

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Elevação a Gás Intermitente Com Etapas Acopladas – Estudo da Modelagem do Simulador “S.E.A”

AUTORES:

Roberton Nelson Sobolewski Filho

Gustavo Leonardo Costa

Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo

INSTITUIÇÃO:

DEP - FEM - UNICAMP

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Elevação a Gás Intermitente com Etapas Acopladas – Estudo da Modelagem do Simulador “S.E.A.”

Abstract

The intermittent gas lift (IGL) is an artificial lift method, used onshore by petroleum producers, mainly for depleted reservoirs. This method requires an adequate gas supply at high pressure and low cost. Few studies were conducted concerning the computational modeling for the Conventional Intermittent Gas Lift (IGL); one of these was the mathematical approach presented in 2004 by Carvalho Filho and Bordalo, which allowed the investigation of the IGL's potentialities. The purpose of the present work is to analyze the modeling of the Conventional IGL, using the simulator built by Carvalho and Bordalo. This analysis is based on the study of the results and the interpretation of simplified models. In the simplified modeling, it was analyzed how the parameters of modeling interfere in each stage of production cycle. Another study analyzes the parameters of the equations using dimensionless variables. The results will be used as a basis for the interpretation of the data that will be obtained by experiments with reduced scale, currently being set up in the laboratory.

Keywords: Gas Lift Simulator, Petroleum Production, Intermittent Gas Lift

1.Introdução

A elevação a Gás Intermitente Convencional (GLI) é um método de elevação artificial de petróleo empregado pela indústria em aplicações terrestres, principalmente em campos maduros, onde os reservatórios se encontram muito depletados ou a produtividade dos poços é baixa de forma a não justificar a utilização de métodos de maior capacidade de produção (Santos, 1997). O GLI requer um suprimento adequado de gás a alta pressão e a um baixo custo. O esquema simplificado de uma instalação típica de GLI em um poço vertical é vista na Figura 1 (a).

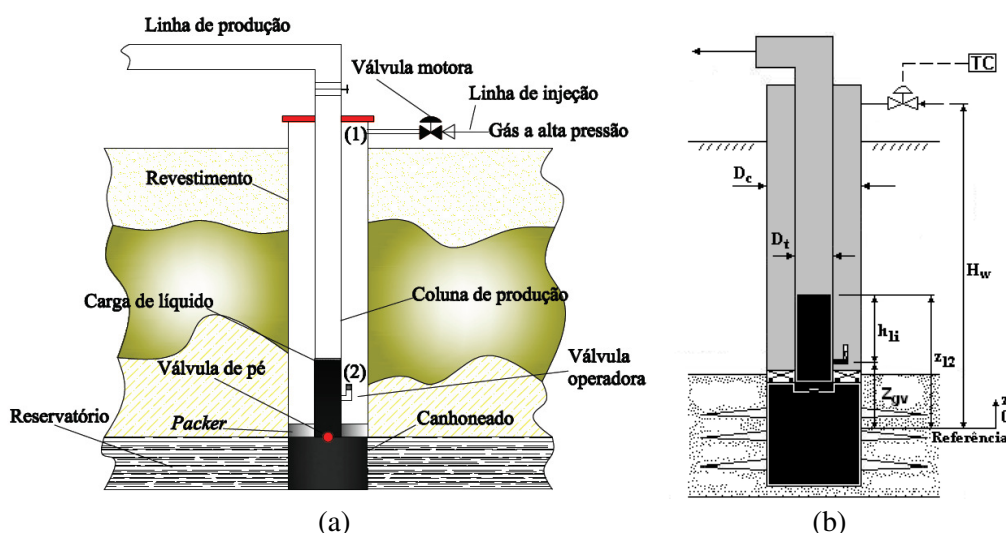


Figura 1. (a) Instalação típica de GLI convencional em um poço vertical; (b) Principais parâmetros geométricos do poço com GLI.

