *fall-back*? Neste estágio ocorre um aumento na perda de massa do líquido devido, exatamente, ao maior comprimento da golfada; como esta demora mais tempo para ser produzida mais tempo terá a bolha de gás para penetrar na golfada. Devido à aceleração do líquido neste estágio o aumento do *fall-back* é pequeno, quando comparado com a redução do *fall-back* no estágio de elevação. A aceleração do líquido ocorre por causa da diminuição de massa da golfada pela parte produzida.

Este resultado induz à conclusão de que seria sempre desejável operar com grandes comprimentos iniciais de coluna; contudo isto aumentaria o tempo de ciclo, reduzindo o número de ciclos e, conseqüentemente, a vazão de produção. É o que se mostra a seguir.

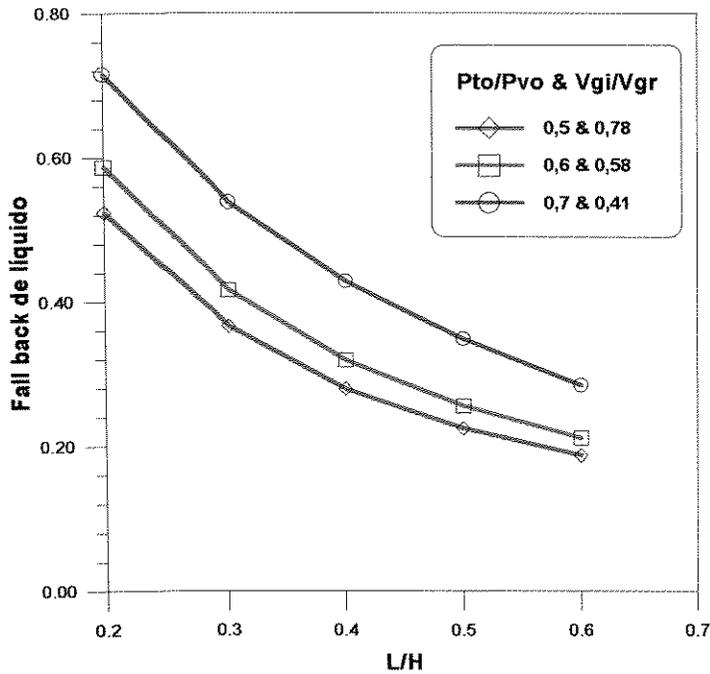


Figura 7.10 - *Fall back* de líquido em função do adimensional L/H, para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede ½ “e $V_{gi} = V_{gv}$.

7.1.3.2. No tempo de ciclo

O comprimento inicial da golfada de líquido é o principal parâmetro a influenciar o tempo de ciclo. Quanto maior o valor de L/H maior será o tempo de alimentação para restabelecer o comprimento inicial e, portanto, maior o tempo de ciclo (Figura 7.11).

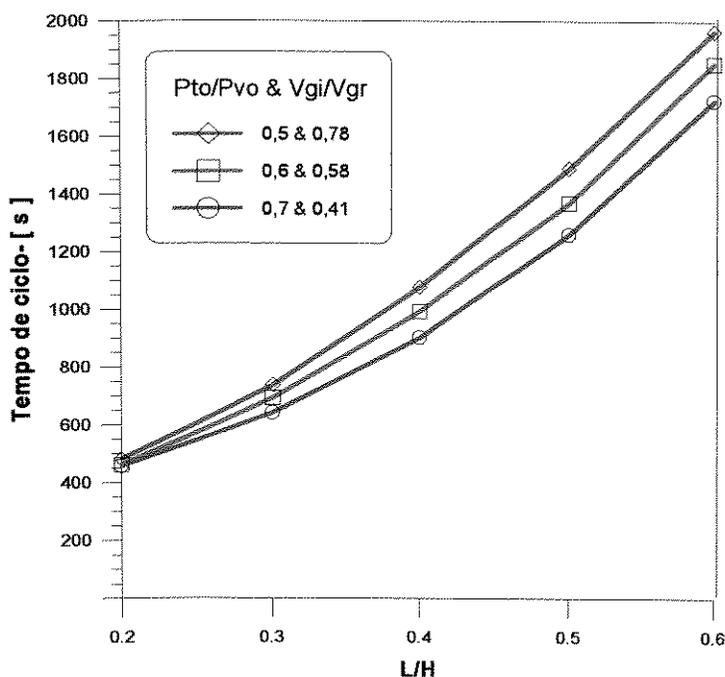


Figura 7.11 - Tempo de ciclo em função do adimensional L/H , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede $\frac{1}{2}$ " e $V_{gi} = V_{gv}$.

7.1.3.3. Na vazão de produção diária

Mostra-se, na Figura 7.12, a variação da vazão de produção em função do comprimento inicial da coluna de líquido, para valores da relação P_{to}/P_{vo} iguais a 0,5, 0,6 e 0,7.

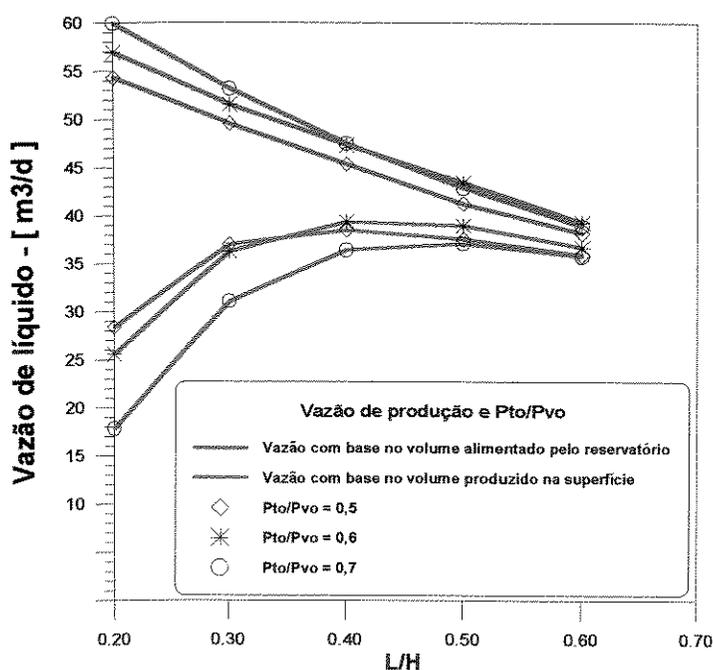


Figura 7.12 - Vazão de produção em função do comprimento inicial da golfada de líquido, para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional, tendo como parâmetro a relação P_{to}/P_{vo} - poço base, sede $\frac{1}{2}$ " e $V_{gi} = V_{gv}$.

Observa-se, para uma mesma relação P_{to}/P_{vo} , que a vazão de líquido calculada com base no volume de líquido alimentado pelo reservatório diminui sempre com o aumento no comprimento inicial da coluna de líquido. O que é de se esperar, já que quanto menor o comprimento da coluna de líquido menor é a contrapressão na formação. Já a vazão obtida com base no volume produzido na superfície inicialmente cresce, para depois diminuir com o aumento no comprimento da coluna inicial. No início a maior recuperação de líquido (Figura 7.10) compensa a redução no número de ciclos (ou aumento no tempo de ciclo - Figura 7.11), o que permite aumentar a vazão de líquido. Após um certo valor, porém, o maior volume recuperado por ciclo não mais compensa a redução no número de ciclos, ocorrendo então queda na produção de líquido. Para P_{to}/P_{vo} igual a 0,7, por exemplo, isto ocorre para L/H em torno de 0,5.

A sensibilidade da vazão de líquido à variação no comprimento inicial da golfada mostra a importância desta variável no método intermitente convencional. Tomando-se como base o volume produzido pelo reservatório tem-se, para o range analisado de L/H - 0,2 a 0,6, uma variação absoluta de 20 m³/d na vazão de líquido (vazão varia de 40 a 60 m³/d), correspondendo a uma variação de 50 % em relação à vazão mínima.

Todos os autores que nos precederam adotam, como volume produzido em cada ciclo, o volume produzido na superfície no primeiro ciclo de produção. Destes, apenas Liao⁽⁸⁾ utiliza este valor para calcular, junto com o número de ciclos por dia, a vazão diária de produção. E, qualitativamente, os resultados obtidos por Liao concordam com os obtidos neste trabalho, quando comparados com a curva de produção com base no volume de líquido produzido na superfície. Pode-se concluir, com base nestes resultados, que os melhores valores da relação L/H são os maiores que 0,5, porque além de maiores produções diárias tem-se menor consumo de gás (menos ciclos por dia). Este valor é consistente com aqueles normalmente divulgados na literatura e utilizados no dimensionamento dos poços para operação. Segundo Liao⁽⁸⁾ : *“existe, para um dado sistema, uma pressão de tubo específica para obter-se a melhor eficiência de operação. A regra geral para a pressão de tubo está na vizinhança de 60 % da pressão do reservatório”*. Também aqui observa-se esta condição; e, na Petrobrás, utiliza-se, como regra geral, no dimensionamento do GLI, um valor para a pressão de tubo entre 60 e 70 % da pressão estática do reservatório.

Porém, quando se toma por base, para o cálculo da vazão de produção, o volume alimentado pelo reservatório no primeiro ciclo (o qual é uma melhor estimativa, como visto no

capítulo 6) , observa-se que quanto menor a relação L/H maior a produção de líquido do poço. Para o poço base e as condições operacionais da Figura 7.12, por exemplo, a vazão máxima seria obtida para uma relação L/H de apenas 0,2.

Contudo o volume de líquido produzido na superfície é, para o primeiro ciclo de produção e valores baixos da relação L/H, extremamente baixa (Figura 7.10). Com isto a espessura de filme residual na parede da tubulação é, principalmente para valores altos do índice de produtividade, relativamente alta. Esta massa de líquido do filme, que se incorpora à golfada no segundo ciclo de produção (Capítulo 6), interfere no escoamento e, de uma forma que será discutida no próximo capítulo, no fechamento do ciclo.

7.1.4. Influência da relação P_{to}/P_{vo}

A análise da influência da relação P_{to}/P_{vo} é feita fixando-se a sede em 1/2" ; o valor da relação L/H em 0,5, e o volume de gás injetado no mínimo necessário para abrir a válvula de *gas lift* ($V_{gi} = V_{gv}$).

7.1.4.1. No volume de líquido produzido por ciclo

Nestas condições o volume de líquido produzido por ciclo é maior para os menores valores da relação P_{to}/P_{vo} (Figura 7.13). Isto ocorre basicamente por dois motivos :

A) devido à maior velocidade inicial da golfada de líquido : quanto menor a relação P_{to}/P_{vo} , para um mesmo comprimento de golfada inicial (portanto mesmo P_{to}), maior é a pressão de abertura da válvula de *gas lift* (P_{vo}). Assim, com uma maior pressão na base a golfada é mais acelerada, atingindo uma velocidade inicial maior e, conseqüentemente, uma maior velocidade média de elevação. E, como já citado (Secção 7.1.1.1), quanto maior a velocidade média de elevação da golfada, para um mesmo comprimento inicial da coluna de líquido, maior é o volume de líquido produzido por ciclo (menor é o *fall-back*).

B) devido ao maior volume de gás injetado por ciclo : o volume de gás mínimo necessário para abrir a válvula de *gas lift* (V_{gv}) varia com a relação P_{to}/P_{vo} ; quanto menor a relação P_{to}/P_{vo} maior é o valor de V_{gv} (Apêndice B). Portanto quanto menor a relação P_{to}/P_{vo} maior é o volume de gás injetado na coluna de produção em cada ciclo. E quanto maior o volume de gás injetado maior é o volume de líquido produzido por ciclo (Figura 7.1).

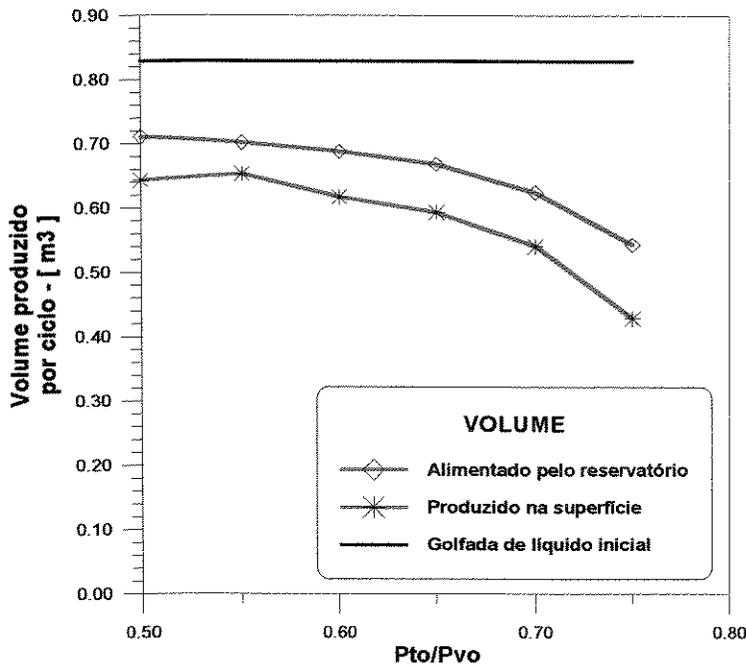


Figura 7.13 - Volume produzido por ciclo em função da relação P_{to}/P_{vo} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede $\frac{1}{2}$ ”, $L/H = 0,5$ e $V_{gi} = V_{gv}$.

7.1.4.2. No tempo de ciclo.

Para as condições estabelecidas nesta seção - sede $\frac{1}{2}$ ”, $L/H=0,5$ e $V_{gi} = V_{gv}$, o tempo de ciclo aumenta para menores valores da relação P_{to}/P_{vo} (Figura 7.14). Viu-se, na seção anterior, que quanto menor a relação P_{to}/P_{vo} maior é a velocidade média de elevação da golfada; função tanto da maior velocidade inicial quanto da maior massa de gás injetada na coluna de produção durante o ciclo (maior V_{gv}) - o que atua no sentido de reduzir o tempo de ciclo. Porém quanto maior a massa de gás injetada por ciclo maior é o tempo de descompressão (Figura 7.4) - atuando portanto no sentido de aumentar o tempo de ciclo. O balanço final é favorável ao tempo de descompressão; ou seja, o aumento no tempo de

descompressão é maior que a redução no tempo de elevação, resultando, portanto, no aumento do tempo de ciclo mostrado na Figura 7.14.

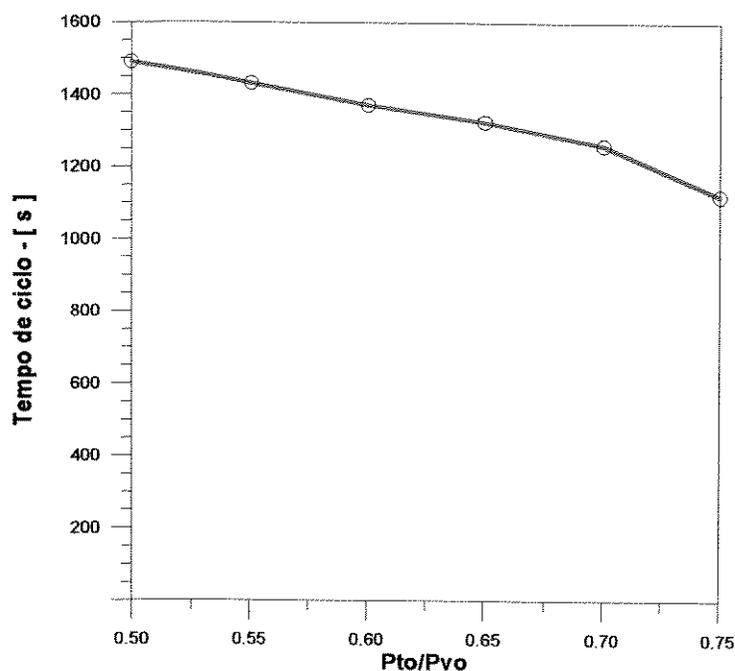


Figura 7.14 - Tempo de ciclo em função da relação P_{to}/P_{vo} - poço base, sede $\frac{1}{2}$ ", $L/H = 0,5$ e $V_{gi} = V_{gv}$.

7.1.4.3. Na produção diária

A produção diária de líquido inicialmente aumenta para depois diminuir com o aumento na relação P_{to}/P_{vo} (Figura 7.15). Isto ocorre porque a relação P_{to}/P_{vo} influencia inversamente no volume produzido por ciclo e no número de ciclos por dia; se o primeiro - tomando por base o volume alimentado pelo reservatório - sempre diminui (Figura 7.13), o segundo, devido à redução no tempo de ciclo (Figura 7.14), sempre aumenta. Para as condições da Figura 7.15, por exemplo, a vazão máxima ocorreria para uma relação P_{to}/P_{vo} da ordem de 0,65 (tendo como base o volume alimentado pelo reservatório).

A vazão de líquido é, para o range analisado - 0,5 a 0,75, pouco sensível às variações na relação P_{to}/P_{vo} . Tomando-se como base o volume produzido pelo reservatório tem-se uma variação absoluta de $2,5 \text{ m}^3/\text{d}$ na vazão de líquido (vazão varia de 41 a $43,5 \text{ m}^3/\text{d}$), correspondendo a uma variação de 6 % em relação à vazão mínima.

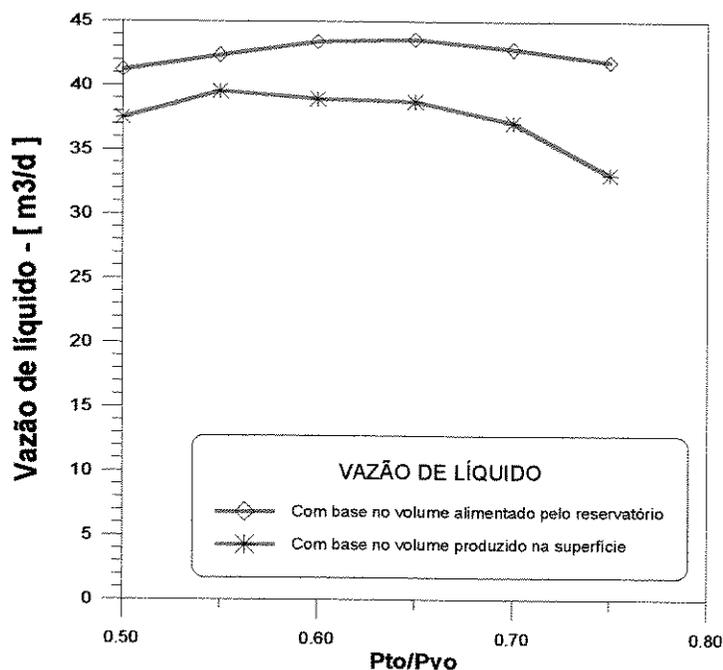


Figura 7.15 - Vazão de produção em função da relação P_{to}/P_{vo} , para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede $\frac{1}{2}$ " , $L/H = 0,5$ e $V_{gi} = V_{gv}$.

7.2. Método : *Gas Lift* Intermitente com Câmara

Os resultados apresentados com o método GLIC foram obtidos, assim como no GLI, com o primeiro ciclo de produção, usando-se o volume alimentado pelo reservatório como estimativa para o volume produzido por ciclo. Além disso, ainda com o objetivo de reduzir o tempo de computação, dois parâmetros de projeto foram fixados: a pressão de abertura e o diâmetro da sede da válvula de *gas lift*.

No método GLIC a pressão requerida para elevar a golfada de líquido até a superfície é, em geral, bastante alta. Por isto, a pressão de abertura da válvula de *gas lift* (P_{vo}) foi fixada num valor igual ao da pressão de gás disponível na superfície, corrigida para a profundidade da válvula de *gas lift*.

O diâmetro da sede foi fixado em função do volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift*, em geral elevado. A pressão de tubo que atua na válvula de *gas lift* no instante de sua abertura (P_{to}) é praticamente constante (igual à pressão no tubo na superfície mais a hidrostática do gás), e é diferente da pressão de tubo de projeto (P_{tp})¹. Não vale, por

¹ P_{tp} é definida como a pressão no tubo na superfície (P_s) mais a hidrostática do líquido na coluna de produção no início do estágio de elevação ($\rho g h_1$) ; no caso das instalações com câmara, portanto, após o estágio de transferência.

isso, a equação para a relação V_{gv}/V_{gr} obtida para o *gas lift* intermitente convencional (Apêndice C). No método GLIC a relação V_{gv}/V_{gr} é função do diâmetro da sede da válvula de *gas lift* e também do comprimento inicial da coluna de líquido, ou seja, do comprimento da câmara (LC), conforme mostrado na equação C.18 (Apêndice C), abaixo reproduzida. Isto ocorre porque P_{to} e P_{vo} são praticamente constantes, o ponto de injeção de gás (z_p) e as áreas do anular (A_{an}) e do tubo (A_t) estão fixas para o poço base, e a pressão de tubo de projeto (P_{tp}) é função de LC. Da equação C.18, portanto, quanto menor a relação P_{to}/P_{vo} , para um mesmo diâmetro de sede - mesmo R_v , maior é o valor da relação V_{gv}/V_{gr} .

$$\frac{V_{gv}}{V_{gr}} = 2 R_v \frac{\left(1 - \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) A_{an} z_p - LC}{\left(1 + \frac{P_{tp}}{P_{vo}}\right) A_t z_p} \quad (C.18)$$

onde,

- A_{an} : Área da seção transversal do anular coluna - revestimento de produção, m^2
- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- LC : Comprimento da câmara de acumulação, m
- P_{to} : Pressão de tubo, à jusante da válvula de *gas lift*, no instante de sua abertura - Pa
- P_{vo} : Pressão de gás no revestimento no instante de abertura da válvula de *gas lift* - Pa
- P_{tp} : Pressão de tubo de projeto - Pa
- R_v : Relação entre as áreas da sede (A_p) e do fole (A_B) da válvula de *gas lift* - $R_v = \frac{A_p}{A_B}$
- V_{gv} : Volume de gás de injeção necessário para abrir a válvula de *gas lift* - m^3
- V_{gr} : Volume de gás de referência - m^3
- z_p : Profundidade do tubo perfurado, m

Mostra-se, na Figura 7.16, como varia a relação V_{gv}/V_{gr} com o comprimento inicial da coluna de líquido L/H, para sedes com diâmetros de 5/16" , 1/2" e 3/4" , e uma pressão estática do reservatório de 85 kgf/cm². Traça-se também a curva limite para L/H - no caso, da ordem de 0,17. Para os valores de L/H acima deste limite a pressão de gás disponível não é suficiente para elevar a coluna de líquido até a superfície. O volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift*, para valores de L/H menores que 0,17 é, para as sedes de 1/2" e 3/4", maior que o volume de referência. E, como visto na análise do método convencional, isto reduziria a produção de líquido devido ao aumento no tempo de decompressão. Uma

alternativa seria utilizar a sede de 5/16", para a qual a relação V_{gv}/V_{gr} é sempre menor que 1. Isto poderia, porém, de acordo com os resultados já obtidos para o *gas lift* intermitente convencional, seja neste trabalho, seja em trabalhos anteriores (Brown⁽³⁾, Liao⁽⁸⁾), reduzir a eficiência de elevação. Uma solução para este problema é, como já antecipado, a utilização de válvulas tipo piloto, que é o modelo normalmente recomendado, na literatura, para as instalações com câmara. Adotou-se, assim, uma válvula piloto com sedes de 5/16" e 9/16" (0.3125 e 0.5625 in), respectivamente nas seções piloto e principal.