A escolha do método de GLI se baseia no índice de produtividade (IP), pressão estática do reservatório (P_R), e de outros parâmetros do poço (Chacin, 1994). A injeção de gás a alta pressão, no espaço anular entre a coluna e o revestimento, é feita de modo intermitente (operação cíclica) através

da válvula motora temporizada, na qual são ajustados os tempos de injeção (tempo em que a válvula motora permanece aberta à passagem de gás rumo ao espaço anular) e tempos de ciclo (corresponde ao tempo decorrido entre duas aberturas consecutivas da válvula motora.). A válvula operadora abre-se a uma certa pressão; neste momento o poço já contém uma carga de líquido dentro da coluna de produção alimentada pelo reservatório. O gás eleva uma certa quantidade de líquido, deixando para trás um filme de líquido (*fallback*). Em algum momento, a válvula motora é fechada. O líquido é levado até a superfície, e após o fechamento da válvula operadora ocorre a etapa de descompressão do gás. Na etapa final, a pressão do reservatório realimenta o poço, reiniciando o sistema para o próximo ciclo. O poço equipado com GLI é capaz de produzir de modo economicamente viável, em uma certa faixa de vazões.

Os modelos de GLI propostos na literatura dividem-se em semi-empíricos e mecanicistas. Dentre os modelos semi-empíricos, destacam-se: Brown e Jessen (1962), Brill *et. al* (1967) e Neely *et. al* (1973), que fizeram trabalhos experimentais em instalações específicas. Dentre os modelos mecanicistas do GLI destacam-se: Liao (1991), que desenvolveu um modelo contemplando todos os estágios do ciclo de produção e apresentando boa concordância com dados experimentais; Santos (1997), que estendeu o modelo proposto por Liao (1991) para quatro variantes do GLI (Convencional, com Pistão, com Câmara de Acumulação e *Pig Lift*); Carvalho (2004), cujo modelo, mais completo até o momento, e no qual este trabalho se baseia, estendeu a abordagem proposta por Santos (1997) para o GLI convencional e invertido, levando em consideração o acoplamento das etapas do GLI, resolvendo o sistema simultâneo de equações diferenciais e algébricas, que representa o funcionamento do GLI.

2. Metodologia

No presente trabalho, analisou-se até o momento, apenas as etapas de injeção e de alimentação de forma independente, apesar de o GLI ser composto por cinco etapas interdependentes (Carvalho Filho, 2004). Através da inspeção das equações que regem estas etapas foi proposta uma adimensionalização das respectivas etapas, bem como uma modelagem simplificada.

2.1. Etapa de injeção

Na etapa de injeção, gás à alta pressão é injetado no topo do espaço anular (ponto 1 da Figura 1 (a)) através da válvula motora. Considerou-se a válvula operadora (ponto 2 da Figura 1 (a)) fechada. O balanço de massa fornece:

$$V_c \frac{d\bar{\rho}_c}{dt} - \dot{m}_{gi} = 0 \quad (1)$$

onde, V_c = volume do espaço anular, $\dot{m}_{gi}$ = vazão mássica através da válvula motora e $\bar{\rho}_c$ = densidade média do gás no espaço anular.

Considerando que a distribuição de pressão com a profundidade é devida principalmente ao peso da coluna de gás e à sua compressibilidade (desprezando a energia cinética e as dissipações viscosas), a pressão no fundo do espaço anular, P_{c2} é relacionada com a pressão no topo do espaço anular, P_{c1} , conforme a Equação 2 (Carvalho Filho, 2004):

$$P_{c2} = P_{c1} \exp \left(\frac{Mg}{Z_c RT_c} (H_w - z_{gv}) \right) \quad (2)$$

onde, M = massa molar do gás, $\bar{Z}_c$ = fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular, $\bar{R}$ = constante universal dos gases ($\bar{R} = 8314 \text{ J/kmol.K}$), $\bar{T}_c$ = temperatura média do gás no anular, H_w = profundidade do poço e z_{gv} = altura da válvula operadora.

Os parâmetros adimensionais propostos foram:

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_{gsc}}, t^* = \frac{t q_{gi,m\acute{a}x}}{V_c}, P^* = \frac{P}{P_{gi}}, \dot{m}_{gi}^* = \frac{\dot{m}_{gi}}{\rho_{gsc} q_{gi,m\acute{a}x}} \quad (3)$$

onde, ρ = densidade, ρ^* = densidade adimensional, ρ_{gsc} = densidade do gás na condição padrão, t = tempo, t^* = tempo adimensional, P = pressão, P^* = pressão adimensional, P_{gi} = pressão de injeção de gás no compressor, $\dot{m}_{gi}^*$ = vazão mássica adimensional através da válvula motora, $q_{gi,m\acute{a}x}$ é a vazão volumétrica padrão máxima permitida pela válvula motora. A vazão mássica através da válvula motora é obtida com a Equação 4 (Santos, 1997):

$$\dot{m}_{gi} = \rho_{gsc} q_{gi} = \rho_{gsc} \frac{1,5136 \times 10^{-6} C_v P_{gi}}{\sqrt{d_g T_{sup}}} \sqrt{\frac{P_{c1}}{P_{gi}} - \left(\frac{P_{c1}}{P_{gi}} \right)^2} \quad (4)$$

onde, C_v = coeficiente de descarga da válvula motora ($C_v = 8,5$) e d_g = densidade do gás.

$$q_{gi,m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \left(\frac{1,5136 \times 10^{-6} C_v P_{gi}}{\sqrt{d_g T_{sup}}} \right) \quad (5)$$

2.2. Etapa de alimentação

Durante a etapa de alimentação, a válvula de pé está aberta, permitindo que o fluido do reservatório preencha a coluna de produção, formando uma carga de líquido. Considerou-se que a válvula operadora está fechada.

$$\rho_L A_t \frac{dz_{l2}}{dt} - \dot{m}_{LR} = 0 \quad (6)$$

A vazão mássica de líquido alimentada pelo reservatório, $\dot{m}_{LR}$, é calculada em função da diferença de pressão existente entre o fundo do poço e o reservatório, e o índice de produtividade do poço:

$$\dot{m}_{LR} = \rho_L IP (P_R - P_{wf}) \quad (7)$$

$$P_{wf} = P_{wh} + \rho_L g z_{l2} \quad (8)$$

onde, ρ_L = densidade, A_t = área transversal da coluna de produção, z_{l2} = altura do topo de líquido alimentado na coluna de produção, IP = índice de produtividade, P_R = pressão estática do reservatório, P_{wf} = pressão no fundo do poço, P_{wh} = pressão na cabeça do poço e g = aceleração da gravidade.

Para a elaboração da adimensionalização foram definidos a altura de equilíbrio ($h_{m\acute{a}x}$) e o tempo padrão (t_p):

$$h_{m\acute{a}x} = \frac{P_R - P_{atm}}{\rho_L g}, t_p = \frac{A_t}{\rho_L g IP} \quad (9)$$

Os parâmetros adimensionais propostos foram:

$$z^* = \frac{z_{l2}}{h_{máx}}, t^* = \frac{t}{t_p}, P^* = \frac{P}{P_R} \quad (10)$$

onde: z^* = altura de líquido alimentado adimensional, t^* = tempo adimensional e P^* = pressão adimensional. Note-se que a carga de líquido para elevação será $h_{li} = z_{l2} - z_{gv}$.