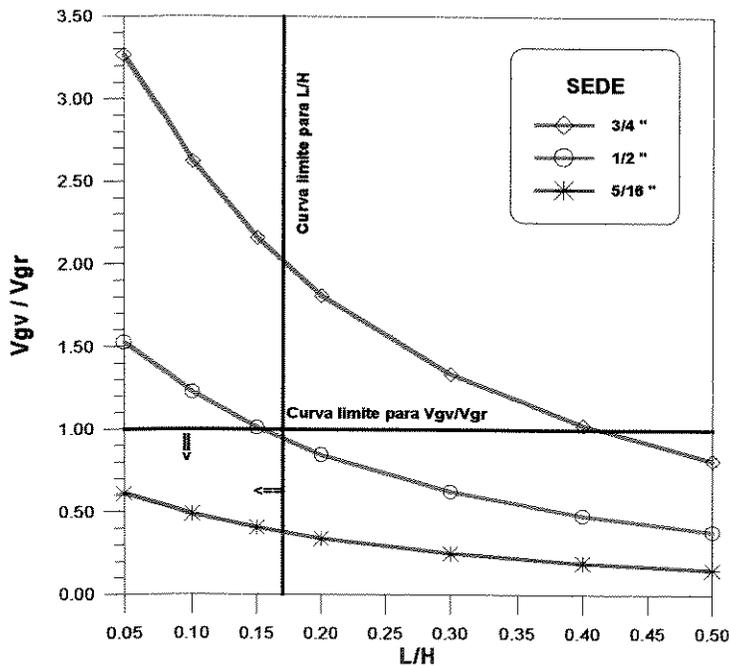


Figura 7.16 - Relação entre o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* (V_{gv}) e o volume de gás de referência (V_{gr}), para o método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação, em função do comprimento da câmara - poço base, $PePh = 60$.

Para o *Gas Lift* Intermitente com Câmara, portanto, os únicos parâmetros de projeto que variam, no presente estudo, são o volume de gás injetado e o comprimento inicial da golfada de líquido, que é, neste caso, igual ao comprimento da câmara de acumulação - LC.

As análises efetuadas mostram que os efeitos destes parâmetros são, tanto no volume de líquido produzido quanto no tempo de duração do ciclo, bastante similares àqueles do método intermitente convencional.

Veja-se, por exemplo, como varia o volume de líquido produzido por ciclo em função do volume de gás injetado (Figura 7.17). Observa-se que, assim como no método intermitente convencional, o volume de líquido produzido na superfície aumenta com o volume de gás injetado, com a produção por golfada tendendo a uma estabilização. Até V_{gi}/V_{gr} igual a 1,00 o

volume devido ao arraste de líquido não é, assim como no método intermitente convencional, significativo.

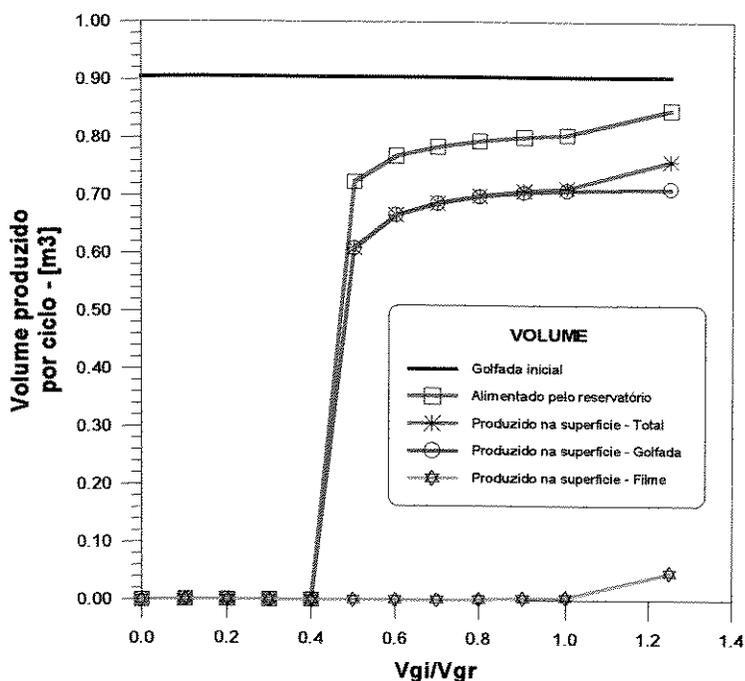


Figura 7.17- Volume de líquido produzido por ciclo, para o *Gas Lift* Intermitente com Câmara, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} - poço base, válvula piloto com sedes de 5/16 “ e 9/16 “ e $L/H = 0,5$.

Na Figura 7.18 mostra-se a variação do *fall-back* de líquido, em função do comprimento da câmara, durante o primeiro ciclo de produção. Ao contrário do que ocorre com o método intermitente convencional verifica-se que :

- ◆ mesmo com pequeno comprimento inicial da coluna de líquido (comprimento da câmara) o *fall-back* de líquido não é excessivo, quando comparado com os valores obtidos com o intermitente convencional. Isto porque o comprimento da coluna de líquido atinge valores elevados no tubo, devido à relação entre as capacidades do tubo e anular.
- ◆ o *fall-back* total de líquido (elevação + produção), inicialmente decrescente com o aumento da coluna inicial, aumenta novamente para os maiores valores da relação L/H ; no caso, para L/H maior que 0,12. Isto ocorre porque o *fall-back* de líquido aparentemente estabiliza-se

durante o estágio de elevação, mas continua aumentando durante o estágio de produção. Durante o estágio de elevação o maior comprimento inicial da coluna de líquido tem efeitos opostos no tempo de viagem da golfada até a superfície : de um lado, a menor distância a ser percorrida atua no sentido de reduzir este tempo; de outro lado, a menor velocidade média da golfada (P_{vo} constante) atua no sentido de aumentá-lo. Até L/H em torno de 0,12 o efeito da redução na distância a ser percorrida é maior que o efeito da redução na velocidade média, invertendo-se os efeitos após este valor. Já no estágio de produção o *fall-back* de líquido é sempre crescente, devido tanto ao maior comprimento da golfada quanto à menor velocidade com que a golfada de líquido chega à superfície.

- ◆ a diferença entre o volume de líquido produzido na superfície e aquele fornecido pelo reservatório é relativamente baixa, comparando-se com os valores encontrados para o método intermitente convencional. Isto ocorre tanto em função dos menores valores do *fall-back* de líquido (mais líquido é produzido na superfície) quanto dos maiores tempos de ciclo (mais tempo tem o líquido do filme para retornar para o fundo do poço).

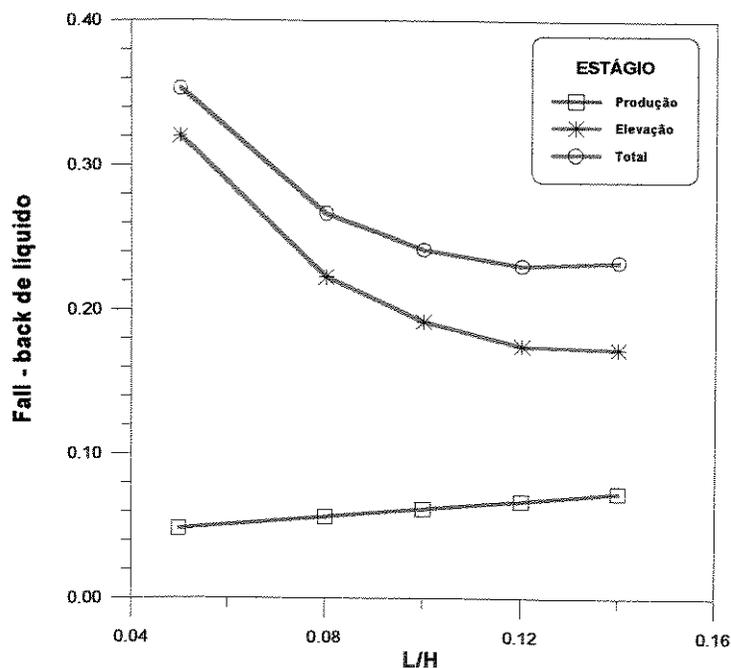


Figura 7.18 - *Fall back* de líquido, durante o ciclo de produção, em função do adimensional L/H , para o método *Gas Lift* Intermitente com Câmara - poço base, válvula piloto com sedes de 5/16 " e 9/16 " e $V_{gi}/V_{gr} = 0,7$.

A vazão diária é máxima para um volume de gás injetado em torno de 70 % do volume de referência (Figura 7.19), enquanto que no método convencional este mesmo valor girava em torno de 50 %. Como o volume de gás de referência por ciclo é, neste método, maior que no convencional, respectivamente 197 m^3 e 168 m^3 , pode-se concluir que o volume de gás necessário por ciclo, para atingir a máxima vazão diária, é maior nas instalações com câmara que nas convencionais.

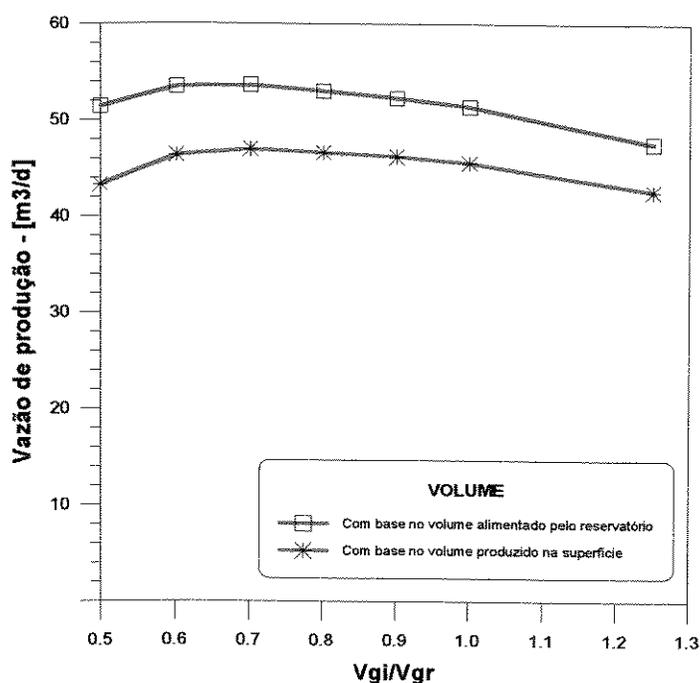


Figura 7.19 - Vazão de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método *Gas Lift* Intermitente com Câmara - poço base, válvula piloto com sedes 5/16 “ e 9/16 ” e $L/H = 0,10$.

7.3. Método : *gas lift* intermitente com pistão

Como o *fall-back* de líquido é admitido igual a zero neste método, o volume de líquido produzido por ciclo é sempre igual ao volume da golfada inicial. Ou seja, as variáveis volume de gás injetado, diâmetro da sede e pressão de abertura da válvula de *gas lift* não têm, neste método, qualquer influência no volume de líquido produzido por ciclo. O que pode ocorrer é a golfada não chegar à superfície, dependendo do volume de gás injetado, dos valores de L/H e da relação P_{to}/P_{vo} . No caso do poço base, para sede de 1/2”, L/H igual a 0,5 e P_{to}/P_{vo} igual a 0,7, a golfada somente chega à superfície para um valor de V_{gi}/V_{gr} maior ou igual a 0,60. Para

as mesmas condições de L/H e P_{to}/P_{vo} , e para V_{gi}/V_{gr} igual a 0,41, produz-se na superfície, com o método intermitente convencional, um volume de aproximadamente $0,53 \text{ m}^3$. É o que mostra a Figura 7.20.

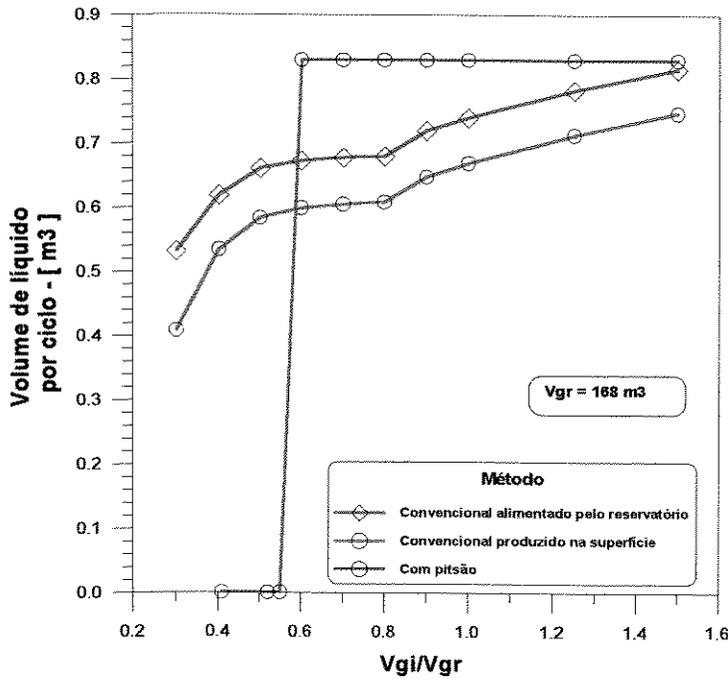


Figura 7.20 - Volume de líquido produzido por ciclo, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede $\frac{1}{2}$ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Observa-se que para grandes volumes de gás injetado os volumes produzidos por ciclo aproximam-se nos dois métodos. Isto ocorre devido ao menor *fall-back* de líquido, nas instalações convencionais, nestas condições.

À semelhança do *Gas Lift* Intermitente Convencional também neste método o volume de gás injetado tem influência no tempo de duração do ciclo (Figura 7.21). Observa-se que, para um mesmo V_{gi}/V_{gr} , o tempo de ciclo nas instalações convencionais é menor que nas instalações com pistão.

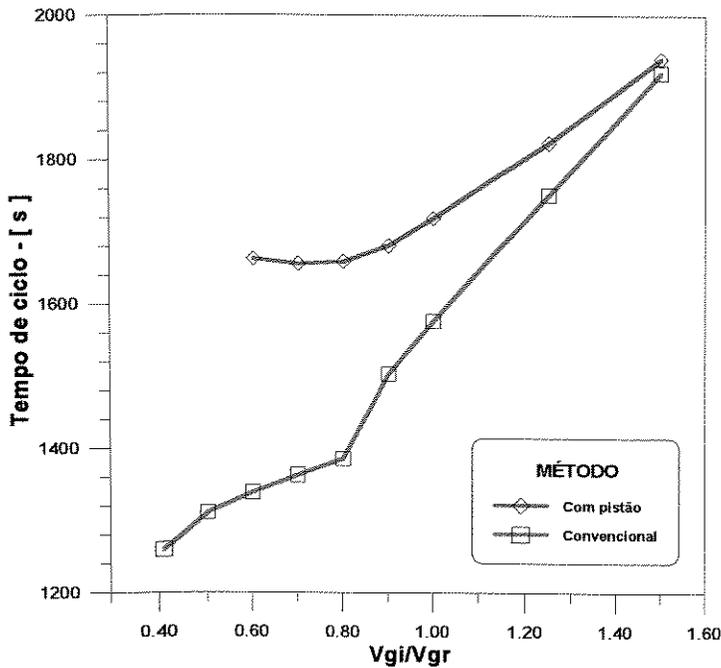


Figura 7.21 - Tempo de ciclo, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede $\frac{1}{2}$ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

Em analogia à Figura 7.4, a Figura 7.22 mostra, para os métodos convencional e com pistão, o tempo decorrido entre o instante de abertura da válvula de *gas lift* e os eventos que caracterizam o final de cada estágio.

Observa-se da Figura 7.22 que, a menos do estágio de decompressão, os demais estágios são concluídos primeiro no método convencional. Para V_{gi}/V_{gr} igual a 0.80, por exemplo, a golfada de líquido é totalmente produzida, com o método convencional, cerca de 306 segundos após o início do ciclo. Já com o método intermitente com pistão o topo da golfada somente chega à superfície, para as mesmas condições, cerca de 343 segundos após o início do ciclo. Ou seja, cerca de 35 segundos após a mesma já ter sido produzida com o método convencional.

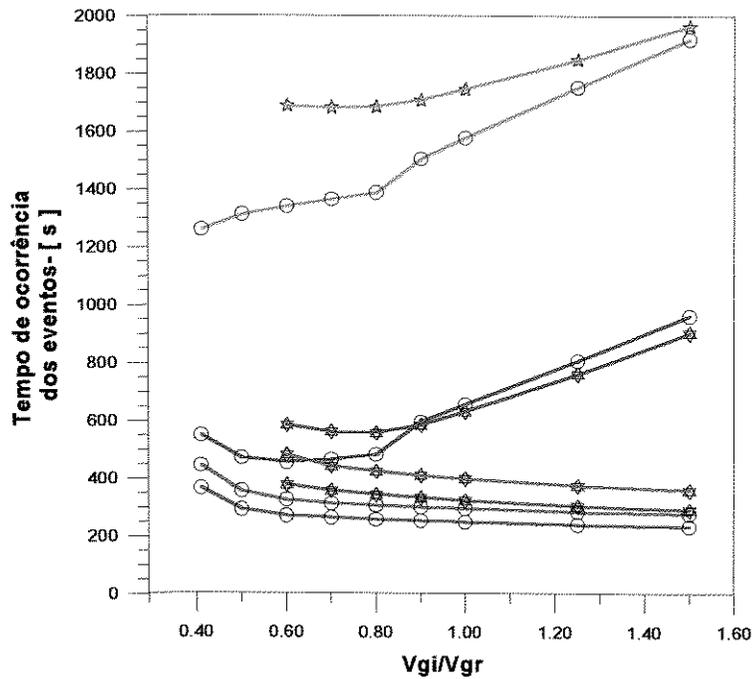
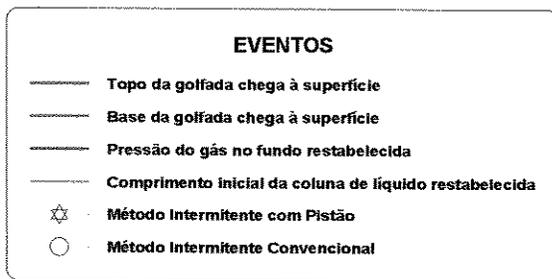


Figura 7.22- Tempo decorrido até o final de cada estágio do ciclo de produção, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão, tendo como referência o instante de abertura da válvula de *gas lift* - poço base, sede $\frac{1}{2}$ ", $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.



Mostra-se, nas figuras de 7.23 a 7.26, o tempo de duração de cada estágio para os dois métodos.

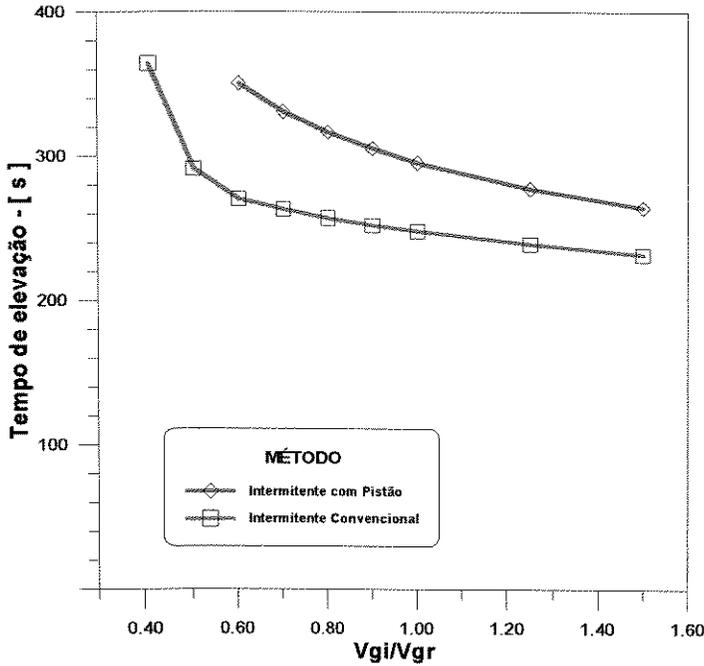


Figura 7.23 - Tempo de duração do estágio de elevação para os métodos GLI e GLIP - poço base, sede 1/2", L/H = 0,5 e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

No método GLI as forças que se opõem ao escoamento - atrito e gravidade - tornam-se menores, em função do *fall back* de líquido, à medida que a golfada viaja até a superfície; portanto mais acelerada

torna-se a golfada.

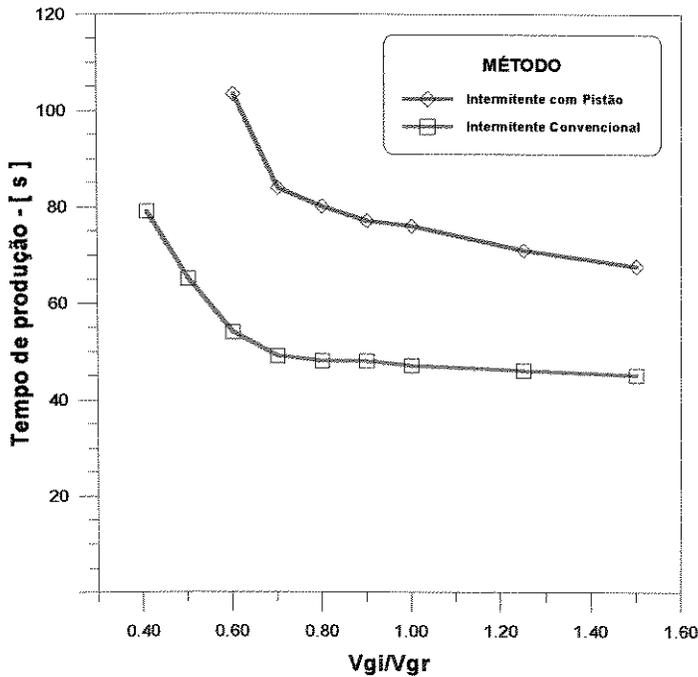


Figura 7.24 - Tempo de duração do estágio de produção para os métodos GLI e GLIP - poço base, sede 1/2", L/H = 0,5 e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

No método GLIP a golfada que chega à superfície é maior e mais lenta; demorando, portanto, mais tempo para ser produzida.

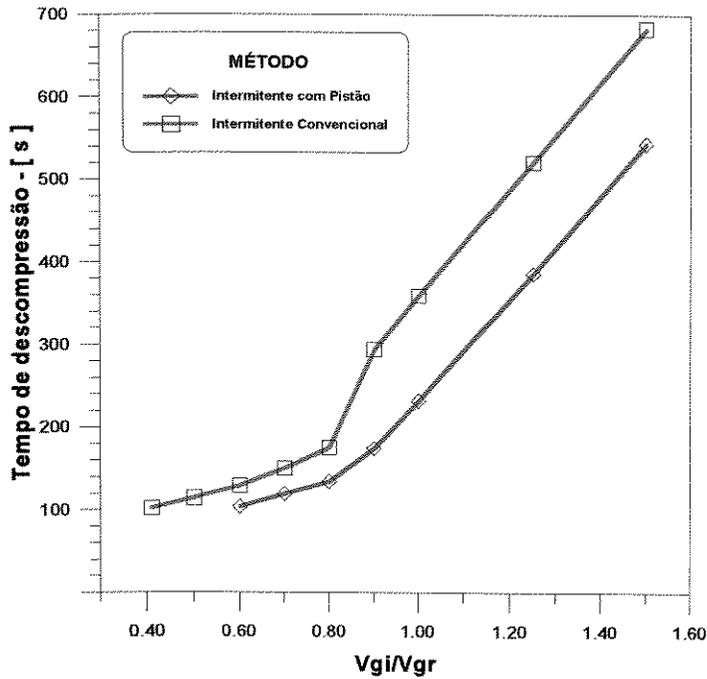


Figura 7.25 - Tempo de duração do estágio de descompressão para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede $\frac{1}{2}$ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

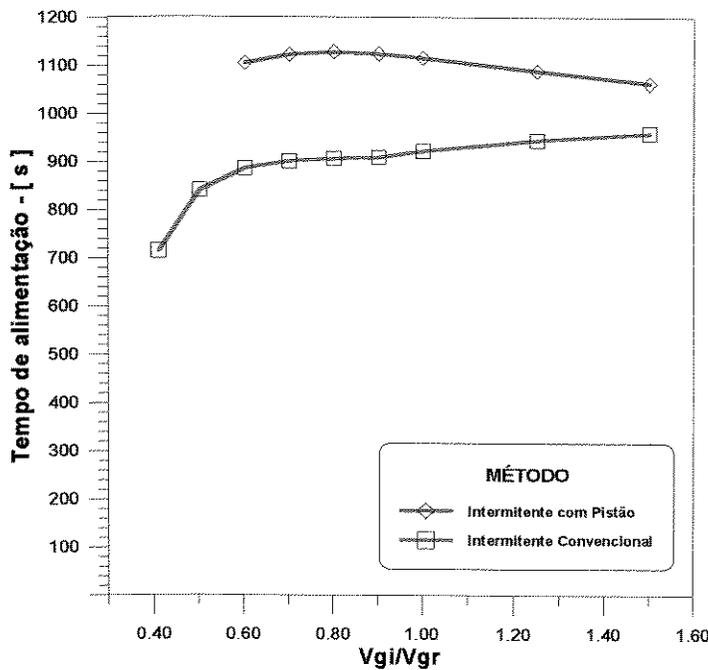


Figura 7.26 - Tempo de duração do estágio de alimentação para os métodos Intermitente Convencional e Intermitente com Pistão - poço base, sede $\frac{1}{2}$ “, $L/H = 0,5$ e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

No método GLI duas fontes contribuem para a formação da coluna de líquido: o filme de líquido e o reservatório, enquanto que no método GLIP tem-se apenas o reservatório. Isto explica o menor tempo de alimentação do método convencional.

Mostra-se, na Figura 7.27, como varia a vazão de líquido, em função do volume de gás injetado por ciclo, para o método Intermitente com Pistão. Estão também representadas, para efeito de comparação, as vazões de líquido para o *Gas Lift* Intermitente Convencional.

Para a condição operacional analisada - L/H igual a 0,5 e P_{to}/P_{vo} igual a 0,7, o valor máximo para a instalação com pistão ocorre para V_{gi}/V_{gr} igual a 0,7 e é da ordem de 43 m³/d. Após este valor a vazão de líquido volta a cair, basicamente porque, a partir deste valor, o tempo de ciclo aumenta (Figura 7.21), reduzindo-se o número de ciclos por dia. A partir de L/H igual a 0,8 a vazão de líquido cai mais rapidamente. Assim como no método intermitente convencional isto ocorre porque a partir deste valor a válvula de *gas lift* permanece aberta após a produção da golfada, aumentando significativamente o tempo de descompressão (Figura 7.22 e Figura 7.25). Para o método intermitente convencional o valor máximo para a vazão diária é, adotando-se como base o volume alimentado pelo reservatório, também da ordem de 43 m³/d, contudo para um V_{gi}/V_{gr} de 0,5. Porém caso esta última vazão seja calculada tomando-se como base o volume de líquido produzido na superfície seu valor seria de apenas 38 m³/d.

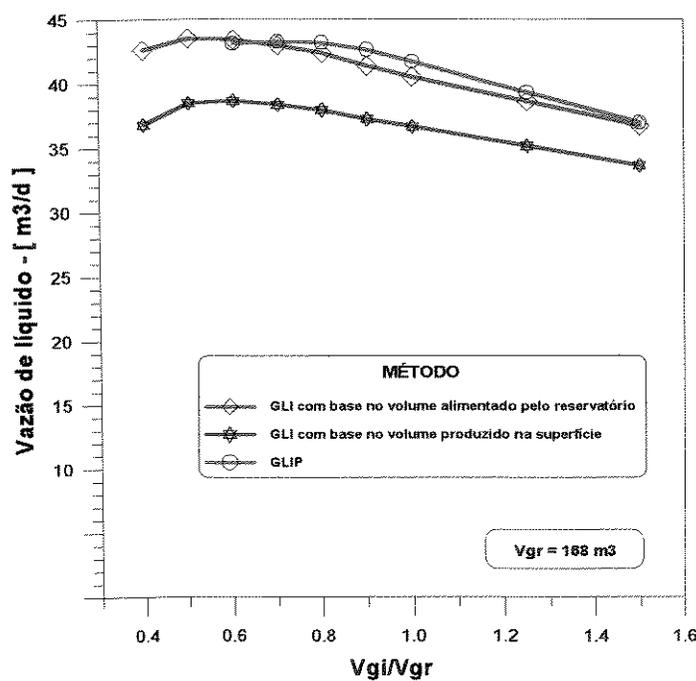


Figura 7.27 - Vazão de líquido, em função do adimensional V_{gi}/V_{gr} , para o método Intermitente com Pistão - poço base, sede 1/2", L/H = 0,5 e $P_{to}/P_{vo} = 0,7$.

7.4. Método : *pig lift*

Admite-se que o *fall back* de líquido é igual a zero também para este método de elevação. Não cabe, portanto, análise da influência dos parâmetros de projeto no volume de líquido produzido por ciclo. Além disso não utiliza válvulas de *gas lift*, e, principalmente, adota um procedimento operacional para redução do tempo de descompressão e controle do volume de gás injetado. Logo, a única variável independente cuja influência foi analisada foi o comprimento da coluna inicial de líquido. Mostra-se, na Figura 7.28, a variação do tempo de ciclo em função do comprimento inicial da coluna de líquido, considerando-se os dois diferentes procedimentos operacionais para a descompressão, abaixo definidos (maiores detalhes sobre cada procedimento poderá ser encontrado no Apêndice D) :

POD1 : utiliza apenas a linha de produção para a descompressão do gás.

POD2 : utiliza, além da linha de produção, também a linha de injeção para a descompressão do gás.

Observa-se que o tempo de ciclo aumenta com o aumento do comprimento da coluna inicial de líquido. Além disso, para uma mesma relação L/H, menores tempos de ciclo são obtidos quando se utiliza também a linha de injeção de gás para a descompressão do gás - procedimento POD2. Observe-se que para L/H igual a 0,2 as condições iniciais do sistema são restabelecidas - ou seja, fecha-se o ciclo - apenas com a descompressão operacional POD2 ; utilizando-se POD1 a altura de líquido inicial é restabelecida antes de concluído o estágio de descompressão.

Mostra-se, na Figura 7.29, a vazão de líquido em função do comprimento inicial da coluna de líquido. Observa-se que as maiores vazões são obtidas para os menores valores de L/H. Assim, para o poço base, quanto menor o comprimento da coluna inicial de líquido maior a vazão diária de produção. Isto acarreta, porém, num consumo de gás bastante elevado, o que pode inviabilizar economicamente a instalação. Esta questão será objeto de análise do próximo capítulo.

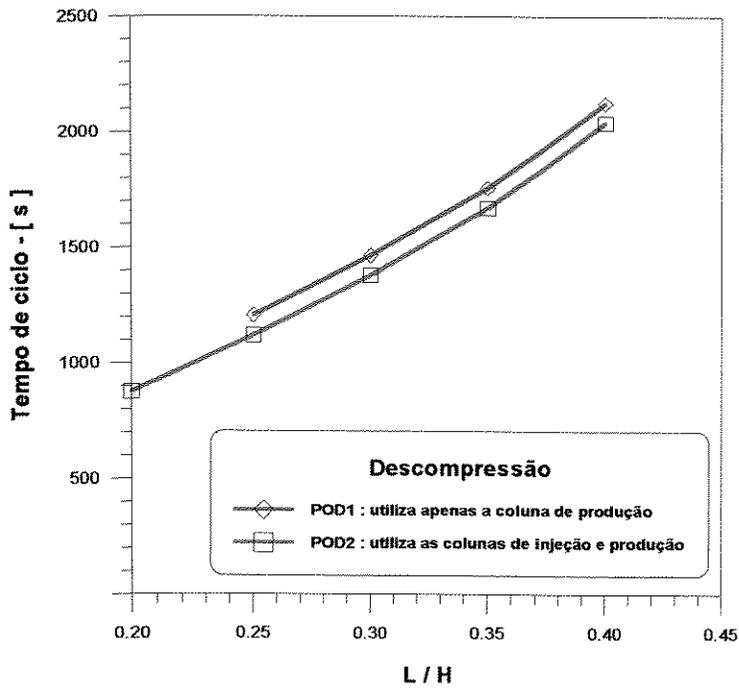


Figura 7.28 - Tempo de ciclo, em função do adimensional L/H, para o método *Pig Lift* - poço base.

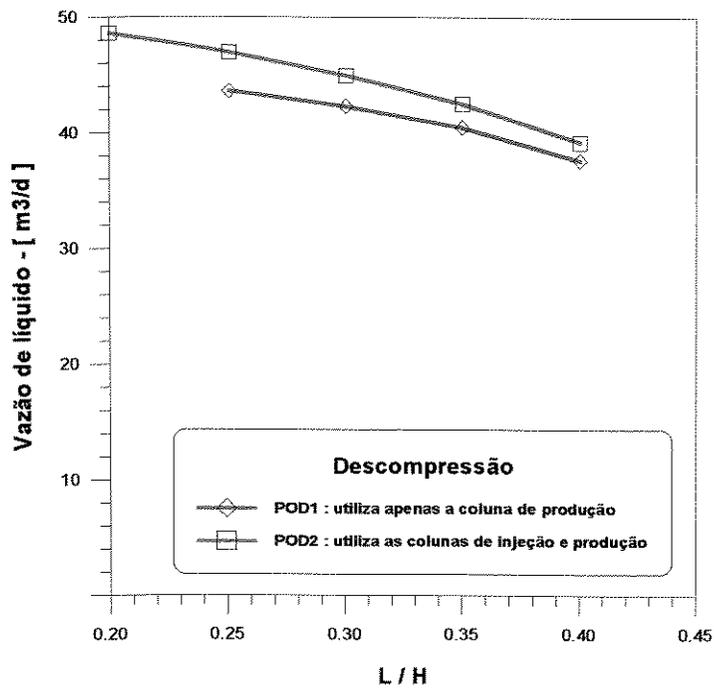


Figura 7.29 - Vazão de líquido, em função do adimensional L/H, para o método *Pig Lift* - poço base.

8. Método de elevação de melhor desempenho.

Nos dois capítulos anteriores discutiu-se o ciclo de produção, levantando-se a questão do ciclo estável para o *Gas Lift* Intermitente Convencional e mostrando-se a influência dos parâmetros de projeto no volume produzido por ciclo, no tempo de ciclo e na vazão de produção do poço. A análise restringiu-se ao poço base, e, apesar de cobrir uma vasta faixa de condições operacionais, não varreu todas as condições possíveis de operação. Este trabalho se propõe, porém, a responder à seguinte questão: dado um determinado poço, com características similares às do poço base, qual método intermitente deve ser instalado ?

A resposta a esta questão passa, necessariamente, pela procura do ponto ótimo de operação, que, nos métodos pneumáticos, contínuos ou intermitentes, pode ser definido por dois critérios : o de vazão máxima ou o de vazão econômica. Pelo critério de vazão máxima definem-se simplesmente as condições operacionais que maximizam a vazão de líquido, independente da vazão de gás necessária para viabilizá-la. Já pelo critério de vazão econômica, mais aplicável, verifica-se se o ganho adicional de óleo justifica o consumo adicional de gás. Deve-se ter em mente, porém, que os resultados do critério econômico são muito dependentes do BSW do poço e qualquer generalização, a partir deste critério, fica restrita aos valores próximos do BSW analisado.

Neste capítulo analisa-se, para o poço base, o desempenho de cada um dos métodos intermitentes com base no critério econômico e para diversos valores de índice de produtividade e pressão estática. Define-se, inicialmente, um conjunto de condições operacionais para análise; calcula-se então as vazões de líquido e gás para o conjunto destas condições operacionais ; e, com base no critério econômico, define-se o ponto ótimo de operação para cada método de elevação; finalmente define-se, para cada par (IP, PE), o método de elevação de melhor desempenho para o poço.

8.1. Condições operacionais

Mostra-se, na Tabela 8.1, a faixa de variação dos parâmetros de projeto para cada método de elevação. Para os métodos *Gas Lift* Intermitente Convencional e *Gas Lift* Intermitente com Pistão fixou-se apenas a sede da válvula de *gas lift*, variando-se os demais parâmetros. Já para o método Intermitente com Câmara fixou-se, além da sede da seção piloto, a pressão de abertura da válvula - num valor igual à pressão de gás disponível na superfície corrigida para a profundidade da válvula de *gas lift*. Para o método *Pig-Lift* variou-se apenas o comprimento da coluna de líquido inicial.

Tabela 8.1 - Faixa de variação dos parâmetros de projeto para o poço base.

Método	Sede	V_{gi}	L / H	P_{to}/P_{vo}
GLI	½	V_{gv} a V_{gr}	0,20 a 0,70	0,50 a 0,70
GLIP	½	V_{gv} a V_{gr}	0,20 a 0,70	0,50 a 0,70
GLIC	Seção piloto : 5/16 “ Seção principal : 9/16 “	V_{gv} a V_{gr}	0,05 a 0,15	-
PL	-	-	0,20 a 0,40	-

O diâmetro da sede, para os métodos convencional e com pistão, foi fixado em ½ “ em função dos resultados obtidos para o poço base, apresentados no capítulo anterior ; a faixa de variação para o volume de gás injetado por ciclo foi fixada de V_{gv} a V_{gr} porque, como tudo indica, o ponto de vazão máxima encontra-se dentro desta faixa ; os limites superiores de L/H, para os métodos com câmara e *Pig-Lift*, foram fixados em função da pressão disponível de gás na superfície ; o limite inferior de P_{to}/P_{vo} , para os métodos convencional e com pistão, foi fixado em 0,50 porque para valores menores que 0,41 o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* é, para as características do poço base e para o diâmetro de sede de 1/2”, maior que o volume de gás de referência (Figura 7.7).

8.2. Vazão de líquido e gás

Devido ao elevado tempo de processamento as vazões de líquido e gás, para os métodos convencional e com câmara, foram obtidas, nesta etapa, apenas para o primeiro ciclo de produção. E, como discutido anteriormente, adotou-se o volume de líquido alimentado pelo reservatório como o volume produzido por ciclo. Numa segunda etapa buscou-se, para os pontos de operação mais econômicos do método convencional, as vazões de líquido e gás no ciclo estabilizado

Adotou-se o seguinte procedimento para o cálculo das vazões de líquido e gás para os métodos convencional e com pistão :

1. com os parâmetros L/H e P_{to}/P_{vo} fixos calculava-se as vazões de líquido e gás para V_{gi} igual a V_{gv} ;
2. ainda com os mesmos parâmetros L/H e P_{to}/P_{vo} repetia-se o cálculo para um valor de V_{gi} igual a 1,1 vezes o valor anterior ;
3. se a vazão de líquido obtida no passo 2 fosse menor que a do passo 1 passava-se para outro par $\{L/H, P_{to}/P_{vo}\}$, voltando-se ao passo 1; caso contrário repetia-se o procedimento a partir do passo 2.

Nas instalações com câmara seguiu-se o mesmo procedimento acima, variando-se em cada passo, entretanto, apenas a relação L/H , desde que P_{vo} é constante para todas as simulações.

No caso do método *Pig Lift* os cálculos foram feitos, para cada valor de L/H , restringindo-se a injeção de gás na superfície com um estrangulador de fluxo regulado em 20/64", e injetando-se gás na coluna até que o pig-espuma atingisse a superfície. Além disso os cálculos foram realizados adotando-se os dois procedimentos de descompressão, POD1 e POD2 (definidos no capítulo 7).

Mostra-se, nas Figuras de 8.1 a 8.4, os resultados obtidos para as vazões de líquido e gás, para cada condição operacional e para cada método de elevação. Observa-se que :

1. independente do método de elevação as maiores vazões de líquido ocorrem para os menores valores do parâmetro L/H ;
2. aparentemente, para o método *Gas Lift* Intermitente Convencional, os pontos operacionais mais eficientes - maior vazão de líquido com menor consumo de gás - são aqueles cuja relação P_{to}/P_{vo} é igual a 0,70 ; e, para o método *Gas Lift* Intermitente com Pistão, aqueles cuja relação P_{to}/P_{vo} é igual a 0,60 ;
3. existe, para cada condição operacional, um volume de gás injetado que maximiza a vazão de líquido ; entretanto, este não corresponde ao ponto ótimo econômico, como será visto na secção 8.3;
4. para alguns pontos operacionais a vazão de líquido é máxima para um volume de gás injetado igual ao mínimo necessário para abrir a válvula de *gas lift*. Pode ser que, nestes casos, uma sede com menor diâmetro, 3/8 “ por exemplo, desse melhores resultados. Recomenda-se investigar esta opção num trabalho futuro.

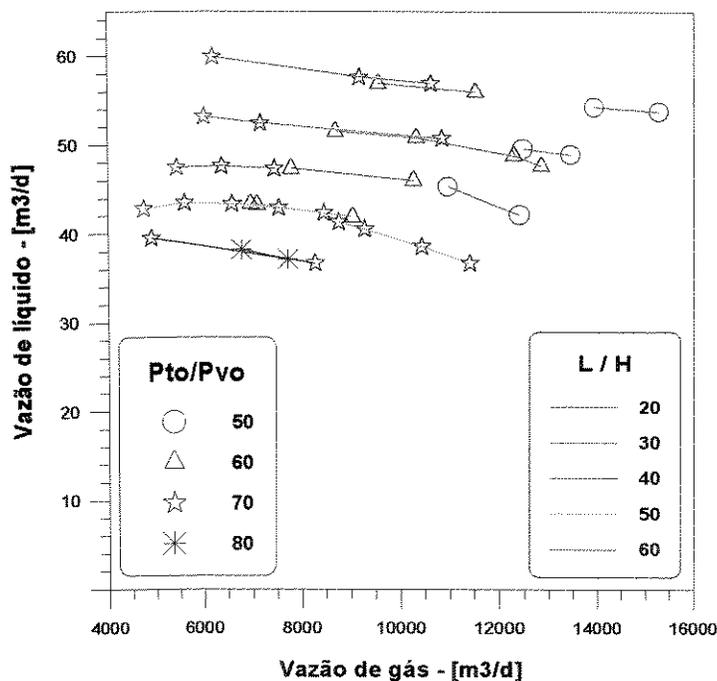


Figura 8-1- Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2".