2.3. Modelo simplificado

2.3.1. Etapa de injeção

Considerou-se que a pressão do gás não varia com a profundidade do poço: $P_c = P_{c1} = P_{c2}$. Combinando as Equações 1 e 4, e supondo comportamento de gás ideal, obtêm-se:

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{\rho_{gsc} \overline{RT}_c}{V_c M} \frac{1,5136 \times 10^{-6} C_v P_{gi}}{\sqrt{d_g T_{sup}}} \sqrt{\frac{P_c}{P_{gi}} - \left(\frac{P_c}{P_{gi}}\right)^2} \quad (11)$$

Para o comportamento de gás real, considera-se o fator de compressibilidade, Z_c .

$$\frac{dP_c}{dt} = Z_c \frac{\rho_{gsc} \overline{RT}_c}{V_c M} \frac{1,5136 \times 10^{-6} C_v P_{gi}}{\sqrt{d_g T_{sup}}} \sqrt{\frac{P_c}{P_{gi}} - \left(\frac{P_c}{P_{gi}}\right)^2} \quad (12)$$

3. Resultados e Discussão

3.1. Etapa de injeção

Para as análises realizadas neste trabalho utilizaram-se nove simulações, nas quais se variaram a profundidade do poço (H_w) e o diâmetro da coluna de produção (D_l). Conforme mostrado na Tabela 1. Os parâmetros comuns do poço nas nove simulações foram: diâmetro do revestimento $D_c = 139,7$ mm ($5\frac{1}{2}$ in), óleo de 40° API com 50% de água em volume, injeção de gás com $d_g = 0,7$ e uma pressão de injeção $P_{gi} = 6,86$ MPa. Os fluidos são elevados contra uma pressão na cabeça do poço $P_{wh} = 686,5$ kPa. O líquido apresenta uma carga inicial de líquido $h_{li} = 420$ m. As características do reservatório foram: IP = 10 m³/d.MPa e uma pressão estática $P_R = 8,36$ MPa. Uma válvula de pé está localizada no fundo da coluna de produção. A válvula operadora de fole carregado com gás nitrogênio foi posicionada a 25 m acima da válvula de pé, com uma pressão no domo $P_d = 5,5$ MPa. A geometria da válvula operadora é representada pela razão entre as áreas da sede e do fole $R = 0,26$ e diâmetro da sede $d_s = 12,7$ mm ($1/2$ in). O tempo de injeção foi de 50 s e o tempo de ciclo foi de 1600 s.

Tabela 1 – Casos simulados para a etapa de injeção.

Diâmetro da coluna de produção - D_l (mm)	Profundidade do poço - H_w (m)		
	1250	1500	1750
80,3	Caso 11	Caso 12	Caso 13
60,3	Caso 21	Caso 22	Caso 23
40,3	Caso 31	Caso 32	Caso 33

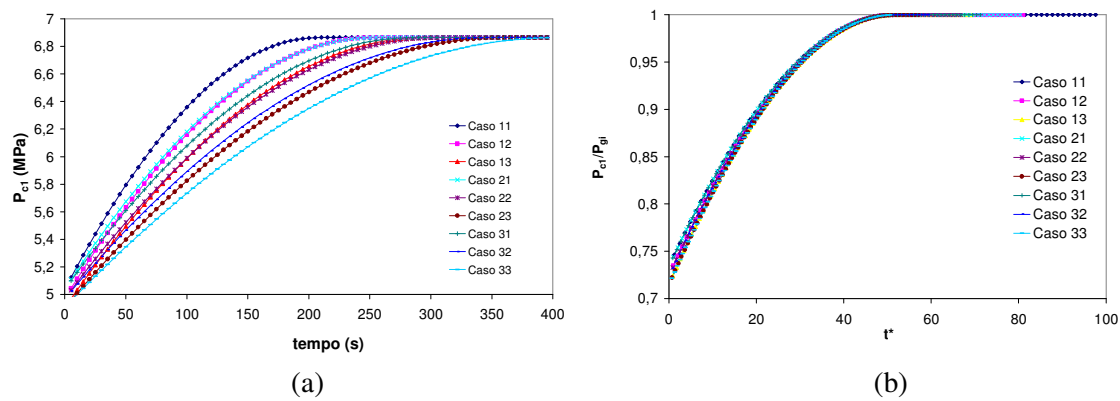


Figura 2. (a) Perfil da pressão no topo do espaço anular com o tempo; (b) Pressão no topo do espaço anular adimensional vs. tempo adimensional.

A Figura 2 (a) demonstra que após um certo tempo todas as pressões no topo do espaço anular (P_{c1}) tendem ao valor da pressão de injeção de gás (P_{gi}). Esse comportamento ocorre quando o equilíbrio é atingido. Quanto maior a profundidade do poço, e menor o diâmetro da coluna de produção, maior é a magnitude do tempo para que se alcance esse estado de equilíbrio, por exemplo: o Caso 11 apresentou $t_{\text{equilíbrio}} = 200$ s com $V_c = 12,9$ m³ e o Caso 33 apresentou $t_{\text{equilíbrio}} = 400$ s com $V_c = 24,7$ m³. Adimensionalizando a pressão no topo do espaço anular em relação à pressão de injeção, e plotando versus o tempo adimensional, Figura 2 (b), as curvas da Figura 2 (a) se colapsam, atingindo o equilíbrio no valor 1, ou seja, conforme dito anteriormente para: $P_{c1} = P_{gi}$, todos os casos atingem o equilíbrio para $t^* \cong 50$. Na operação real do poço, o processo de pressurização acima descrito seria interrompido pela abertura da válvula operadora para início da etapa de elevação, antes de se atingir a condição de equilíbrio.

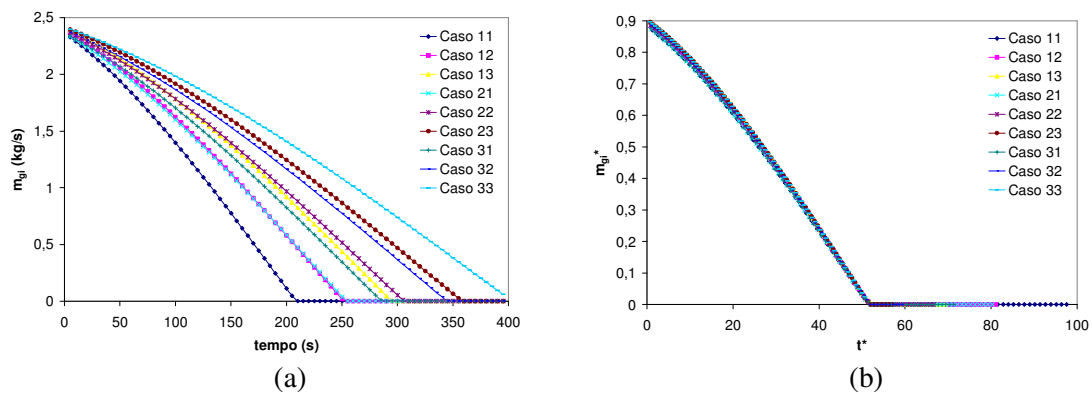


Figura 3. (a) Perfil da vazão mássica de gás injetado através da válvula motora; (b) Vazão mássica de gás injetado através da válvula motora adimensional vs. tempo adimensional.

Com a análise da Figura 3 (a) nota-se que quanto menor o volume do espaço anular menor será a massa injetada através da válvula motora por ciclo; e os casos com magnitudes semelhantes para o volume do espaço anular, apresentaram o mesmo tempo de injeção e mesmo perfil para a vazão mássica, por exemplo: Caso 12 apresentou $t_{inj} = 250$ s com $V_c = 15,5$ m³ e o Caso 21 apresentou $t_{inj} = 250$ s com $V_c = 15,7$ m³. Adimensionalizando a vazão mássica de gás injetado através da válvula motora (Equação 3) e plotando versus o tempo adimensional (Equação 3), todas as curvas se colapsam convergindo para o valor zero em $t^* \cong 50$, Figura 3 (b), ou seja, quando a pressão adimensional no topo do espaço anular atinge o valor um, Figura 2 (b).