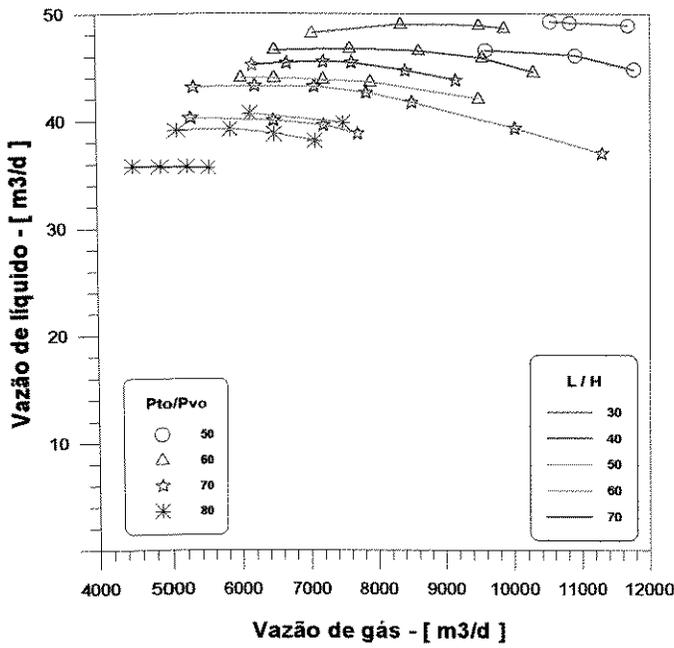


Figura 8-2 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método *Gas Lift* Intermitente com Pistão - poço base, sede 1/2".

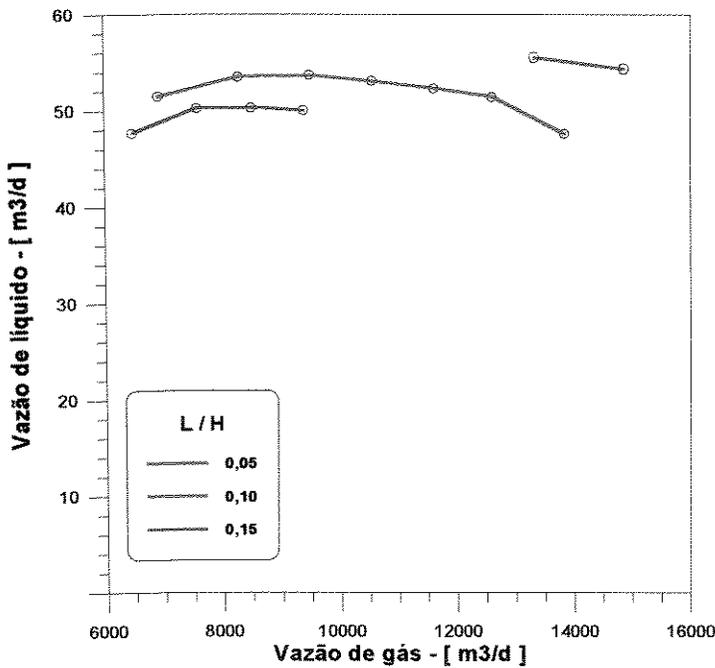


Figura 8-3 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método Intermitente com Câmara - poço base e válvula piloto com sedes 5/16" de 9/16".

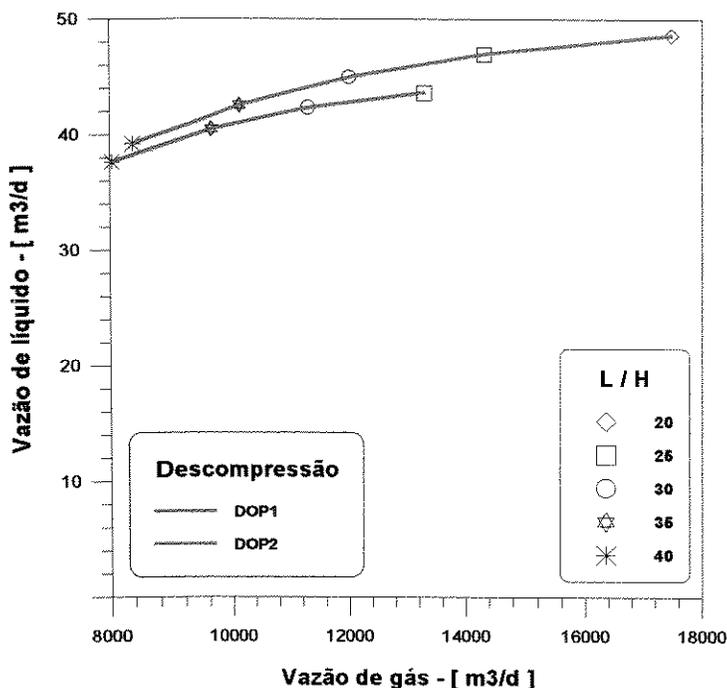


Figura 8-4- Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para os pontos operacionais do método *Pig Lift* - poço base.

8.3. Ponto ótimo de operação : critério econômico.

Em geral o volume adicional de gás necessário não justifica operar no ponto de vazão máxima. Adota-se, então, o critério econômico para a definição do ponto de operação. Admitindo-se as valorações de óleo e gás, de uso corrente na exploração de petróleo no Brasil, determina-se que o lucro é maximizado quando $dq_{oleo}/dq_{gas} \approx 0.001$ (outros custos e receitas considerados constantes). Portanto neste trabalho considera-se que a passagem de um ponto de operação para outro é econômica quando satisfizer a seguinte relação :

$$\frac{dq_{gas}}{dq_{oleo}} < 1000 \quad (8.1)$$

Esta relação é válida para um sistema aberto, ou seja, onde o gás de injeção, após produzido, não é reaproveitado; considera apenas a relação energética entre o gás natural e o óleo cru - 1000 : 1, ou seja, 1000 m³ de gás natural equivale a 1 m³ de óleo. Num sistema fechado - onde o gás de injeção, após produzido e separado do líquido, é recomprimido e reinjetado - a relação dada pela equação (8.1) seria maior que 1000. Este valor é, porém,

muito dependente das tarifas locais de energia elétrica e, por isso, não será utilizado neste trabalho.

Rescrita em função da vazão de líquido, para um BSW de 50 %, a equação (8.1) fica :

$$\frac{dq_{gas}}{dq_{liq}} < 500 \quad (8.2)$$

Ou seja, um ponto de operação é econômico, para o poço base (BSW = 50 %), quando uma vazão adicional de 500 m³/d de gás resultar em uma vazão adicional de, no mínimo, 1 m³/d de líquido.

Para ordenar as diversas condições operacionais em economicidade crescente adotou-se o seguinte procedimento :

1. listava-se os pontos de operação em ordem crescente da vazão de gás injetado ;
2. calculava-se a variação nas vazões de líquido e gás ao se passar do primeiro para o segundo ponto de operação ;
3. se a relação $\frac{dq_{gas}}{dq_{liq}} < 500$ era satisfeita trocava-se a ordem dos pontos 1 e 2 ; caso contrário, mantinha-se a mesma ordem ;
4. comparava-se o terceiro ponto de operação com os pontos 1 e 2, mudando-se a ordem destes pontos de acordo com a relação dada pela equação (8.2) ;
5. repetia-se o passo anterior para os demais pontos de operação.

Mostra-se, na Tabela 8.2 e na Figura 8.5, os 5 pontos de operação mais econômicos de cada método.

Tabela 8.2 - Vazão de líquido e gás, no primeiro ciclo de produção, para os 5 pontos operacionais mais econômicos de cada método.

MÉTODO	Ponto	L/H	P_{to}/P_{vo}	V_{gi}/V_{gr}	q_g [m ³ /d]	q_{ires} [m ³ /d]	q_{ls} [m ³ /d]	q_{ls}/q_{ires}
Convencional (GLI)	1	0,20	0,70	0,41	6135	59,90	17,83	0,30
	2	0,30	0,70	0,41	5963	53,15	31,05	0,58
	3	0,20	0,70	0,60	9144	57,60	23,68	0,41
	4	0,30	0,70	0,50	7116	52,40	34,16	0,65
	5	0,20	0,60	0,41	9537	56,90	25,60	0,45
Câmara (GLIC)	1	0,10	-	0,49	6892	51,40	43,25	0,84
	2	0,10	-	0,60	8241	53,43	46,32	0,87
	3	0,14	-	0,70	7525	50,16	46,15	0,92
	4	0,10	-	0,70	9450	53,62	46,94	0,88
	5	0,14	-	0,60	6478	47,64	43,33	0,91
Pistão (GLIP)	1	0,30	0,60	0,60	7002	48,10	48,10	1,00
	2	0,40	0,60	0,60	6454	46,53	46,53	1,00
	3	0,40	0,70	0,65	6129	45,15	45,15	1,00
	4	0,50	0,70	0,60	5265	43,09	43,09	1,00
	5	0,30	0,60	0,70	8322	48,96	48,96	1,00
Pig Lift (PL)	1	0,40	-	-	8371	39,18	39,18	1,00
	2	0,35	-	-	10095	42,51	42,51	1,00
	3	0,30	-	-	11986	44,92	44,92	1,00
	4	0,25	-	-	14313	46,94	46,94	1,00
	5	0,20	-	-	17481	48,58	48,58	1,00

Onde,

q_g : é a vazão de gás injetada - [m³/d]

q_{ires} : é a vazão de líquido com base no volume alimentado pelo reservatório - [m³/d]

q_{ls} : é a vazão de líquido com base no volume produzido na superfície - [m³/d]

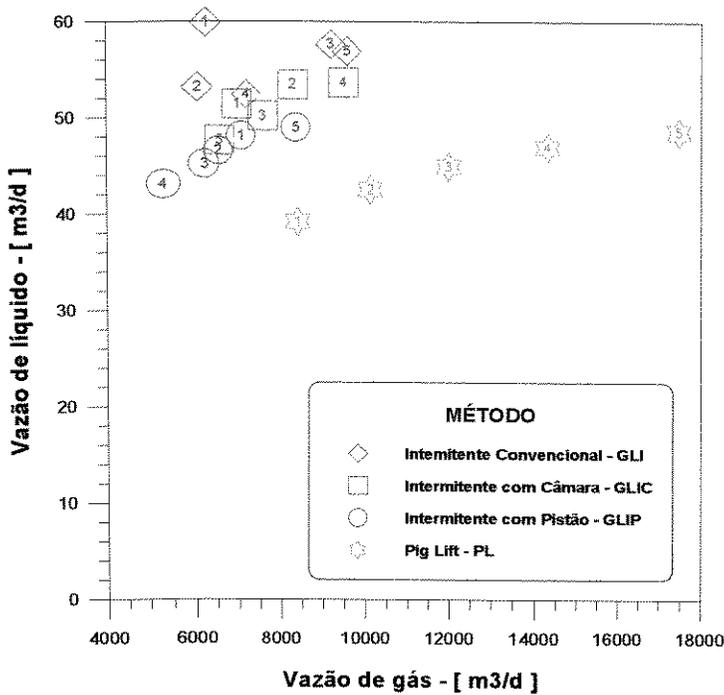


Figura 8-5- Vazão de líquido e gás, no primeiro ciclo de produção, para os 5 pontos operacionais mais econômicos de cada método - poço base.

As relações q_l/q_{lres} para o método convencional são muito baixas (Tabela 8.2), principalmente para o ponto de operação mais econômico. Isto pode ser uma indicação que a diferença entre as vazões do reservatório no primeiro ciclo e no ciclo estabilizado é relativamente alta. Procurou-se, então, o ciclo estável de produção para o ponto operacional de melhor desempenho - ponto {20,70,41}, ou seja : L/H igual a 0,20 , P_{to}/P_{vo} igual a 0,70 e V_{gi}/V_{gr} igual a 0,41. Este ponto demonstrou ser, porém, não aplicável - já no segundo ciclo de produção o nível de fluido inicial era restabelecido antes de concluído o estágio de descompressão. O mesmo ocorreu com o segundo e terceiro pontos de operação. O quarto ponto de operação estabilizou-se numa produção de aproximadamente 48 m³/d, com uma vazão de gás injetada de 6795 m³/d. Detalha-se, a seguir, o que ocorre com um ponto operacional não estável de produção.

Nas Figuras 8.6, 8.7 e 8.8 mostra-se como varia o comprimento da coluna de líquido, durante o estágio de descompressão, para o ponto operacional {30, 70, 41}, respectivamente para o primeiro, segundo e terceiro ciclos de produção. Verifica-se que aumenta, a cada ciclo, o comprimento da coluna de líquido no final do estágio de descompressão, tornando-se maior que o comprimento inicial no terceiro ciclo. Isto ocorre devido ao aumento da perda de massa da coluna de líquido a cada ciclo (Figura 6.8), resultando em uma maior espessura de filme na parede da coluna de produção (Figura 6.9). Com o aumento na espessura do filme aumenta

também a vazão de líquido que retorna para o fundo do poço. Este processo se repete, a cada ciclo, até a estabilização ou até que o volume de líquido acumulado no fundo torne-se maior que o volume de líquido inicial.

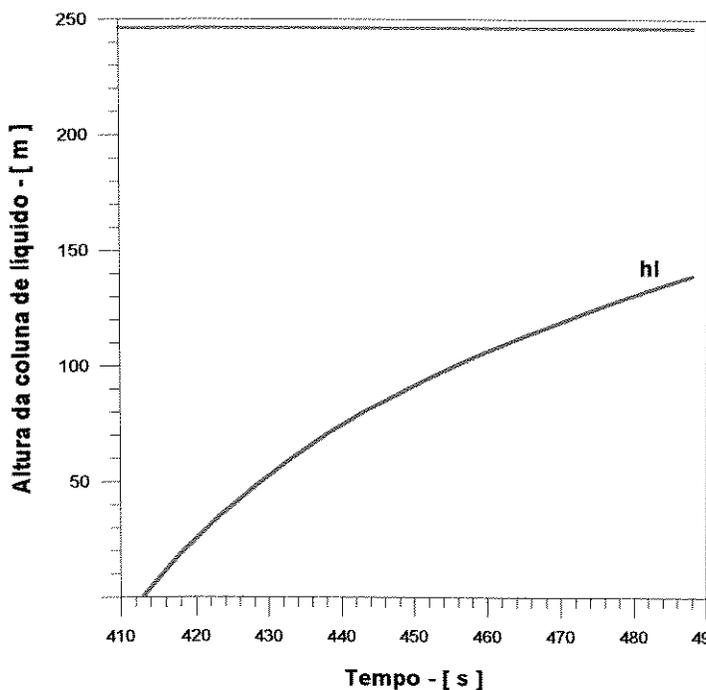


Figura 8-6 - Altura da coluna de líquido - h_l , durante o estágio de decompressão, no primeiro ciclo de produção do ponto operacional {30, 70, 41}.

A altura da coluna de líquido ainda é, no final do estágio, bem menor que o comprimento da coluna inicial - L.

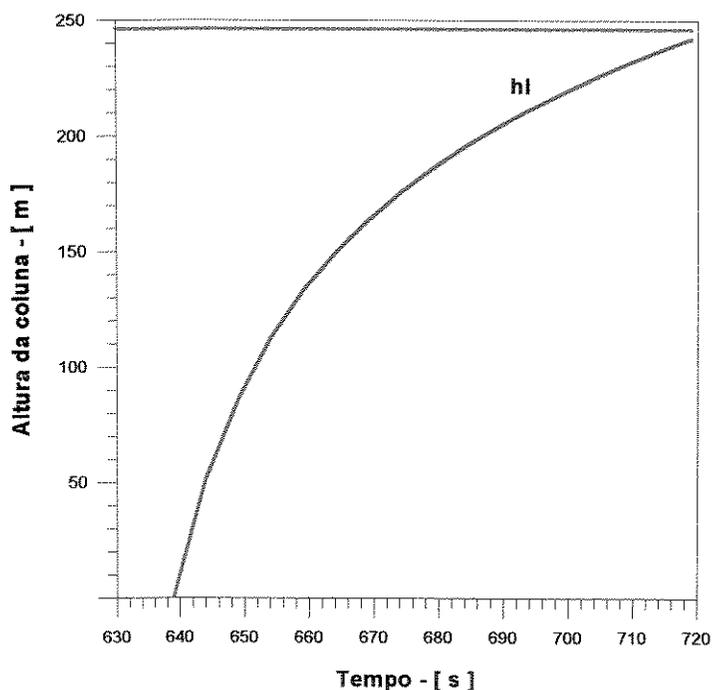


Figura 8-7 - Altura da coluna de líquido - h_l , durante o estágio de decompressão, no segundo ciclo de produção do ponto operacional {30,70,41}.

A altura da coluna de líquido é, no final do estágio, praticamente igual ao comprimento da coluna inicial - L.

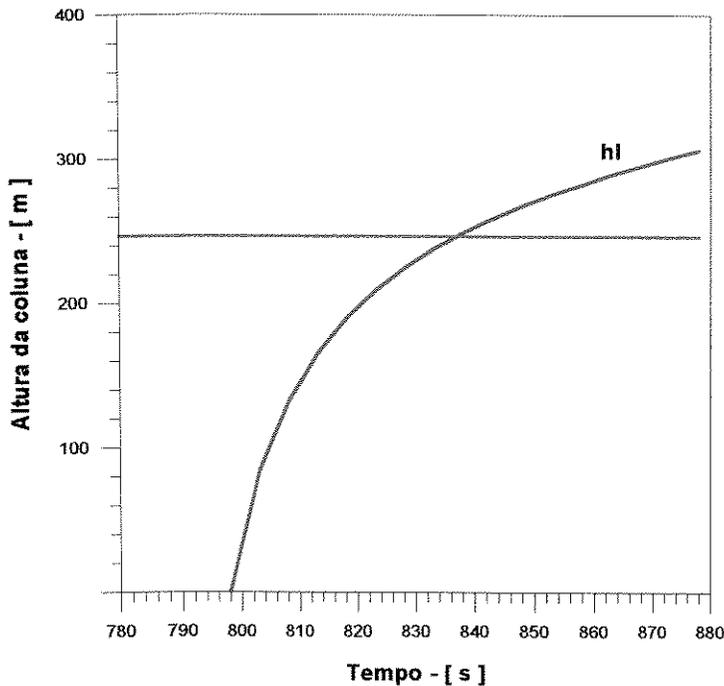


Figura 8-8 - Altura da coluna de líquido - h_l , durante o estágio de descompressão, no terceiro ciclo de produção do ponto operacional {30,70,41}.

A altura da coluna de líquido é, no final do estágio, maior que o comprimento da coluna inicial - L.

Mostra-se, na Tabela 8.3, a contribuição do filme de líquido e do reservatório, nos estágios de descompressão e alimentação, na formação da coluna de líquido. No primeiro ciclo o estágio de descompressão - Fase III inicia-se com uma espessura de filme na parede (y) igual a $2,20 \times 10^{-3}$ metros e um comprimento de coluna (h_l) praticamente igual a zero; e termina com uma espessura de filme de $1,30 \times 10^{-3}$ metros e um comprimento da coluna de líquido de 140 metros (Figura 8.6). A composição da coluna, no final do estágio de descompressão, é de 80 % de líquido do filme que retorna para o fundo do poço e 20 % de líquido fornecido pelo reservatório. Concluído o ciclo tem-se a seguinte composição para a coluna de líquido: 67 % é de líquido do filme que retorna para o fundo do poço e 33 % é de líquido do reservatório. No segundo ciclo o volume de líquido que retorna para o fundo do poço representa cerca de 90 % do volume total da coluna de líquido. A coluna de líquido é praticamente restabelecida, neste ciclo, já no estágio de descompressão (Figura 8.7). No terceiro ciclo o volume de líquido que se acumula durante o estágio de descompressão é maior que o volume inicial (Figura 8.8). Não ocorre, portanto, o fechamento do ciclo. O mesmo ocorre com os pontos operacionais {20, 70, 41} e {20,70, 60}.

Tabela 8.3 - Composição da coluna de líquido, durante os estágios de descompressão e alimentação, para os primeiros ciclos do *Gas Lift* Intermitente Convencional - poço base, sede 1/2" e ponto operacional {30,70,41}.

Estágio de descompressão - Fase III							Estágio de alimentação				
Condições iniciais		Condições finais					Condições finais				
y [10 ⁻³ m]	h _i [m]	Volume			y [10 ⁻³ m]	h _i [m]	Volume			y [10 ⁻³ m]	h _i [m]
		Total [m ³]	Filme [%]	Reserv [%]			Total [m ³]	Filme [%]	Reserv [%]		
2,20	0,123	0,281	81	19	1,30	140	0,497	67	33	0,85	246
3,21	0,150	0,489	90	10	1,41	242	0,497	90	10	1,38	246
3,85	0,166	0,621	93	7	1,45	307	-	-	-	-	-

Repete-se, na Tabela 8.4, os mesmos dados da Tabela 8.3, porém agora para o ponto operacional {30, 70, 50}. A única diferença entre este e o ponto {30, 70, 41} é no volume de gás injetado por ciclo : injeta-se a mais, no ponto {30, 70, 50}, 9 % do volume de referência, ou seja, cerca de 5 m³ por ciclo. O ciclo tende a estabilizar-se com a seguinte composição para a coluna de líquido: 74 % de líquido do filme que retorna para o fundo do poço e 26 % de líquido do reservatório. Cabe lembrar que este último não é o volume produzido pelo reservatório durante todo o ciclo de produção, já que, pelo modelo, o líquido produzido pelo reservatório nos estágios de elevação, produção e descompressão - Fase I acumula-se no filme de líquido na parede da tubulação.