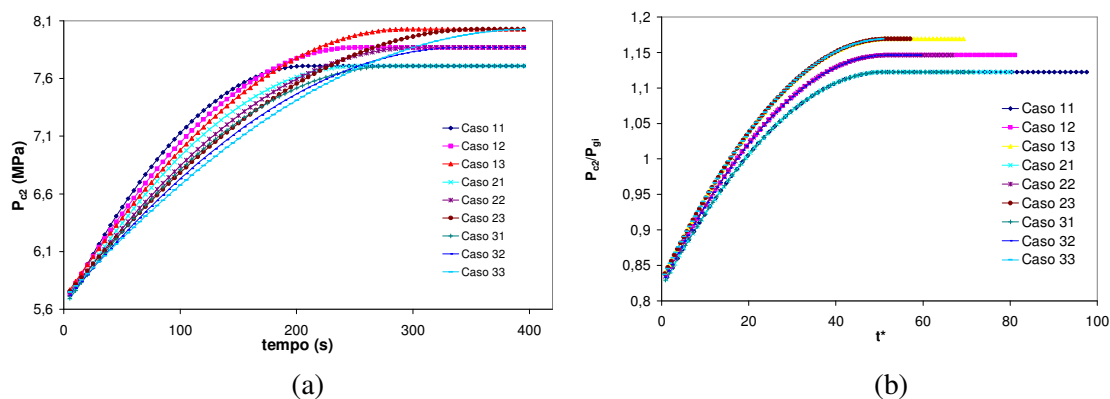


Figura 4. (a) Perfil da pressão no fundo do espaço anular; (b) Pressão adimensional no fundo do espaço anular vs. tempo adimensional.

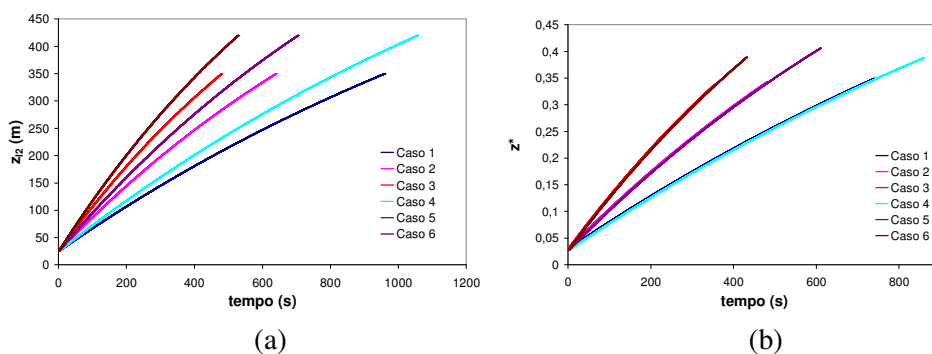
Quanto maior a profundidade do poço maior é a pressão no fundo do espaço anular (P_{c2}), Figura 4 (a). Esse comportamento é explicado a partir da Equação 2; a pressão P_{c2} decorre da carga piezométrica de gás no anular. Adimensionalizando a pressão no fundo do espaço anular em relação à pressão de injeção de gás e plotando versus o tempo adimensional (Equação 3), Figura 4 (b), as curvas com mesma profundidade de poço se colapsam, demonstrando a dependência de P_{c2} com a profundidade do poço. Os perfis da Figura 4 (a) se colapsam em três família devido a dependência de um segundo grupo adimensional: $\frac{Mg}{Z_c R T_c} (H_w - z_{gv})$, que representa o tipo de gás e a profundidade do poço.

3.2. Etapa de alimentação

Para as análises realizadas nesse trabalho, utilizaram-se seis simulações, mantendo-se os parâmetros do Caso 11, e variando-se a pressão estática do reservatório e o índice de produtividade, Tabela 2. Embora estes casos pudessem ser simulados até que a coluna de óleo atingisse seu valor máximo (em equilíbrio com o reservatório), isto não foi necessário para o estudo da adimensionalização das variáveis. Assim sendo, o simulador interrompe o cálculo no momento da abertura da válvula operadora, quando se inicia a etapa de elevação (a qual será estudada na sequência do presente trabalho).