Tabela 8.4 - Composição da coluna de líquido, durante os estágios de descompressão e alimentação, para os primeiros ciclos do *Gas Lift* Intermitente Convencional - (poço base, sede 1/2 " e ponto operacional {30,70,50}).

Estágio de descompressão - Fase III							Estágio de alimentação				
Condições iniciais		Condições finais					Condições finais				
y [10 ⁻³ m]	h _i [m]	Volume			y [10 ⁻³ m]	h _i [m]	Volume			y [10 ⁻³ m]	h _i [m]
		Total [m ³]	Filme [%]	Reserv [%]			Total [m ³]	Filme [%]	Reserv [%]		
1,81	0,110	0,224	73	27	1,160	111	0,497	55	45	0,72	246
2,26	0,125	0,316	81	19	1,230	157	0,497	69	31	0,86	246
2,38	0,128	0,341	82	18	1,250	169	0,497	72	28	0,91	246
2,42	0,129	0,352	83	17	1,254	173	0,497	73	27	0,92	246
2,44	0,130	0,353	83	17	1,257	175	0,497	74	26	0,93	246

As Tabelas 8.3 e 8.4 mostram como varia a composição da coluna de líquido, a cada ciclo de produção. Não mostram como variam, porém, as vazões de líquido e gás para os vários ciclos de produção do ponto operacional {30, 70, 50}. O que é feito utilizando-se a Tabela 8.5.

Tabela 8.5 - Vazão de líquido e de gás, no *Gas Lift* Intermitente Convencional, para os ciclos de produção do ponto operacional {30,70,50} - poço base, sede ½ “.

CICLO	TC [min]	y [10 ⁻³ m]	q _{ls} [m ³ / d]	q _{lres} [m ³ / d]	q _g [m ³ / d]
1	11,05	0,72	34,17	52,40	7116
2	11,37	0,86	45,93	49,48	6918
3	11,48	0,91	47,41	48,71	6848
4	11,53	0,92	47,82	48,45	6820
5	11,55	0,93	47,97	48,35	6809
<i>Estável</i>		0,94	48,21	48,21	6795

Verifica-se que o sistema praticamente estabiliza-se, a partir do quinto ciclo, com um tempo de ciclo de 11,5 minutos, uma espessura de filme de 0,003 m, e vazões de líquido e gás de, respectivamente, 48 e 6800 m³/d.

Para muitos pontos de operação eram necessários vários ciclos para se alcançar o ciclo estabilizado, o que consumia um tempo demasiado de processamento. O problema foi contornado limitando-se em quatro o número de ciclos e ajustando-se os pontos por dois polinômios de segundo grau. O ponto de equilíbrio era então determinado pela interseção entre estas duas curvas de ajuste. Mostra-se, na Figura 8.9, como variam q_{ls} e q_{lres} em função da espessura do filme no final de cada ciclo e as curvas de ajuste utilizando-se um polinômio de segundo grau.

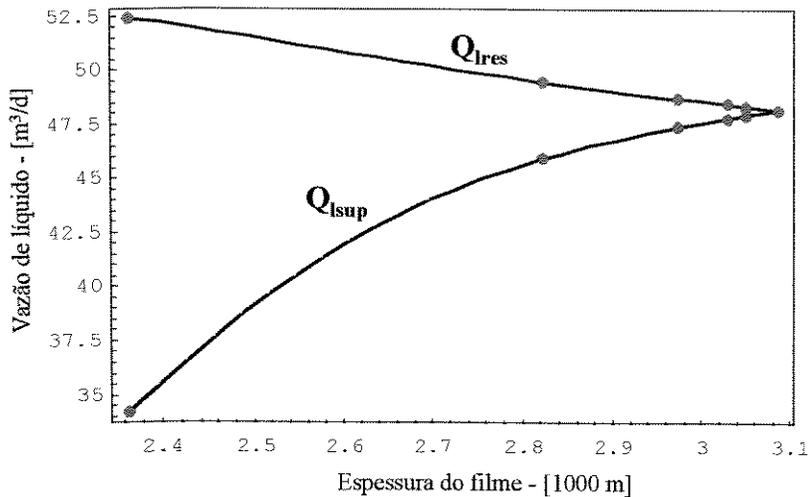


Figura 8-9 - Vazão de líquido, para o GLI, com base nos volumes alimentado pelo reservatório e produzido na superfície, com as respectivas curvas de ajuste - poço base, sede 1/2 " e ponto operacional {30,70,50}.

Para o método com câmara de acumulação não se procurou, devido à alta relação q_l/q_{ires} e ao elevado tempo de processamento do simulador, o ciclo estabilizado de produção, assumindo-se a vazão do reservatório no primeiro ciclo como a vazão de produção do poço.

8.4. O método *Gas Lift* Contínuo

Além dos métodos intermitentes resolveu-se incluir também o método pneumático contínuo, dimensionado utilizando-se um simulador de fluxo multifásico comercial. Assim como nos métodos intermitentes, a vazão de líquido foi calculada variando-se a vazão de gás injetada e interrompendo-se os cálculos quando a vazão máxima de líquido era obtida. Manteve-se o ponto de injeção de gás a 1500 metros e utilizou-se, para o cálculo da pressão requerida, a correlação de Hagedorn e Brown. Mostra-se, na Figura 8.10, os valores de vazão de líquido e de gás obtidos para as características do poço base. Como a vazão máxima (44 m³/d) somente é obtida com um custo muito elevado de injeção de gás (25000 m³/d), utiliza-se, assim como nos métodos intermitentes, a equação (8.2) para o cálculo da vazão econômica de produção; por este critério obtém-se, para uma vazão de gás de injeção de 4128 m³/d, uma vazão de líquido de 36 m³/d (ponto econômico).

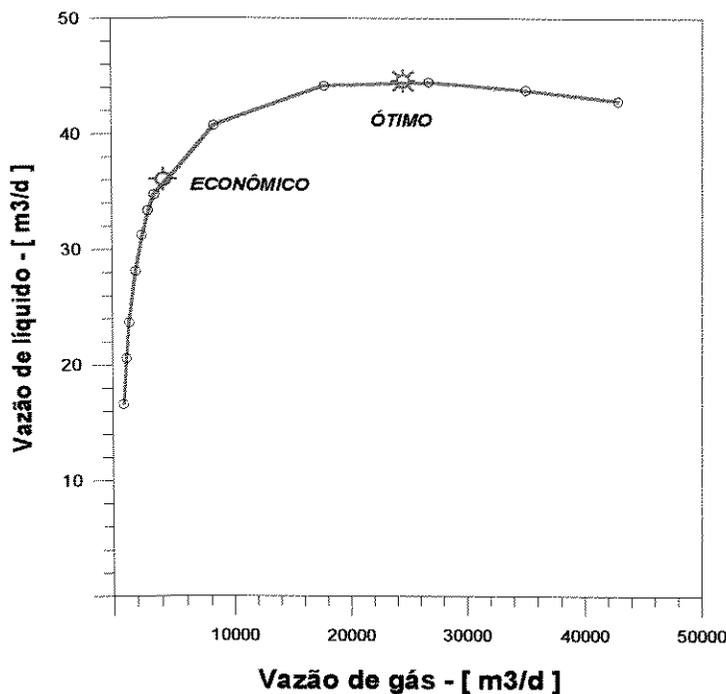


Figura 8-10 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás, para o método *Gas Lift* Contínuo - poço base ; PE = 85,2 kgf/cm² e IP = 1,00 m³/d/kgf/cm².

8.5. Definindo o método de elevação para o poço base.

Os métodos são comparados entre si sem outras considerações de ordem econômica que não seja o volume de gás injetado. Assim, definidas as vazões de produção mais econômicas para cada método os mesmos são comparados, e priorizados, com base no critério econômico definido pela equação (8.2). Mostra-se, na Tabela 8.6, a classificação dos métodos de elevação a serem instalados no poço base.

Tabela 8.6 - Classificação dos métodos intermitentes de elevação tendo como base o critério econômico - poço base ; IP = 1.0 m³/d/kgf/cm² e PE = 85.2 kgf/cm² (PePh = 60).

MÉTODO	ORDEM	L/H [%]	P _{to} /P _{vo} [%]	V _{gi} /V _{gr} [%]	q _l (m ³ /d)	q _g (m ³ /d)
Intermitente com Câmara	1	10	-	49	51,40	6892
Intermitente Convencional	2	30	70	50	48,21	6795
Intermitente com Pistão	3	30	60	60	48,10	7002
Contínuo	4	-	-	-	35,54	3870
Pig Lift	5	40	-	-	39,18	8371

Verifica-se que o método com melhor desempenho é o Intermitente com Câmara, seguido dos métodos Intermitente Convencional, Intermitente com Pistão, Contínuo e *Pig Lift*. Considerando-se, porém, que a vazão de equilíbrio nas instalações com câmara deve ser, provavelmente, um pouco menor que o valor calculado no primeiro ciclo (o que deve aproxima-la dos valores para os métodos convencional e com pistão) e que as vazões de gás são também muito próximas, pode-se dizer que os três métodos apresentam, praticamente, o mesmo desempenho. A definição do método passaria, portanto, por outras considerações, como por exemplo o menor custo de investimento, o que favoreceria a instalação tipo convencional, ou a presença de parafina, o que favoreceria as instalações com pistão ou mesmo o *Pig Lift*.

8.6. Análise tradicional

Até aqui as vazões de líquido, para os métodos convencional e com câmara, foram respectivamente calculadas com base no volume produzido no ciclo estabilizado e no volume alimentado pelo reservatório no primeiro ciclo. Qual seria, porém, a vazão de produção destes métodos, tomando-se por base o volume de líquido produzido na superfície no primeiro ciclo, como tradicionalmente realizado? Nestas condições observa-se, para o GLI, uma queda de aproximadamente $10 \text{ m}^3/\text{d}$ na vazão de produção - de 48,21 para 37,07, e, para o método GLIC, uma queda de aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{d}$ - de 51,40 para 46,14 (Tabela 8.7). Além disso observa-se, para o método GLI, que a relação L/H para o ponto mais econômico é igual a 0,50, mais próximo dos valores normalmente recomendados na literatura (Liao⁽⁸⁾). Adotando-se a vazão de produção com base no volume de líquido produzido na superfície a ordem de classificação se altera, conforme mostrado na Tabela 8.7 abaixo.

Tabela 8.7- Classificação dos métodos intermitentes de elevação tendo como base o critério econômico e o volume produzido na superfície no primeiro ciclo para o cálculo da vazão de produção - poço base ; $IP = 1.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e $PE = 85.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ($PePh = 60$).

MÉTODO	ORDEM	L/H [%]	P_{to}/P_{vo} [%]	V_{gi}/V_{gr} [%]	q_l (m^3/d)	q_g (m^3/d)
Intermitente com Pistão	1	30	60	58	48,10	7002
Intermitente com Câmara	2	14	-	70	46,14	7525
Contínuo	3	-	-	-	35,54	3870
Intermitente Convencional	4	50	70	41	37,07	4735
Pig Lift	5	40	-	-	39,18	8371

Considere-se ainda a influência da relação econômica adotada (Equação 8.1). Num sistema fechado esta relação pode ser, considerando-se apenas o custo de compressão do gás, da ordem de $14.000 : 1$; ou seja, de 14.000 m^3 de gás injetado para 1 m^3 de óleo. Com o intuito de comparar os métodos sem considerar a influência da relação econômica mostra-se, na Tabela 8.8, a ordem de classificação dos métodos baseando-se apenas na vazão máxima de produção, calculada com base no volume de líquido produzido na superfície no primeiro ciclo.

Tabela 8.8 - Classificação dos métodos intermitentes de elevação tendo como base o critério de vazão máxima calculada pelo volume produzido na superfície no primeiro ciclo - poço base, $IP = 1.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e $PE = 85.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ($PePh = 60$).

MÉTODO	ORDEM	L/H [%]	P_{to}/P_{vo} [%]	V_{gi}/V_{gr} [%]	q_l (m^3/d)	q_g (m^3/d)
Intermitente com Pistão	1	30	50	78	49,18	10517
Pig Lift	3	20	-	-	48,80	17481
Intermitente com Câmara	2	10	-	70	46,94	9449
Contínuo	4	-	-	-	44,58	24430
Intermitente Convencional	5	40	60	58	39,32	7754

Verifica-se, nestas condições, a influência determinante do *fall back* de líquido: os métodos intermitentes com *fall back* igual a zero, GLIP e PL, apresentam os maiores valores de vazão, enquanto que o GLI - método com maior *fall back* no primeiro ciclo, apresenta a menor vazão.

8.7. Estendendo a análise para outros valores de IP e PE

As análises até aqui efetuadas restringiram-se ao poço base, com um índice de produtividade de $1.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e uma pressão estática de $85,2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$. Com o objetivo de se ampliar a análise modificou-se a pressão estática (PE) e o índice de produtividade (IP) do poço base, efetuando-se a mesma análise anterior. Mostra-se, nas Tabelas de 8.9 a 8.12 - cada uma para um determinado índice de produtividade e diversos valores de pressão estática - a classificação dos métodos, tendo como base o critério econômico definido pela equação 8.2. Para o cálculo das vazões de produção dos métodos GLI e GLIC adota-se, como base, respectivamente o volume produzido no ciclo estabilizado e o volume alimentado pelo reservatório no primeiro ciclo. Tem-se em cada célula : o método de elevação, as vazões de líquido e gás, e o respectivo ponto operacional. Nos métodos GLI e GLIP o ponto operacional está na forma $\{L/H - P_{to}/P_{vo} - V_{gi}/V_{gr}\}$; no método GLIC na forma $\{L/H - V_{gi}/V_{gr}\}$ e no método PL na forma $\{L/H\}$. A seguir representa-se, nas Figuras 8.11 a 8.14, a vazão de líquido de cada método, em função da vazão de gás injetada, tendo como parâmetro a pressão estática.

Com base apenas nos números mostrados acima (Tabelas 8.9 - 8.12) pode-se concluir que o método intermitente com câmara é o método indicado para praticamente toda a faixa analisada; apenas para IP igual a 1,00 e PePh igual a 80 o método GLI mostra-se mais econômico. A depender das condições de reservatório, contudo, as diferenças nas vazões de líquido e gás entre os métodos é relativamente pequena, podendo ser desprezada. Por exemplo, para IP igual a 1,00 e PePh igual a 60, ou 80, a diferença entre as vazões é relativamente pequena entre os métodos GLI, GLIC e GLIP, indicando que qualquer um dos três métodos pode ser instalado no poço. A definição final passaria, portanto, pelas vantagens adicionais oferecidas por cada método. A instalação com câmara seria logo descartada, já que sua única vantagem é o ganho de líquido e/ou redução do gás injetado - relativamente pequenos. Se o poço for parafínico recomenda-se a utilização do método com pistão - o método tem como vantagem adicional o fato de desparafinar a coluna de produção; caso contrário, o método a ser instalado seria o método convencional - GLI.

Considerando-se estas particularidades construiu-se um mapa de seleção entre os métodos (Figura 8.15) partindo-se das seguintes premissas :

1. o método GLIC aplica-se preferencialmente apenas se a vazão de líquido for, no mínimo, 10 % maior que a vazão de líquido dos outros métodos ;
2. opta-se pelo GLI nos casos em que este método apresenta os mesmos resultados quando comparados com os demais.

Chama atenção as vazões de líquido, relativamente muito baixas, obtidas com o método *Gas Lift* Contínuo (GLC) para PePh igual a 20, indicando que este método realmente não se aplica para poços muito depletados. Ou seja, poços depletados (baixo PePh) devem ser equipados com algum tipo de método intermitente, principalmente se possuem alto IP.

IP = 0,25 m ³ /d/kgf/cm ²					
PePh	Classificação				
	1	2	3	4	5
20 (28,4)	GLIC 4,4 - 745 50 - 70	GLIP 3,1 - 670 50 - 60 - 70	GLC 1,2 - 369	PL 2,8 - 1200 70	GLI 2,2 - 965 60 - 70 - 41
40 (56,8)	GLIC 9,6 - 1435 20 - 60	GLIP 9,2 - 1765 30 - 60 - 70	PL 7,4 - 1750 60	GLI 8,6 - 2518 30 - 70 - 41	GLC 5,8 - 1150
60 (85,2)	GLIC 16,0 - 2391 10 - 49	GLIP 14,8 - 2509 30 - 60 - 70	GLI 14,0 - 2521 30 - 70 - 41	GLC 10,8 - 1082	PL 13,5 - 3031 40
80 (113,6)	GLIC 21,9 - 3107 10 - 60	GLIP 20,2 - 2736 30 - 60 - 58	GLI 19,4 - 2726 30 - 70 - 41	GLC 17,2 - 1722	PL 21,4 - 5400 25

Tabela 8.9 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ;
IP = 0,25 m³/d/kgf/cm².

Conteúdo da Célula

Método
q _l - q _g
L/H - P _{to} /P _{vo} - V _{gr} /V _{gr}

IP = 0,50 m ³ /d/kgf/cm ²					
PePh	Classificação				
	1	2	3	4	5
20 (28,4)	GLIC 7,1 - 1290 30 - 53	GLIP 5,8 - 1273 50 - 60 - 70	PL 5,5 - 2300 70	GLI 4,4 - 1750 60 - 70 - 41	GLC 1,6 - 486
40 (56,8)	GLIC 17,8 - 2634 20 - 60	GLIP 17,2 - 3303 30 - 60 - 70	GLI 14,8 - 3032 40 - 70 - 41	PL 13,7 - 3239 60	GLC 9,1 - 1221
60 (85,2)	GLIC 29,5 - 4215 10 - 49	GLIP 27,7 - 4708 30 - 60 - 70	GLI 25,9 - 4136 30 - 70 - 41	GLC 19,8 - 1983	PL 24,2 - 5326 40
80 (113,6)	GLIC 40,0 - 5447 10 - 60	GLIP 37,9 - 5122 30 - 60 - 58	GLI 36,8 - 4705 30 - 70 - 41	GLC 35,2 - 4282	PL 39,5 - 9603 25

Tabela 8.10 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ;
IP = 0,50 m³/d/kgf/cm².

Conteúdo da Célula

Método
q _l - q _g
L/H - P _{to} /P _{vo} - V _{gr} /V _{gr}

IP = 1,00 m ³ /d/kgf/cm ²					
PePh	Classificação				
	1	2	3	4	5
20 (28,4)	GLIC 13,5 - 2389 30 - 53	GLIP 10,6 - 2319 50 - 60 - 70	GLI 8,4 - 2500 60 - 70 - 50	PL 10,1 - 4248 70	GLC 2,0 - 588
40 (56,8)	GLIC 32,9 - 5272 20 - 70	GLIP 28,1 - 4491 40 - 70 - 70	GLI 27,6 - 4886 40 - 70 - 50	PL 23,9 - 5619 60	GLC 16,3 - 2472
60 (85,2)	GLIC 51,4 - 6891 10 - 49	GLI 48,0 - 6773 30 - 70 - 50	GLIP 48,1 - 7002 30 - 60 - 58	GLC 35,5 - 3870	PL 39,2 - 8371 40
80 (113,6)	GLIC 68,8 - 8804 10 - 60	GLI 67,9 - 8539 30 - 70 - 50	GLIP 67,3 - 9026 30 - 60 - 58	GLC 58,1 - 6165	PL 65,4 - 14764 25

Tabela 8.11 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ;
IP = 1,00 m³/d/kgf/cm².

Conteúdo da Célula

Método
$q_l - q_g$
$L/H - P_{to}/P_{vo} - V_{gl}/V_{gr}$

IP = 2,00 m ³ /d/kgf/cm ²					
PePh	Classificação				
	1	2	3	4	5
20 (28,4)	GLIC 24,6 - 4222 30 - 53	GLIP 17,9 - 3912 50 - 60 - 70	GLI 16,9 - 5312 40 - 60 - 58	PL 17,7 - 7366 70	GLC 2,2 - 663
40 (56,8)	GLIC 54,8 - 8578 20 - 70	GLIP 47,3 - 8347 40 - 60 - 70	GLI 42,5 - 6328 50 - 70 - 50	GLC 27,7 - 4739	PL 38,2 - 8812 60
60 (85,2)	GLIC 83,9 - 10252 10 - 49	GLI 80,0 - 11469 30 - 60 - 58	GLIP 70,5 - 10052 50 - 70 - 70	GLC 61,6 - 7175	PL 65,7 - 16142 30
80 (113,6)	GLI 106 - 9868 40 - 70 - 41	GLIC 109 - 12620 10 - 60	GLC 99 - 10275	GLIP 100 - 12812 40 - 65 - 60	PL -

Tabela 8.12 - Classificação dos métodos de elevação em função da pressão estática - poço base ;
IP = 2,00 m³/d/kgf/cm².