Tabela 2 – Casos simulados para a etapa de alimentação

P_R (MPa)	IP(m ³ /d.MPa)		
	10	15	20
8	Caso 1	Caso 2	Caso 3
9	Caso 4	Caso 5	Caso 6



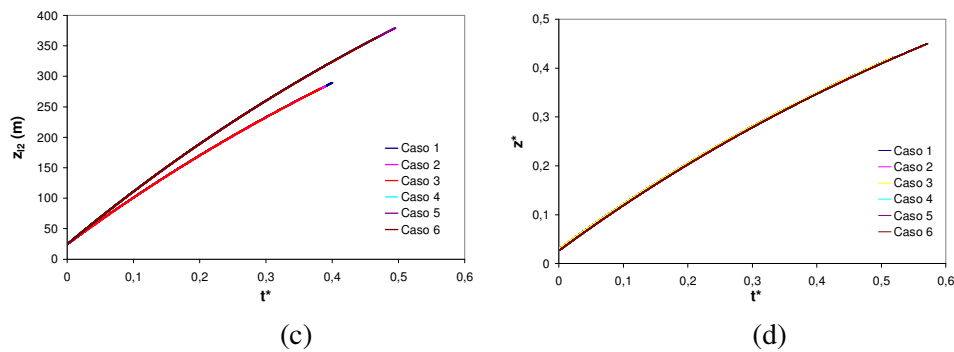


Figura 5. (a) Perfis para a altura do topo da carga de líquido alimentado na coluna de produção com o tempo; (b) Perfis para a altura adimensional do topo da carga de líquido alimentado na coluna de produção vs. tempo; (c) Perfis para a altura do topo da carga de líquido alimentado na coluna de produção vs. tempo adimensional; (d) Perfis para a altura adimensional do topo da carga de líquido alimentado na coluna de produção vs. tempo adimensional.

A Figura 5 (a) demonstra que a velocidade de alimentação na coluna de produção apresenta maiores magnitudes para maiores valores de IP e P_R . A Figura 5 (b) demonstra que ao se plotar z^* (Equação 10) vs. tempo, houve o colapso das curvas da Figura 5 (a) em três famílias, as quais são governadas pela mesma magnitude do índice de produtividade. A Figura 5 (c) demonstra que ao se plotar z_{12} vs. tempo adimensional (Equação 10), houve o colapso das curvas da Figura 5 (a) em duas famílias, as quais são governadas pela mesma magnitude da pressão estática do reservatório. Quando se plota a altura adimensional vs. o tempo adimensional há o colapso das seis curvas em uma única família, demonstrado que o índice de produtividade e a pressão estática do reservatório são parâmetros que regem a alimentação de líquido na coluna de produção para o modelo proposto.

3.3. Modelo Simplificado

Para as análises considerou-se como base o Caso 11. Para a resolução das Equações 11 e 12 utilizou-se o método de Euler. A resolução da Equação 12 ocorreu simultaneamente com o cálculo de Z_c , cuja correlação utilizada foi de Dranchuk, Purvis e Robinson (apud Ikoku, 1984), também utilizada por Carvalho Filho (2004).

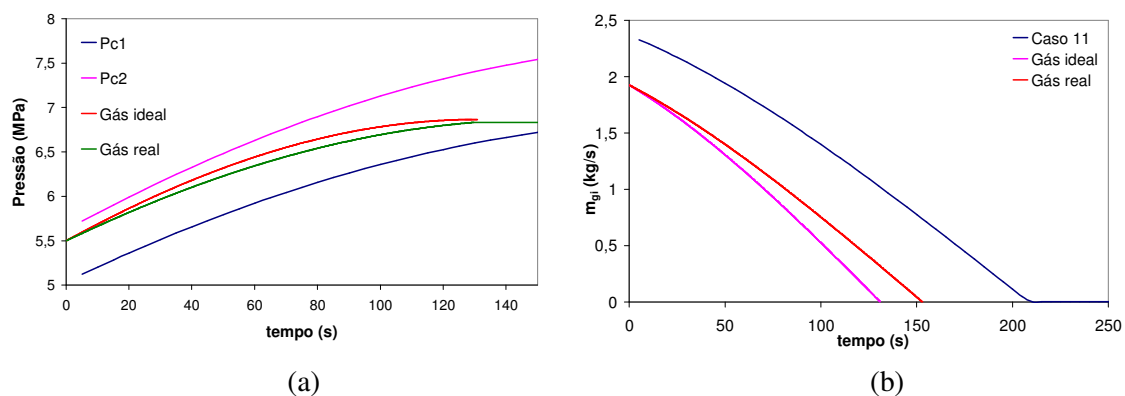


Figura 6. (a) Perfis das pressões no espaço anular vs. tempo; (b) Perfis da vazão mássica injetada através da válvula motora vs. tempo.

O comportamento de gás ideal ou real não afeta muito os resultados para o modelo simplificado, pois, os perfis de pressão para os dois casos são poucos discrepantes entre si, Figura 6 (a). Observa-se que esta diferença aumenta um pouco com o aumento da pressão, uma vez que a pressão afeta o valor

de Z , e o comportamento ideal ($Z = 1$) torna-se mais inexato. A diferença no valor da pressão reflete-se na vazão mássica de gás através da válvula e no tempo de injeção. No entanto, quando se compara o modelo simplificado com os dados do simulador, nota-se que há diferenças significativas, demonstrando que para grandes profundidades o peso da massa de gás é importante na admissão dos perfis de pressão. No modelo simplificado, a estabilização da pressão e da massa de injeção de gás ocorre muito mais rapidamente.

4. Conclusões

Este trabalho apresenta um estudo inicial sobre a adimensionalização e simplificação da modelagem para as etapas de injeção e alimentação no ciclo do GLI. O estudo de adimensionais em elevação à gás é pouco explorado na literatura, e o estudo de modelos simplificados é inexistente. O desenvolvimento das análises propostas nesse trabalho é fundamental para o entendimento de fenômenos e de influência dos parâmetros em cada etapa do ciclo do GLI. O simulador é uma boa ferramenta para esta tarefa, porque diversos parâmetros podem ser modificados para a análise dos resultados, além do que, dados de campo são praticamente inexistentes na literatura e difíceis de serem obtidos sob condições adequadamente controladas.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo apoio financeiro, através do PRH-15 do Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO) da UNICAMP e ao Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade Estadual de Campinas (DEP-FEM-UNICAMP).

Referências Bibliográficas

- BRILL, J.P.; DOERR, T.C.; BROWN, K.E. (1967). An Analytical Description of Liquid Slug Flow In Small-Diameter Vertical Conduits. *Trans. AIME 240, JPT (SPE 1526)*, pp. 419-432.
- BROWN, K.E.; JESSEN, F.W. (1962). Evaluation of Valve Port Size, Surface Chokes and Fluid Fall-back in Intermittent Gas-Lift Installations. *Trans. AIME 255, JPT*, pp. 315-322.
- CHACIN, J.E. (1994). Selection of Optimum Intermittent Lift Scheme for Gas Lift Wells. *SPE 27986*, pp. 301-313.
- CARVALHO FILHO, C.O. *Produção de Petróleo por Elevação a Gás Intermitente: Simulação e Análise dos Métodos Convencional e Invertido*. Campinas, 2004. Dissertação (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- LIAO, T. *Mechanistic Modeling of Intermittent Gas Lift*. PhD thesis, U. of Tulsa, 1991, TX, EUA.
- NEELY, A.B.; MONTGOMERY, J.W.; VOGEL, J.V. (1974). A Field Test and Analytical Study of Intermittent Gas Lift. *Trans. AIME 257, SPE Journal (SPE 4538)*, pp. 502-512.
- SANTOS, O. G. *Métodos Pneumáticos Intermitentes: análise e comparação*. Campinas, 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.