Conteúdo da Célula

Método
$q_l - q_g$
$L/H - P_{to}/P_{vo} - V_{gl}/V_{gr}$

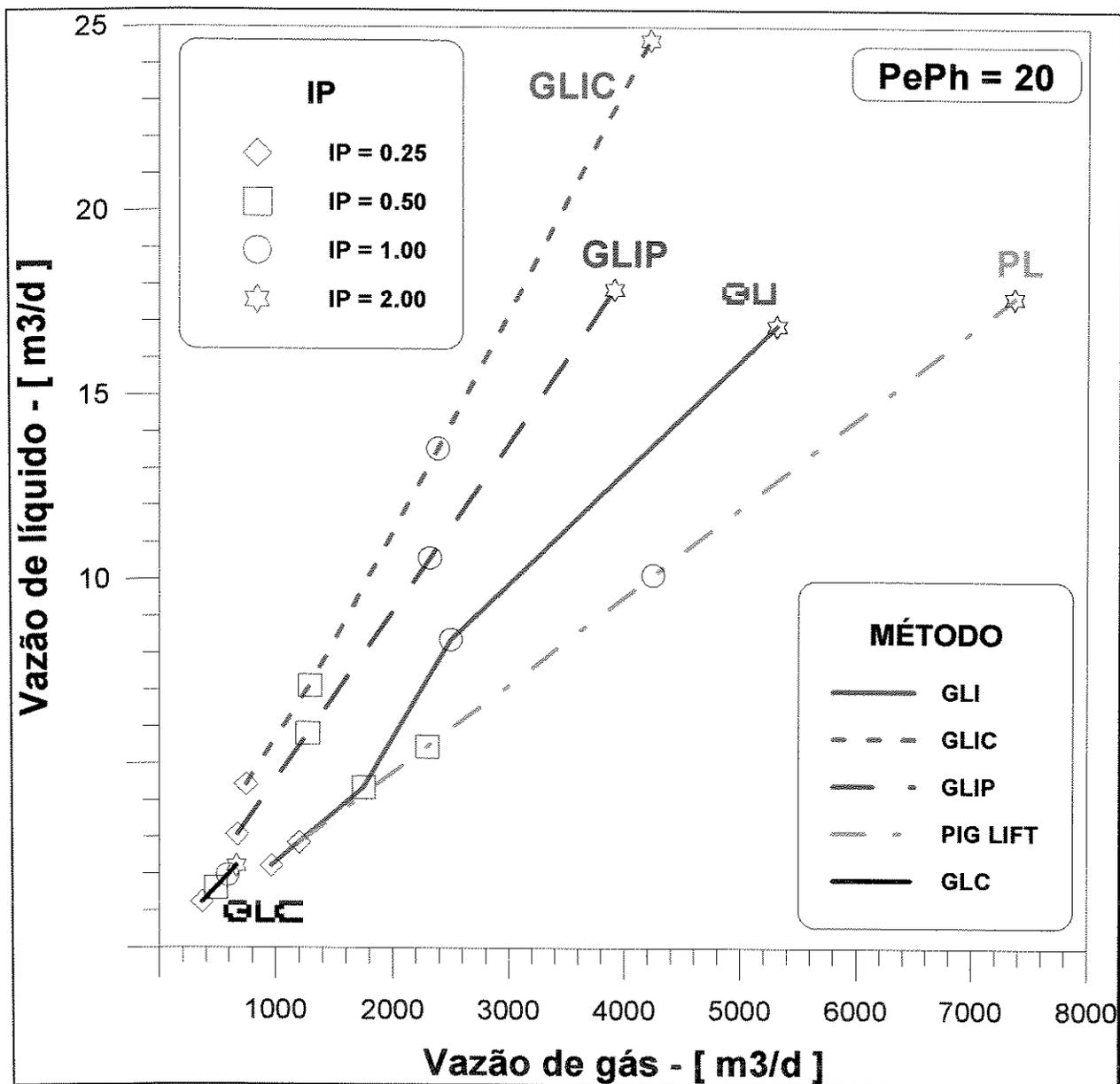


Figura 8-11 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 28,4 kgf/cm² (PePh = 20).

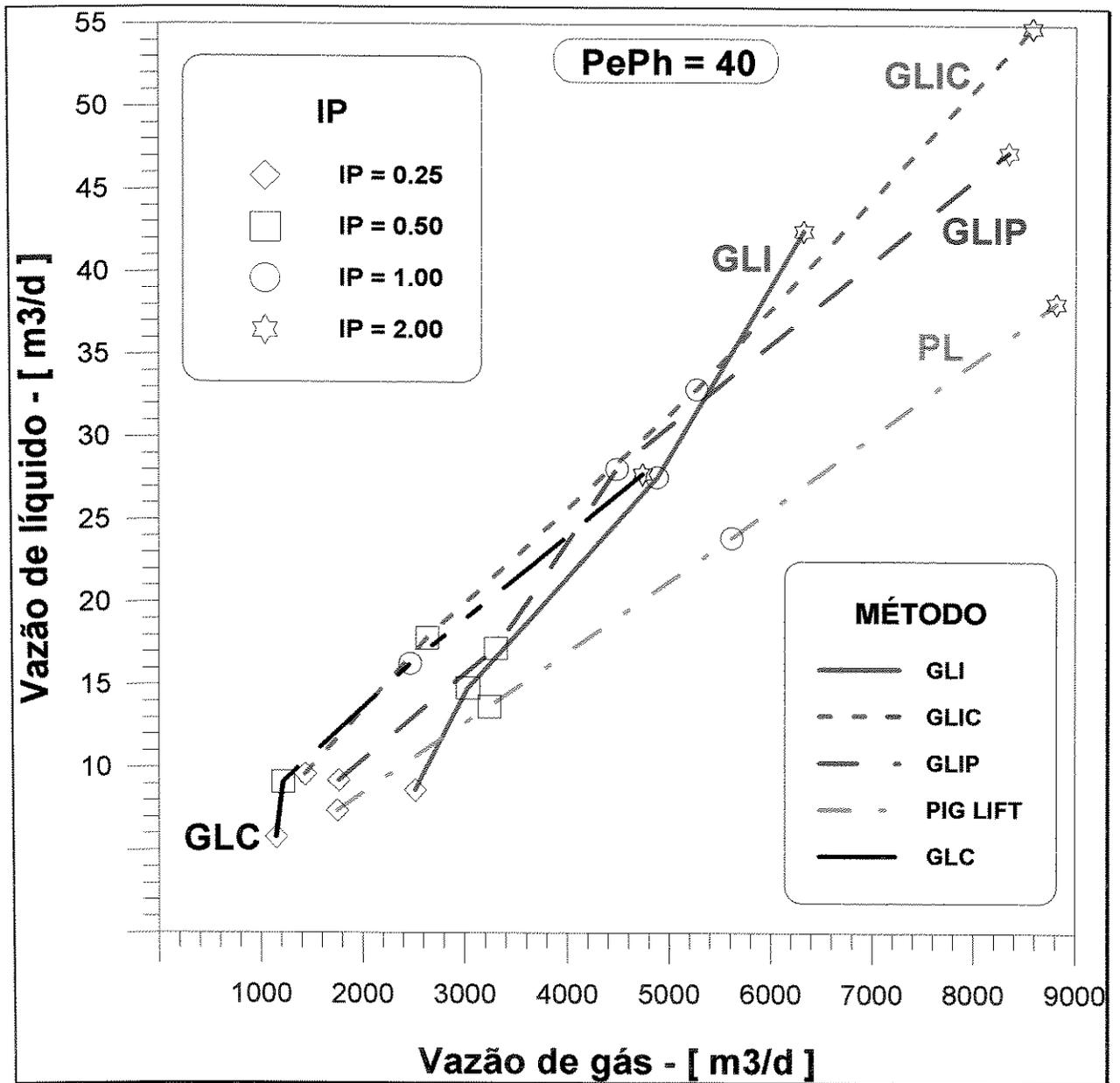


Figura 8-12 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 56,8 kgf/cm² (PePh = 40).

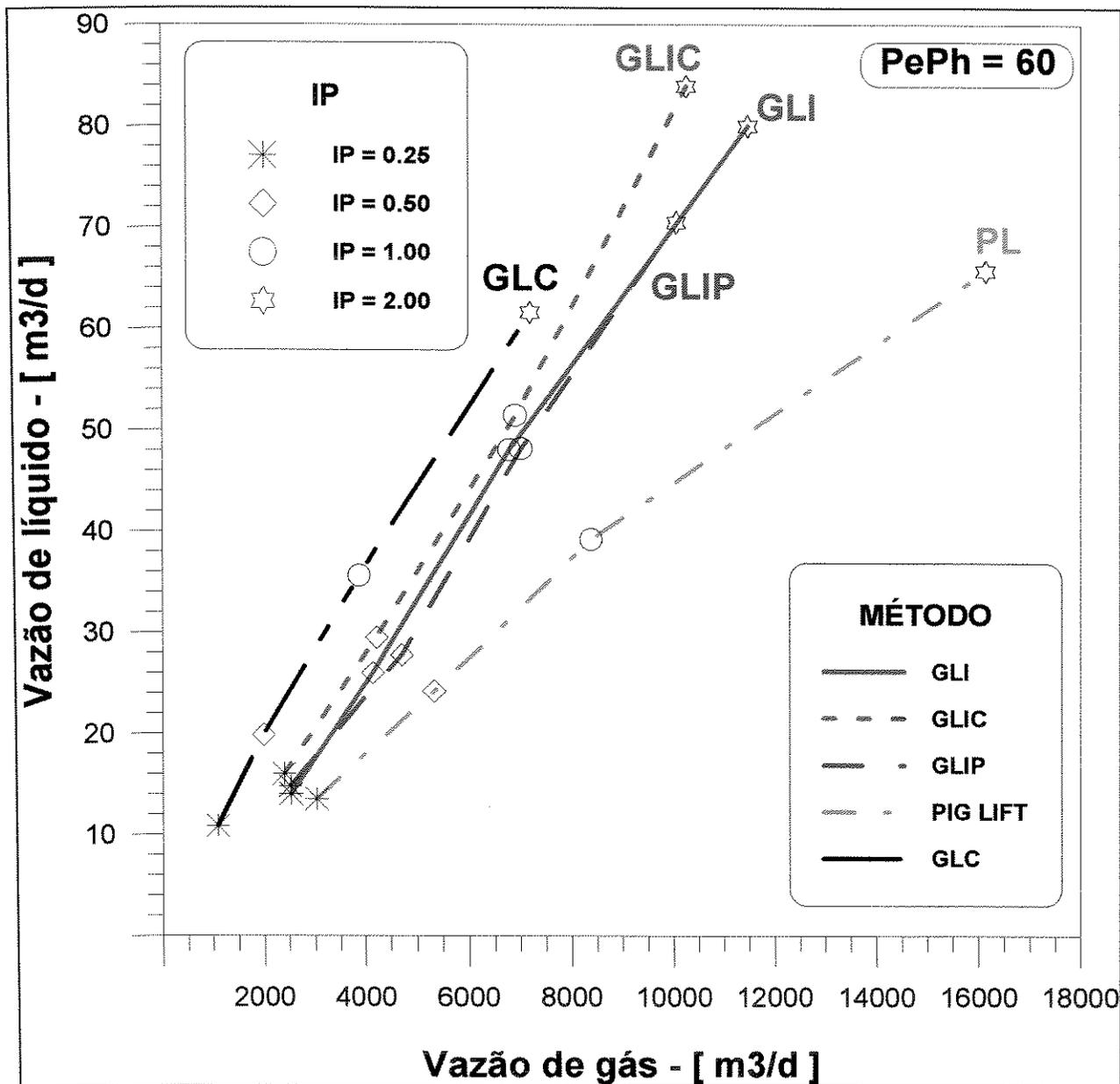


Figura 8-13 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 85,2 kgf/cm² (PePh = 60).

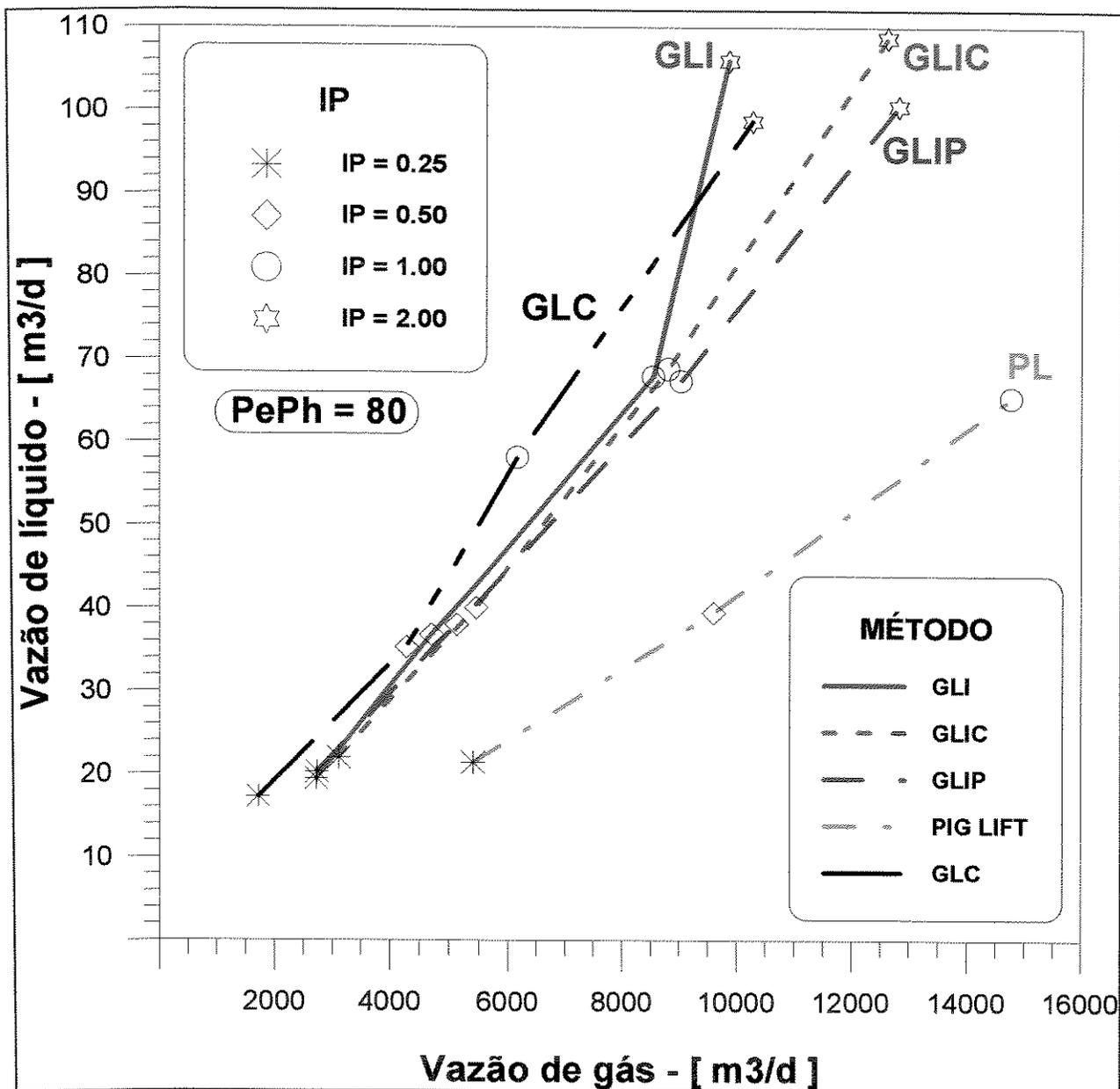


Figura 8-14 - Vazão de líquido, em função da vazão de gás injetada, para o poço base e pressão estática de 113.6 kgf/cm² (PePh = 80).

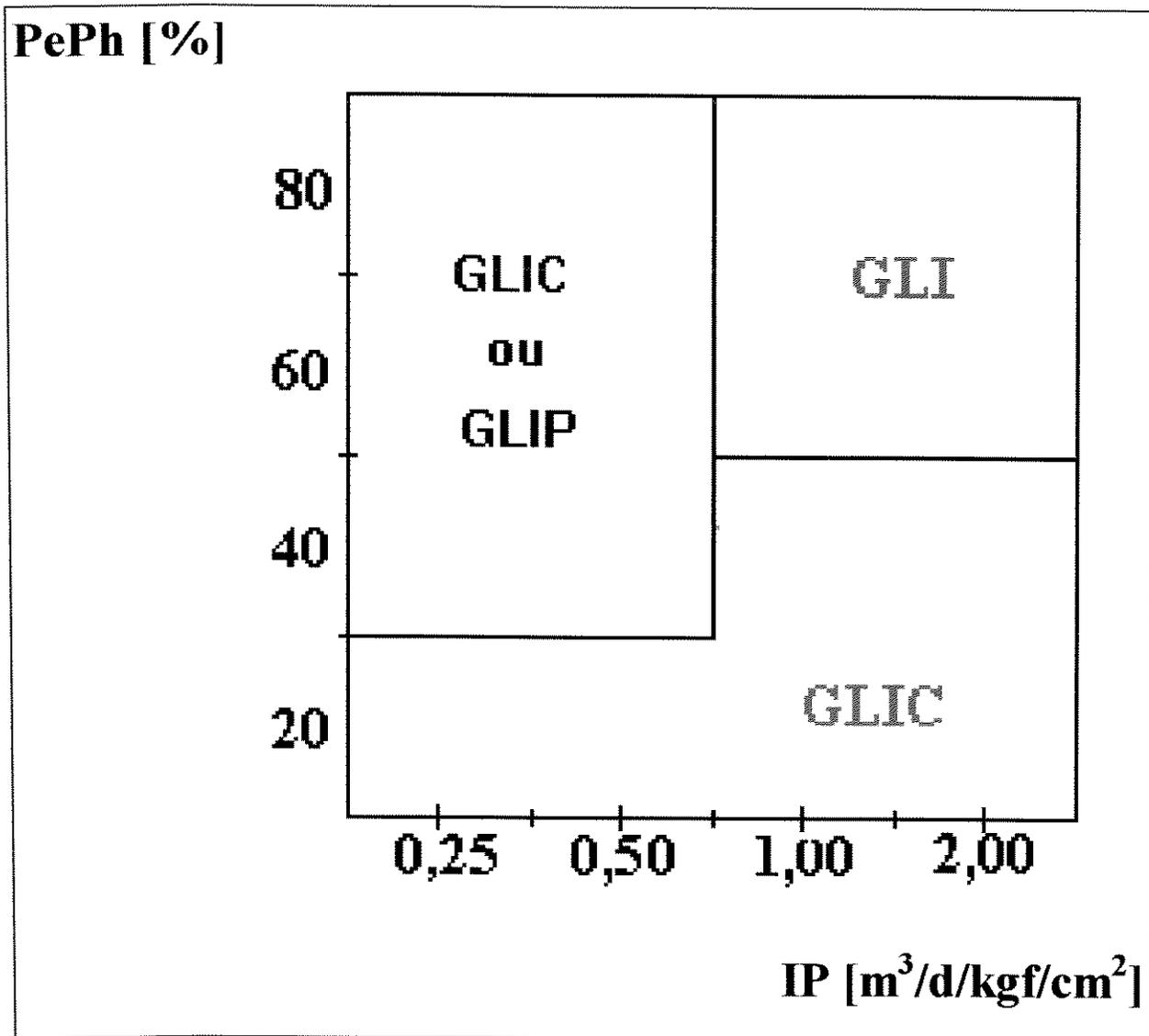


Figura 8 -15 - Mapa de seleção entre os métodos pneumáticos intermitentes para poços com características semelhantes ao poço base.

9. Conclusões e Recomendações

Quatro modelos matemáticos foram desenvolvidos, tendo como base o modelo mecanicista desenvolvido por Liao⁽⁸⁾, para os seguintes métodos pneumáticos de elevação artificial : *Gas Lift* Intermitente Convencional (GLI) , *Gas Lift* Intermitente com Pistão (GLIP), *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação (GLIC) e *Pig Lift* (PL).

Construídos a partir de um conjunto de sistemas de equações diferenciais ordinárias, desenvolvidos para cada estágio do ciclo de produção, os modelos consideram, a menos da linha de surgência, todos os demais componentes do sistema de produção : reservatório, coluna e revestimento de produção, válvula de *gas lift*, propriedades dos fluidos e controle da injeção de gás na superfície.

Simuladores computacionais, desenvolvidos com base nos modelos e a partir do software Mathematica, foram utilizados para analisar a influência dos principais parâmetros de projeto na produção diária do poço e obter, para um poço base, as vazões de líquido e gás para diversas condições operacionais.

A partir de um critério econômico estabelecido definiu-se a condição ótima de operação para cada método e, dentre os métodos, aquele mais econômico para o poço.

Um mapa indicativo de instalação foi então construído, para o poço base e diversos valores de índice de produtividade e pressão estática, classificando os métodos intermitentes pela ordem de prioridade para instalação no poço.

9.1. Conclusões

As conclusões a seguir relacionadas, comparativas entre os métodos, partem da premissa, teoricamente demonstrada neste trabalho, de que o volume produzido por ciclo nos métodos GLI e GLIC somente pode ser obtido, com precisão, com o ciclo estabilizado de produção. Apesar de resultados obtidos em alguns poços acenarem nesta direção, testes experimentais necessitam ser realizados. Até a realização destes testes, porém, esta premissa é adotada neste trabalho. Para poços com características semelhantes às do poço base aqui analisado pode-se concluir, portanto, com relação ao melhor método de elevação, que :

- o método com câmara de acumulação mostrou ser, para quase todos os pares (PE, IP) analisados, o método de elevação mais eficiente para o poço base, principalmente para os valores mais baixos da pressão estática ($PePh = 20$) e alto IP ($IP = 2,0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kg}/\text{cm}^2$). Apenas para IP igual a $2,0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kg}/\text{cm}^2$ e PE igual a $113.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($PePh = 80$) o método intermitente convencional mostrou-se mais eficiente ;
- para os valores mais baixos de IP - $0,25$ e $0,50 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kg}/\text{cm}^2$ - o método Gas Lift Intermitente com Pistão é, independente do valor da pressão estática, mais eficiente que o método Gas Lift Intermitente Convencional; porém para os valores mais altos de IP - $1,00$ e $2,00 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kg}/\text{cm}^2$, o método Gas Lift Intermitente com Pistão é mais eficiente que o método Gas Lift Intermitente Convencional somente para $PePh$ menor ou igual a 40% ;
- o método Pig Lift mostrou-se, na maioria dos casos, menos econômico que o método convencional. Apenas para os valores mais baixos de pressão estática e índice de produtividade - $PePh \leq 40$ e $IP \leq 0,50$ - este método mostrou ser mais eficiente que o método convencional . Deve-se acrescentar, contudo, que nas comparações realizadas não se buscou a otimização do volume de gás, como feito para os demais métodos, o que pode afetar os resultados.
- o método Gas lift Contínuo - mais sensível às variações na pressão estática do que no índice de produtividade do poço - é o método menos indicado para reservatórios com baixa pressão estática, ou seja, $PePh \leq 40$;

Numa análise por método pode-se concluir, para poços com características semelhantes às do poço base aqui analisado, que :

Método *Gas lift* Intermitente Convencional

- o impacto do *fall back* de líquido na produção do poço pode não ser tão adverso quanto apregoado em estudos anteriores - baseados todos em apenas um ciclo de produção, desde que parte do líquido deixado para trás como um filme de líquido provavelmente é incorporado, no ciclo seguinte, à golfada de líquido no estágio de elevação e produzido na superfície ;
- o volume produzido por ciclo somente pode ser obtido, com precisão, com o ciclo estabilizado de produção; ou seja, quando os volumes produzidos na superfície e alimentado pelo reservatório forem iguais no ciclo.
- o volume de líquido produzido na superfície em apenas um ciclo de produção, como reproduzido por Liao⁽⁸⁾ e por todos os experimentos anteriores, é diferente do volume de líquido alimentado pelo reservatório no mesmo ciclo e não é a melhor aproximação para o volume de líquido no ciclo estabilizado ; uma melhor aproximação é obtida com o volume de líquido alimentado pelo reservatório.
- o volume de líquido produzido na superfície na forma de golfada praticamente estabiliza-se após um volume de gás injetado maior que 65% do volume de gás de referência;
- o volume de líquido produzido na superfície por ciclo devido ao arraste de líquido do filme torna-se significativo apenas para um volume de gás acima de 80 % do volume de gás de referência ;
- existe, para cada condição operacional, uma vazão de gás injetada que maximiza a vazão de líquido ;
- sedes de maior diâmetro - 1" e 3/4" , apesar de produzirem um maior volume de líquido por ciclo , em relação às sedes de menor diâmetro - 1/4", 3/8" e 1/2" , podem resultar, em função da capacidade do espaço anular e da relação P_{to}/P_{vo} , em uma menor produção diária ; para o poço base uma sede de 1/2" mostrou ser mais eficiente ;

- quanto maior o comprimento da coluna inicial, para as mesmas condições de operação, menor o *fall back* de líquido ;
- quanto menor o comprimento da coluna de líquido inicial maior é a vazão diária de produção ;
- as maiores vazões diárias de líquido foram obtidas para uma relação entre as pressões no tubo e no revestimento, no instante de abertura da válvula de *gas lift*, igual a 0,70 ;
- o comprimento ótimo para a coluna de líquido inicial varia, considerando-se o critério econômico, de acordo com os valores de IP e PE. Para IP igual a $0.25 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ ($2.55 \text{ m}^3/\text{d}/\text{MPa}$) e PE igual a $28,4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (2.78 MPa) por exemplo, um valor igual a 60% da coluna estática é recomendável; já para o mesmo valor de IP e PE igual a $56,8 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (5.57 MPa) recomenda-se um percentual de apenas 30% ;

Método *Gas lift* Intermitente com Câmara de Acumulação

- o volume de líquido produzido na superfície na forma de golfada praticamente estabiliza-se após um volume de gás injetado maior que 90% do volume de gás de referência;
- o volume de líquido produzido via arraste de líquido do filme torna-se significativo apenas para um volume de gás injetado maior que o volume de gás de referência ;
- existe, para cada condição operacional, uma vazão de gás injetada que maximiza a vazão de líquido ;
- quanto maior o comprimento da coluna inicial, para as mesmas condições de operação, menor o *fall back* de líquido ;
- quanto menor o comprimento da coluna de líquido inicial maior é a vazão diária de produção ;
- o comprimento ótimo para a coluna de líquido inicial varia, considerando-se o critério econômico, de acordo com os valores de IP e PE. Para IP igual a $0.25 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ ($2.55 \text{ m}^3/\text{d}/\text{MPa}$) e PE igual a $28,4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (2.78 MPa) por exemplo, um valor igual a 50% da coluna estática é recomendável; já para o mesmo valor de IP e PE igual a $56,8 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (5.57 MPa) recomenda-se um percentual de apenas 20% ;

- sedes de grande diâmetro requerem um volume de gás de injeção muito elevado, inviabilizando sua utilização ; por isso, válvulas tipo piloto são mais indicadas neste tipo de instalação ;
- o fall back de líquido, mesmo para pequenos comprimentos de câmara, não é muito elevado ;

Método *Gas Lift* Intermitente com Pistão

- para as mesmas condições operacionais - mesmo V_{gi}/V_{gr} , L/H e P_{to}/P_{vo} - a velocidade média de subida da golfada é menor no método GLIP - em relação ao método GLI ;
- para as mesmas condições operacionais - mesmo V_{gi}/V_{gr} , L/H e P_{to}/P_{vo} - o número de ciclos no método intermitente com pistão é menor que no método intermitente convencional ;
- existe, para cada condição operacional, uma vazão de gás injetada que maximiza a vazão de líquido

Método *Pig Lift*

- quanto menor o comprimento da coluna de líquido inicial, maior é a vazão de líquido ;
- é, para um mesmo comprimento inicial de golfada, o método que apresenta o maior consumo de gás injetado ;
- existe, para cada condição operacional, uma vazão de gás injetada que maximiza a vazão de líquido ;

9.2. Recomendações

Recomenda-se :

9.2.1. com relação à melhoria dos modelos :

- no estágio de elevação da golfada, nos métodos GLI e GLIC, calcular a perda por atrito considerando-se a velocidade média da bolha de gás e não a velocidade do topo da bolha de gás ;
- considerar o *fall back* de líquido no método intermitente com pistão ;
- considerar, nos estágios de elevação e produção, a influência de líquido disperso no seio da bolha de gás ;
- modificar o modelo do GLI (e GLIC) de forma a fixar, para o segundo e demais ciclos, os tempos de ciclo e de injeção obtidos no primeiro ciclo ;
- substituir, nos modelos do GLI e GLIC, a equação que relaciona as velocidades do líquido e da bolha de gás (4.1.49) por uma equação derivada do balanço de momento no filme de líquido ;
- analisar o real efeito da velocidade de penetração da bolha de gás - parâmetro a - à luz do ciclo estabilizado de produção ;
- realizar testes experimentais com mais de um ciclo de produção.

9.2.2. Com relação à aplicação dos métodos

À luz dos resultados obtidos neste trabalho recomenda-se, como diretriz básica, que :

- poços com valores de pressão estática baixo ou médio ($PePh \leq 60$) devem, independente do valor do IP, ser equipados para produzir por intermitencia ; afirmativa válida principalmente para $PePh \leq 20$;

- poços com valores altos de pressão estática ($PePh \geq 80$) apresentam, para o range de IP analisado, uma diferença menos acentuada nas vazões de líquido e gás entre os métodos contínuo e intermitente. Neste caso deve-se analisar melhor, para cada caso, as duas alternativas para instalação do método de elevação - contínuo ou intermitente ;
- poços com valores muito baixos de pressão estática ($PePh \leq 20$) devem ser preferencialmente equipados com GLIC ;
- poços com valores médios ou altos de pressão estática ($PePh \geq 60$) e $IP \geq 1,0$ devem ser preferencialmente equipados com GLI ;
- nas demais faixas de operação os poços devem ser preferencialmente equipados com GLIC ou GLIP ;

Nomenclatura

Gas Lift Intermitente Convencional e com Pistão

- a : Coeficiente de velocidade da bolha de gás
- A_B : Área da bolha de gás, m^2
- A_f : Área da seção transversal do filme de líquido, m^2
- A_t : Área da seção transversal do tubo, m^2
- API : Densidade do óleo em grau API
- b : Velocidade da bolha de gás em uma coluna líquida estacionária, m/s
- BSW : Porcentagem de água no líquido produzido
- C_d : Coeficiente de descarga da válvula de *gas lift*
- C_v : Coeficiente de descarga da válvula motora
- D : Diâmetro do tubo, m
- d_o : Densidade do óleo morto (Água = 1)
- d_g : Densidade relativa do gás (Ar = 1)
- f_B : Fator de fricção da bolha de gás ;
- f_g : Fator de fricção do gás ;
- f_l : Fator de fricção do líquido ;
- g : Aceleração da gravidade, m/s^2
- h_B : Altura do topo da bolha de gás, m
- h_l : Altura do topo da golfada de líquido, m
- h_{lres} : Altura da coluna de líquido alimentado pelo reservatório, m
- h_p : Altura do pistão, m
- IP : Índice de produtividade, $m^3/s/Pa$
- L : Comprimento inicial da golfada de líquido, m
- M : Massa molecular do gás, kg/mol
- m_g : Massa de gás, kg
- m_{tc} : Massa de gás no espaço anular, kg
- \dot{m}_{gs} : Vazão mássica de gás na superfície, kg/s

- m_{gv} : Vazão mássica de gás pela válvula de *gas lift*, kg/s
 P_{c1} : Pressão do gás na superfície, Pa
 P_{c2} : Pressão do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 PE : Pressão estática, Pa
 $PePh$: Adimensional que relaciona a pressão estática à profundidade do poço.
 P_{inj} : Pressão do gás à montante da válvula motora, Pa
 P_{gt1} : Pressão no tubo - considerando apenas a coluna de gás - na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{pis} : Pressão devido ao peso do pistão, Pa
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{t2} : Pressão no tubo no topo da bolha de gás, Pa
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 P_{to} : Pressão no tubo no instante de abertura da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{tp} : Pressão de tubo de projeto, Pa
 P_{ts} : Pressão no tubo na superfície, Pa
 P_{vo} : Pressão de abertura da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{wf} : Pressão de fundo em fluxo, Pa
 q_f : Vazão do filme de líquido, m³/s
 q_{gs} : Vazão do gás de injeção na superfície, m³/s
 q_{gv} : Vazão de gás pela válvula de *gas lift*, m³/s
 q_{ls} : Vazão de líquido na superfície, m³/s
 q_{lres} : Vazão de líquido alimentado pelo reservatório, m³/s
 R : Constante universal dos gases, J.mol⁻¹.K⁻¹
 R_v : Relação entre a área da sede (A_p) e a área do fole (A_b) da válvula de *gas lift*.
 RGL : razão gás - líquido, m³/m³
 S_i : Área da superfície interna do filme de líquido, m²
 S_w : Área da superfície externa do filme de líquido, m²
 r : Raio do tubo, m
 T_B : Temperatura média na bolha de gás, K
 T_{c1} : Temperatura do gás na superfície, K
 T_{c2} : Temperatura do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, K
 T_{t1} : Temperatura do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, K

- T_{t2} : Temperatura no topo da coluna de gás, K
 T_{t3} : Temperatura no topo da coluna de líquido, K
 T_{tc} : Temperatura média do gás no espaço anular, K
 TC : Tempo de ciclo, s
 V_g : Volume ocupado pelo gás, m^3
 V_{gi} : Volume de gás injetado por ciclo, m^3
 V_{gr} : Volume de gás de referência, m^3
 V_{gv} : Volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift*, m^3
 V_{lini} : Volume inicial da golfada de líquido, m^3
 V_{tc} : Volume do espaço anular, m^3
 V_{ls} : Volume de líquido produzido na superfície, m^3
 v_B : Velocidade da bolha de gás, m/s
 v_f : Velocidade do filme de líquido, m/s
 v_g : Velocidade do gás, m/s
 v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
 v_{gt1} : Velocidade do gás na profundidade da válvula de *gas lift*, m/s
 v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s
 v_p : Velocidade do pistão, m/s
 v_{res} : Velocidade do líquido na entrada do tubo, m/s
 y : Espessura do filme de líquido, m
 z_{can} : Profundidade média dos canhoneados, m
 z_v : Profundidade da válvula de *gas lift*, m
 Z_B : Fator de compressibilidade médio na bolha de gás
 Z_{c1} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c1} e T_{c1}
 Z_{c2} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c2} e T_{c2}
 Z_{t1} : Fator de compressibilidade do gás a P_{t1} e T_{t1}
 Z_{tc} : Fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular
 ρ_B : Massa específica da bolha de gás, kg/m^3
 ρ_{c1} : Massa específica do gás a P_{c1} e T_{c1} , kg/m^3
 ρ_{c2} : Massa específica do gás a P_{c2} e T_{c2} , kg/m^3
 ρ_l : Massa específica do líquido, kg/m^3
 ρ_g : Massa específica do gás, kg/m^3

- ρ_{gcp} : Massa específica do gás na condição padrão - 101,3 kPa e 15,56 °C, kg/m³
 ρ_{gs} : Massa específica do gás a P_{ts} e T_{ts} , kg/m³
 ρ_{gt1} : Massa específica do gás a P_{gt1} e T_{t1} , kg/m³
 τ_i : Tensão superficial na parede interna do filme de líquido, Pa
 τ_w : Tensão superficial na parede externa do filme de líquido, Pa
 μ_l : Viscosidade do líquido, Pa.s

Gas Lift Intermitente com Câmara de Acumulação

- A_{an} : Área da seção transversal do espaço anular, m²
 D_{an} : Diâmetro do espaço anular da câmara, m
 h_{lc} : Altura da coluna de líquido no espaço anular da câmara, m
 h_{lt} : Altura do topo da coluna de líquido no tubo, m
 LC : Comprimento da câmara de acumulação, m
 P_{c3} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{c4} : Pressão do gás, no espaço anular da câmara, no topo da coluna de líquido, Pa
 P_{c5} : Pressão no espaço anular da câmara na profundidade do tubo perfurado, Pa
 P_{t1} : Pressão no tubo na profundidade do tubo perfurado, Pa
 P_{t3} : Pressão no tubo no topo da golfada de líquido, Pa
 P_{tp} : Pressão de tubo de projeto, Pa
 q_{cl} : Vazão de líquido do espaço anular da câmara para o tubo, m³/s
 rtc : Relação entre as áreas do espaço anular e do tubo
 T_{c3} : Temperatura do gás, no espaço anular da câmara, à jusante da válvula de *gas lift*, K
 T_{c4} : Temperatura do gás, no anular da câmara, no topo da coluna de líquido, K
 T_{t1} : Temperatura do gás na profundidade do tubo perfurado, K
 v_{lc} : Velocidade do líquido no espaço anular da câmara, m/s
 v_{lt} : Velocidade do líquido no tubo, m/s
 v_{lres} : Velocidade do líquido na entrada do tubo, m/s
 z_p : Profundidade do tubo perfurado, m
 Z_{c3} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c3} e T_{c3}
 Z_{c4} : Fator de compressibilidade do gás a P_{c4} e T_{c4}
 ρ_{gc} : Massa específica do gás no espaço anular da câmara, kg/m³

Pig Lift

- h_e : Altura da espuma, m
- h_{ires} : Altura da coluna de líquido alimentado pelo reservatório, m
- m_{gti} : Massa de gás na coluna de injeção, kg
- m_{gtp} : Massa de gás na coluna de produção, kg
- P_{gt1} : Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, considerando apenas a coluna de gás, Pa
- P_{c1} : Pressão do gás, na coluna de injeção, na superfície, Pa
- P_{c2} : Pressão do gás, na coluna de injeção, no topo da coluna de líquido, Pa
- P_{t1} : Pressão na extremidade das colunas de injeção e produção, Pa
- P_{t2} : Pressão na coluna de produção no topo da bolha de gás, Pa
- P_{t3} : Pressão na coluna de produção no topo da golfada de líquido, Pa
- q_{lip} : Vazão de líquido da coluna de injeção para a coluna de produção, m^3/s
- V_g : Volume total ocupado pelo gás, m^3
- V_{gti} : Volume ocupado pelo gás na coluna de injeção, m^3
- V_{gtp} : Volume ocupado pelo gás na coluna de produção, m^3
- v_e : Velocidade da espuma, m/s
- v_g : Velocidade do gás, m/s
- v_{gc1} : Velocidade do gás à jusante do *bean* de injeção, m/s
- v_{gs} : Velocidade do gás na superfície, m/s
- v_l : Velocidade da golfada de líquido, m/s
- v_{ires} : Velocidade do líquido na entrada do tubo, m/s
- Z_p : Profundidade da extremidade das colunas de injeção e de produção, m
- ρ_{gti} : Massa específica do gás na coluna de injeção, kg/m^3
- ρ_{gtp} : Massa específica do gás na coluna de produção, kg/m^3

Bibliografia

- [1] Veloso, N.: "Elevação Pneumática - Gas Lift", PETROBRÁS.
- [2] Chacín, J.E.: "Selection of Optimun Intermittent Lift Scheme for Gas Lift Wells", SPE paper 27986, 1994.
- [3] Brown, K.E. e Jessen, F.W.: "Evaluation of Valve Port Size, Surface Chokes and Fluid Fall-Back in Intermittent Gas Lift Installation", JPT (Março 1962) 315-22; Trans., AIME, 225.
- [4] White, G.W. et al.: "An Analytical Concept of The Static and Dynamic Parameters of Intermittent Gas Lift", JPT (Março 1963) 301-08; Trans., AIME, 228.
- [5] Brill, J.P., Doerr, T.C. e Brown, K.E.: "An Analytical Description of Liquid Slug Flow in Small Diameter Vertical Conduits", JPT (Março 1967) 419-32; Trans., AIME, 240.
- [6] Neely, A.B., Montgomery, J.W. e Vogel, J.W.: "A Field Test and Analytical Study of Intermittent Gas Lift", Soc. Pet. Eng. J. (Outubro 1994) 502-12; Trans., AIME, 257.
- [7] Machado, R.T.H.: "Modelagem e Simulação Numérica do Mecanismo de Gas Lift Intermitente", Tese de Mestrado, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 1988.
- [8] Liao, T.: "Mechanistic Modeling of Intermittent Gas Lift", PhD dissertation, University of Tulsa, 1991.
- [9] White, G.W.: "Combine Gas Lift - Plunger to Increase Production Rate", World Oil, (Novembro 1982) 69-76.
- [10] Mower, L.N., Lea, J.F., Beauregard, E., e Ferguson, P.L.: "Defining the Characteristics and Perfomance of Gas Lift Plungers", SPE paper 14344, 1985.
- [11] Chacín, J., Schmidt, Z. e Doty, D.: "Modeling and Optimization of Plunger Assisted Intermittent Gas Lift Installations", SPE paper 23683, 1992.
- [12] Brown, K., et al.: "Unique Chamber Gas Lift Perfomance", Published by Otis Engineering Corporation.
- [13] Winkler, H. e Camp, G.: "Down-Hole Chambers Increase Gas-Lift Efficiency", The Petroleum Engineer, Junho e Agosto, 1956.
- [14] Berdeja, V. e Mariaco, J.: "Análisis de Las Instalaciones de Bombeo Neumatico con Camaras de Acumulacion en el Campo Camiri", YPF, Outubro, 1971.
- [15] Acevedo, C. e Cordero, O.: "Chamber Lift : Updating Technology and Putting it to Work", 5th UNITAR Conference, Caracas, 1991.

- [16] Lima, P. , Cardoso,M.: “Método de Produção com Interfaces Mecânicas”, PETROBRÁS/CENPES, Rio de Janeiro, 1993.
- [17] Lima, P.C.R.: “Pig Lift : A New Artificial Lift Method”, SPE paper 36598, 1996.
- [18] Rosina, L.: “A Study of Plunger Lift Dynamics”, Tese de Mestrado, The University of Tulsa, 1983.
- [19] Baruzzi, J. O. A. : “Modelagem do Plunger Lift Convencional”, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- [20] Santos, O.G.: “Válvulas Piloto”, I Seminário de Novas Tecnologias da Região de Produção da Bahia, Setembro de 1993.
- [21] Bird, R. B., Stewart, W.E., and Lighfoot, E. N.: Transport Phenomena, John Wiley & Sons Inc. (New York City) (1960).

Apêndice A

VAZÃO DO FILME DE LÍQUIDO PARA O FUNDO DO POÇO

(Estágios : Descompressão - fase 3 e Alimentação)

Utiliza-se a análise de Bird ⁽²¹⁾ para a queda de um filme de líquido de pequena espessura.

Hipóteses :

- regime permanente $\Rightarrow \sum F = 0$ (A.1)

- fluxo laminar $\Rightarrow \tau_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr}$ (A.2)

onde,

μ_l : viscosidade do líquido, Pa.s

v_z : velocidade do líquido na direção z, m/s

Forças atuantes no sistema :

viscosas : $\tau_{rz} 2\pi r L|_r - \tau_{rz} 2\pi r L|_{r+\Delta r}$ (A.3)

gravidade : $2\pi r \Delta r L \rho g$ (A.4)

pressão : $(P_o - P_L) 2\pi r \Delta r$ (A.5)

onde,

τ_{rz} : tensão superficial na direção r devido ao fluxo na direção z, Pa

L : comprimento do filme de líquido, m

P_o : pressão no topo da área cilíndrica do filme, Pa

P_L : pressão na base da área cilíndrica do filme, Pa

Portanto a resultante das forças atuando no filme de líquido é dada por :

$$\sum F = \tau_{rz} 2\pi r L|_r - \tau_{rz} 2\pi r L|_{r+\Delta r} + 2\pi r \Delta r L \rho_l g + (P_o - P_L) 2\pi r \Delta r \quad (\text{A.6})$$

Dividindo (A.6) por $2\pi r L \Delta r$ e rearranjando-se a equação tem-se :

$$\frac{\tau_{rz} r|_{r+\Delta r} - \tau_{rz} r|_r}{\Delta r} = r \rho_l g + (P_o - P_L) \frac{r}{L} \quad (\text{A.7})$$

No limite, ou seja, para $\Delta r \rightarrow 0$, tem-se :

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \left(\frac{P_o - P_L}{L} + \rho_l g \right) r \quad (\text{A.8})$$

Definindo-se $\Phi = P - \rho_l g z$ tem-se, respectivamente para $z = 0$ e $z = L$:

$$\Phi_o = P_o \quad (\text{A.9})$$

$$\Phi_L = P_L - \rho_l g L \quad (\text{A.10})$$

Substituindo-se (A.9) e (A.10) em (A.8) tem-se :

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \frac{\Phi_o - \Phi_L}{L} r \quad (\text{A.11})$$

Integrando-se (A.11) :

$$\tau_{rz} = \frac{\Phi_o - \Phi_L}{L} \frac{r}{2} + \frac{C_1}{r} \quad (\text{A.12})$$

Para $r = R_o$ (raio interno do filme de líquido) tem-se que $\tau_{rz} = 0$. Logo :

$$C_1 = -\frac{\Phi_o - \Phi_L}{2L} R_o^2 \quad (\text{A.13})$$

Substituindo-se (A.13) em (A.12) tem-se :

$$\tau_{rz} = \frac{\Phi_o - \Phi_L}{2L} \left(r - \frac{R_o^2}{r} \right) \quad (\text{A.14})$$

Substituindo-se (A.2) em (A.14), já que se admite o fluxo como laminar, tem-se :

$$dv_z = \frac{\Phi_L - \Phi_o}{2L} \left(r - \frac{R_o^2}{r} \right) dr \quad (\text{A.15})$$

Integrando-se (A.15) obtém-se, para a velocidade v_z :

$$v_z = \frac{\Phi_L - \Phi_o}{2\mu L} \left(\frac{r^2}{2} - R_o^2 \ln r \right) + C_2 \quad (\text{A.16})$$

Tem-se, para $r = R$ (raio interno da tubulação), que $v_z = 0$. Portanto :

$$C_2 = -\frac{\Phi_L - \Phi_o}{2\mu L} \left(\frac{R_o^2}{2} - R_o^2 \ln R \right) \quad (\text{A.17})$$

Substituindo-se (A.17) em (A.16) tem-se :

$$v_z = \frac{\Phi_L - \Phi_o}{2\mu L} \left(\frac{r^2}{2} - R_o^2 \ln r - \frac{R^2}{2} + R_o^2 \ln R \right) \quad (\text{A.18})$$

Rearranjando-se (A.18) obtém-se :

$$v_z = \frac{\Phi_o - \Phi_L}{2\mu L} \frac{R^2}{2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 2 \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 (\ln r - \ln R) \right] \quad (\text{A.19})$$

Define-se a como a relação entre o raio do filme de líquido e o raio interno da tubulação, ou seja :

$$a = \frac{R_o}{R} \quad (\text{A.20})$$

Obtém-se a equação final para a velocidade do filme de líquido substituindo-se (A.20) em (A.19) :

$$v_z = \frac{(\Phi_O - \Phi_L) R^2}{4 \mu L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 2a^2 \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] \quad (\text{A.21})$$

A vazão do filme de líquido é dada por :

$$q = \int v_z dA \quad (\text{A.22})$$

Substituindo-se (A.21) em (A.22) e integrando obtém-se, para a vazão do filme de líquido :

$$q = \frac{(\Phi_O - \Phi_L) \pi R^4}{8 \mu L} [1 - 4a^2 + 3a^2 - 4a^4 \ln a] \quad (\text{A.23})$$

Definindo-se

$$\varepsilon = 1 - a \quad (\text{A.24})$$

e expandindo-se $\ln a$ em uma série de Taylor, até 3ª ordem

$$\ln a = \ln(1 - \varepsilon) = -\varepsilon - \frac{\varepsilon^2}{2} - \frac{\varepsilon^3}{3} \quad (\text{A.25})$$

Substituindo-se (A.24) e (A.25) na equação (A.23) tem-se :

$$q = \frac{16 B \varepsilon^3}{3} - \frac{19 B \varepsilon^4}{3} + 4 B \varepsilon^5 - \frac{10 B \varepsilon^6}{3} + \frac{4 B \varepsilon^7}{3} \quad (\text{A.26})$$

onde,

$$B = \frac{(\Phi_O - \Phi_L) \pi R^4}{8 \mu L} \quad (\text{A.27})$$

Desprezando-se na equação (A.26) os termos com ordem maior que ε^3 , e substituindo-se no resultado a equação (A.27), tem-se que :

$$q = \frac{2\pi (\Phi_O - \Phi_L) R^4 \varepsilon^3}{3 \mu L} \quad (\text{A.28})$$

Substituindo-se (A.9) e (A.10) em (A.28) obtém-se :

$$q = \frac{2\pi}{3 \mu} \left(\frac{P_o - P_L}{L} + \rho_l g \right) R^4 \varepsilon^3 \quad (\text{A.29})$$

Por definição,

$$y = \varepsilon R \quad (\text{A.30})$$

Obtém-se a equação final para a vazão do filme de líquido desprezando-se o termo $\frac{P_o - P_L}{L}$ e substituindo-se (A.30) em (A.29).

$$q = \frac{\rho_l g 2\pi R y^3}{3 \mu} \quad (\text{A.31})$$

Apêndice B

COMPONENTE DE FRICÇÃO NUMA SEÇÃO ANULAR

Demonstra-se que a componente de fricção numa seção anular - segundo termo do segundo membro da equação (B.1) - pode ser definida utilizando-se a equação de Darcy-Weisbach para a queda de pressão na coluna de líquido no anular.

Tem-se, para a resultante das forças atuantes no líquido no espaço anular, que :

$$\sum F = 144 g_c A_{an} (P_{c4} - P_{c5}) - (\tau_{wr} S_r h_{lc} + \tau_{wt} S_t h_{lc}) + \rho_l g h_{lc} A_{an}, \quad (\text{B.1})$$

sendo,

$$S_r = 2 \pi r_i \quad (\text{B.2})$$

$$S_t = 2 \pi r_e \quad (\text{B.3})$$

$$\tau_{wr} = \tau_{wt} = \frac{1}{8} f_l \rho_l v_{lc}^2 \quad (\text{B.4})$$

onde,

h_{lc} : altura da coluna de líquido no espaço anular da câmara, m

f_l : fator de fricção do líquido

r_i : raio interno do revestimento de produção, m

r_e : raio externo da coluna de produção, m

S_r : área da superfície interna do revestimento de produção, m²

S_t : área da superfície externa da coluna de produção, m²

v_{lc} : velocidade do líquido no espaço anular da câmara, m/s

ρ_l : massa específica do líquido, kg/m³

τ_{wr} : tensão superficial na parede interna do revestimento de produção, Pa

τ_{wt} : tensão superficial na parede externa da coluna de produção, Pa

Substituindo-se as equações (B.2), (B.3) e (B.4) no segundo termo do segundo membro da equação (B.1) obtém-se :

$$\begin{aligned}\tau_{wr} S_r h_{lc} + \tau_{wt} S_t h_{lc} &= \frac{1}{8} f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} 2\pi (r_e + r_i) \\ &= \frac{1}{8} f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} 2\pi (r_e + r_i) \frac{A_{an}}{A_{an}}\end{aligned}\quad (\text{B.5})$$

Substituindo-se em (B.5) a área do anular, abaixo definida :

$$\begin{aligned}A_{an} &= \pi (r_i^2 - r_e^2) \\ &= \pi (r_i + r_e) (r_i - r_e)\end{aligned}\quad (\text{B.6})$$

tem-se,

$$\begin{aligned}\tau_{wr} S_r h_{lc} + \tau_{wt} S_t h_{lc} &= \frac{1}{8} f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} 2\pi (r_e + r_i) \frac{A_{an}}{\pi (r_i + r_e) (r_i - r_e)} \\ &= \frac{1}{4} \frac{f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} A_{an}}{(r_i - r_e)}\end{aligned}\quad (\text{B.7})$$

Tem-se, por definição, que o diâmetro hidráulico do anular é igual a :

$$d_{an} = 2 (r_i - r_e) \quad (\text{B.8})$$

Substituindo-se (B.8) em (B.7) obtém-se a formulação final para a componente de fricção do líquido no espaço anular da câmara :

$$\tau_{wr} S_r h_{lc} + \tau_{wt} S_t h_{lc} = \frac{f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} A_{an}}{2 d_{an}} \quad (\text{B.9})$$

A equação (B.9) é a equação de Darcy-Weisbach para o espaço anular coluna revestimento de produção. Substituindo-se (B.8) em (B.1) obtém-se a equação final para a resultante das forças no espaço anular.

$$\sum F = 144 g_c A_{an} (P_{c4} - P_{c5}) - \frac{f_l \rho_l v_{lc}^2 h_{lc} A_{an}}{2 d_{an}} + \rho_l g h_{lc} A_{an} \quad (\text{B.10})$$

Apêndice C

RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DE GÁS NECESSÁRIO PARA ABRIR A VÁLVULA DE GAS LIFT E O VOLUME DE GÁS DE REFERÊNCIA

1. Para os métodos *Gas Lift* Intermitente Convencional e *Gas Lift* Intermitente com Pistão

Da equação de estado para os gases reais e da definição do volume de gás de referência tem-se que :

$$m_{gr} = \frac{1}{2} (P_{vo} + P_{to}) \frac{V_t M}{Z R T} \quad (C.1)$$

onde

m_{gr} : massa de gás de referência, kg

P_{to} : pressão de tubo no instante de abertura da válvula de *gas lift*, Pa

P_{vo} : pressão de abertura da válvula de *gas lift*, Pa

V_t : volume do tubo, m³

Com as válvulas de *gas lift* e motora fechadas a massa inicial de gás no espaço anular - m_1 - é dada por :

$$m_1 = \frac{\bar{P}_1 V_{an} M}{Z_1 R T_1} \quad (C.2)$$

e :

$$\bar{P}_1 = 0.5 (P_{sc} + P_{bt}) \quad (C.3)$$

onde,

\bar{P}_1 : pressão média no espaço anular no instante de abertura da válvula motora, Pa

P_{sc} : pressão de fechamento da válvula de *gas lift* medida na superfície, Pa

P_{bt} : pressão no domo da válvula de *gas lift* na profundidade de operação, Pa
 V_{an} : volume do espaço anular, m³

Após a abertura da válvula motora, e imediatamente antes da válvula de *gas lift* abrir, a massa de gás no espaço anular - m_2 - é dada por :

$$m_2 = \frac{\bar{P}_2 V_{an} M}{\bar{Z}_2 R \bar{T}_2} \quad (\text{C.4})$$

e :

$$\bar{P}_2 = 0.5(P_{so} + P_{vo}) \quad (\text{C.5})$$

onde :

\bar{P}_2 : pressão média no espaço anular no instante de abertura da válvula de *gas lift*, Pa
 P_{so} : pressão de abertura da válvula de *gas lift* medida na superfície, Pa

A diferença entre m_2 e m_1 , que resulta na massa de gás injetada em cada ciclo, é, portanto:

$$m_2 - m_1 = \left(\frac{\bar{P}_2}{\bar{Z}_2} - \frac{\bar{P}_1}{\bar{Z}_1} \right) \frac{M V_{an}}{R \bar{T}} \quad (\text{C.6})$$

Admitindo-se que os fatores de compressibilidade são iguais, ou seja, $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}$, a equação (C.6) fica :

$$m_{gv} = m_2 - m_1 = \left(\bar{P}_2 - \bar{P}_1 \right) \frac{M V_{an}}{R \bar{Z} \bar{T}} \quad (\text{C.7})$$

Subtraindo-se (C.3) de (C.5) tem-se :

$$\begin{aligned} \bar{P}_2 - \bar{P}_1 &= 0.5 (P_{vo} + P_{so} - P_{sc} - P_{bt}) \\ &= 0.5 \left[(P_{vo} - P_{bt}) + (P_{so} - P_{sc}) \right] \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

Admitindo-se iguais as diferenças entre as pressões de abertura e de fechamento no fundo e na superfície tem-se que :

$$\bar{P}_2 - \bar{P}_1 = P_{vo} - P_{bt} \quad (\text{C.9})$$

Substituindo-se (C.9) em (C.7) obtém-se equação para a massa de gás necessária para abrir a válvula de *gas lift* :

$$m_{gv} = \frac{M V_{an}}{Z R T} (P_{vo} - P_{bt}) \quad (\text{C.10})$$

A pressão de abertura da válvula de *gas lift* (P_{vo}) é dada por :

$$P_{vo} = \frac{P_{bt}}{1 - R_v} - P_{to} \frac{R_v}{1 - R_v} \quad (\text{C.11})$$

que após alguns rearranjos fornece :

$$P_{vo} - P_{bt} = R_v (P_{vo} - P_{to}) \quad (\text{C.12})$$

Obtém-se a equação final para a massa de gás necessária para abrir a válvula de *gas lift* substituindo-se (C.12) em (C.10) :

$$m_{gv} = P_{vo} R_v \left(1 - \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) \frac{M V_{an}}{Z R T} \quad (\text{C.13})$$

A relação entre o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* e o volume de gás de referência é obtida dividindo-se a equação (C.13) pela equação (C.1) :

$$\frac{m_{gv}}{m_{gr}} = 2 R_v \frac{\left(1 - \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) V_{an}}{\left(1 + \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) V_i} \quad (\text{C.14})$$

Ou, em termos de vazão volumétrica e considerando-se que $V_{an} = A_{an} z_v$ e $V_t = A_t z_v$

$$\frac{V_{gv}}{V_{gr}} = 2 R_v \frac{\left(1 - \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) A_{an}}{\left(1 + \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) A_t} \quad (\text{C.15})$$

2. Para o método *Gas Lift* Intermitente com Câmara de Acumulação

Continua valendo, para a massa de gás necessária para abrir a válvula de *gas lift*, a equação (C.13). A equação para o cálculo do volume de gás de referência - (C.1) - é, porém, modificada ; isto porque nas instalações com câmara de acumulação a pressão de tubo de projeto - P_{tp} - não é igual à pressão P_{to} - pressão de tubo na profundidade da válvula de *gas lift* no instante de sua abertura. A equação (C.1), modificada para as instalações com câmara passa a ser igual a :

$$m_{gr} = \frac{1}{2} (P_{vo} + P_{tp}) \frac{V_t M}{Z R T} \quad (\text{C.16})$$

Portanto a relação entre o volume de gás necessário para abrir a válvula de *gas lift* e o volume de gás de referência é igual a :

$$\frac{m_{gv}}{m_{gr}} = 2 R_v \frac{\left(1 - \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) V_{an}}{\left(1 + \frac{P_{tp}}{P_{vo}}\right) V_t} \quad (\text{C.17})$$

Ou, em termos de vazão volumétrica e considerando-se que $V_{an} = A_{an} (z_v - lc)$ e $V_t = A_t z_p$

$$\frac{V_{gv}}{V_{gr}} = 2 R_v \frac{\left(1 - \frac{P_{to}}{P_{vo}}\right) A_{an} z_p - lc}{\left(1 + \frac{P_{tp}}{P_{vo}}\right) A_t z_p} \quad (\text{C.18})$$

Apêndice D

PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS PARA O ESTÁGIO DE DESCOMPRESSÃO DO MÉTODO PIG LIFT.

Procedimento Operacional de Descompressão 1 - POD1

Este procedimento é semelhante àqueles adotados nos demais métodos de elevação - apenas a coluna de produção é utilizada para descompressão. Quando o topo da golfada chega à superfície fecha-se a válvula motora, cortando-se a injeção de gás para a coluna de injeção ; mantém-se aberta, na superfície, apenas a coluna de produção.

Procedimento Operacional de Descompressão 2 - POD2

Neste procedimento as duas colunas - injeção e produção - são mantidas abertas, ou seja, diretamente ligadas ao separador, durante o estágio de descompressão. Os passos abaixo explicam melhor o procedimento.

- quando a pressão na superfície atinge, durante o estágio de produção da golfada, a faixa de 13,0 a 15,0 kgf/cm², a válvula motora é fechada, cortando-se a injeção de gás para o poço ;
- cerca de 2,0 minutos após o fechamento da válvula motora comunica-se a coluna de injeção, na superfície, com o separador ; a partir deste instante as duas colunas - injeção e produção - ficam diretamente ligadas ao separador.

Apêndice E

PRESSÃO DE UMA COLUNA ESTÁTICA DE GÁS

O diferencial de pressão dP devido à hidrostática num elemento de altura dh (Fig. E.1) é igual a:

$$dP = -\rho \cdot g \cdot dh \quad (\text{E.1})$$

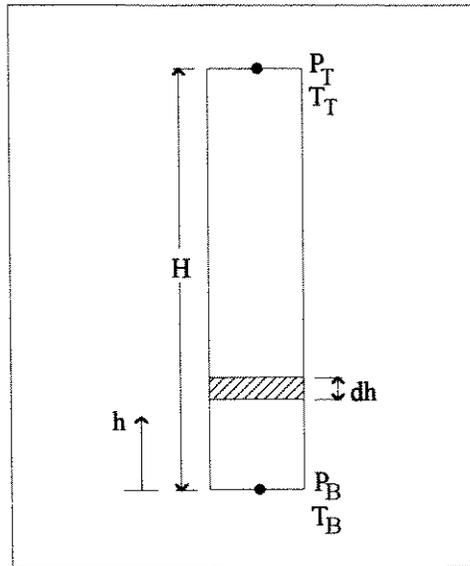


Figura E.1 - Esquema para o cálculo da pressão de uma coluna estática de gás.

Pela equação de estado, a massa específica do gás é igual a:

$$\rho = \frac{P \cdot PM}{Z \cdot R \cdot T} \quad (\text{E.2})$$

e a Eq. E.1 torna-se:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{PM \cdot g}{Z \cdot R \cdot T} \cdot dh \quad (\text{E.3})$$

Considerando propriedades médias constantes e integrando:

$$\ln \frac{P_B}{P_T} = \frac{PM \cdot g \cdot H}{\bar{Z} \cdot R \cdot \bar{T}} \quad (\text{E.4})$$

e, finalmente,

$$P_B = P_T \cdot e^{\left[\frac{PM \cdot g \cdot H}{\bar{Z} \cdot R \cdot \bar{T}} \right]} \quad (\text{E.5})$$

onde:

$$\bar{Z} = f\left(\frac{\bar{P}}{P_{pc}}, \frac{\bar{T}}{T_{pc}}\right) \quad (\text{E.6})$$

$$\bar{P} = \frac{P_T + P_B}{2} \quad (\text{E.7})$$

$$\bar{T} = \frac{T_T + T_B}{2} \quad (\text{E.8})$$

Apêndice F

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS

F.1 - Fator de compressibilidade Z

Adotado o método de Dranchuk, Purvis e Robinson, *apud* Ikoku, C. U., "Natural Gas Production Engineering", John Wiley & Sons, 1984, pp. 46:

$$Z = 1 + \left(A_1 + \frac{A_2}{T_r} + \frac{A_3}{T_r^3} \right) \cdot \rho_r + \left(A_4 + \frac{A_5}{T_r} \right) \cdot \rho_r^2 + \frac{A_5 \cdot A_6 \cdot \rho_r^5}{T_r} + \frac{A_7 \cdot \rho_r^2}{T_r^3} \cdot [1 + A_8 \cdot \rho_r^2] \cdot e^{-A_8 \cdot \rho_r^2} \quad (\text{F.1})$$

onde:

$$\rho_r = \frac{0,27 \cdot P_r}{Z \cdot T_r} \quad (\text{F.2})$$

$$A_1 = 0,31506237 \quad (\text{F.3})$$

$$A_2 = -1,04670990 \quad (\text{F.4})$$

$$A_3 = -0,57832729 \quad (\text{F.5})$$

$$A_4 = 0,53530771 \quad (\text{F.6})$$

$$A_5 = -0,61232032 \quad (\text{F.7})$$

$$A_6 = -0,10488813 \quad (\text{F.8})$$

$$A_7 = 0,68157001 \quad (\text{F.9})$$

$$A_8 = 0,68446549 \quad (\text{F.10})$$

F.2 - Fator de atrito de Darcy-Weisbach

Utilizada a rotina de Sommerfeld, J. T., "Equation for Fluid Friction Factor", Hydrocarbon Processing, julho 1967, Vol. 46, N°. 7, que para o regime turbulento é a solução por Newton-Raphson da equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right) \quad , \text{Re} > 2100 \quad (\text{F.11})$$

e para o regime laminar é

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad , \text{Re} \leq 2100 \quad (\text{F.12})$$

F.4 - Viscosidade do óleo

Adotada viscosidade do óleo morto através da correlação de Beal, *apud* Standing, M. B., "Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems", Society of Petroleum Engineers of AIME, 1977, pp. 125:

$$\mu_{oD} = \left(0,32 + \frac{1,8 \cdot 10^7}{\text{API}^{4,53}} \right) \cdot \left(\frac{360}{T + 200} \right)^a \quad (\text{F.13})$$

onde:

$$a = 10^{\left(0,43 + \frac{8,33}{\text{API}} \right)} \quad (\text{F.14})$$

μ_{oD} : em centipoise

T: em °F

F.5 - Viscosidade da água

Adotada a expressão que aproxima as curvas de Van Wingen, *apud* Brill, J. P. e Beggs, H. D., "Two-Phase Flow in Pipes", pp. 2.54:

$$\mu_w = e^{(1,003 - 1,479 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,982 \cdot 10^{-5} \cdot T^2)} \quad (\text{F.15})$$

onde,

μ_w : em centipoise

T: em °F

F.6 - Viscosidade da mistura óleo - água

A viscosidade da mistura óleo - água foi calculada ponderando-se as viscosidades do óleo morto e da água pela fração de água:

$$\mu_t = \mu_{oD} \cdot (1 - FW) + \mu_w \cdot FW \quad (F.16)$$

F.7 - Viscosidade do gás

Utilizada a correlação de Lee *et al.*, apud Brill, J. P. e Beggs, H. D., "Two-Phase Flow in Pipes", pp. 2.60:

$$\mu_g = K \cdot 10^{-4} \cdot e^{X \cdot \rho_g^y} \quad (F.17)$$

onde:

$$K = \frac{(9,4 + 0,02 \cdot PM) \cdot T^{1,5}}{209 + 19 \cdot PM + T} \quad (F.18)$$

$$X = 3,5 + \frac{986}{T} + 0,01 \cdot PM \quad (F.19)$$

$$y = 2,4 - 0,2 \cdot X \quad (F.20)$$

PM: em g/mol

T: em °R

ρ_g : em g/cm³

μ_g : em centipoise

F.9 - Gradiente geotérmico

Adotado gradiente geotérmico de 3,099 °C/100 m, e temperatura na superfície de 27 °C.