



## ENSINO DO MÉTODO *PLUNGER LIFT* ATRAVÉS DE SOFTWARE SIMULADOR

**Resumo:** *Este trabalho aborda o método de elevação artificial chamado plunger lift que é utilizado em poços com baixa pressão de reservatório. Este método utiliza um êmbolo mecânico para auxiliar a subida do óleo do fundo do poço até a superfície através do fechamento e abertura do poço com intervalo de tempo distintos. O plunger lift possui algumas etapas que, quando concluídas, completam um ciclo. Foi desenvolvido um simulador em Java com o modelo matemático criado no projeto AUTOPOC desenvolvido no LAUT-UFRN na linguagem C++. Foram implementados dois tipos de controle para este método: controle por temporização e controle por pressão de revestimento. O software desenvolvido simula o comportamento de um poço de petróleo equipado com o método de elevação artificial plunger lift instalado com características customizáveis para o estudo do aluno de engenharia.*

**Palavras-chave:** *Aplicação, Simulador, Plunger Lift, Controle.*

### 1. INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das mais importantes matérias primas e é utilizado largamente na indústria de geração de energia, principalmente em transporte (aéreo, terrestre ou marítimo) ou como insumo da indústria química para geração de outros produtos. O reservatório é formado em acumulações de hidrocarbonetos em armadilhas geológicas que podem ser classificadas como um reservatório contendo óleo, gás condensado ou gás não-condensado (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

Com o objetivo de alcançar este reservatório, o solo é perfurado desde a superfície até o mesmo. Enquanto o poço é perfurado, um tubo de revestimento metálico concêntrico, chamado anular, é cimentado à rocha ao redor do poço por todo caminho até alcançar o reservatório através de uma estrutura chamada canhoneado. Ao chegar ao reservatório é inserido um outro tubo de revestimento metálico menor que o anular, chamado de coluna de produção, que conecta o fundo do poço aos equipamentos de superfície chamados de árvore de natal (LAKE; CLEGG, 2007).

Todo o aparato de perfuração e equipamentos do poço, mostrados na Figura 1, tem como objetivo trazer para a superfície o fluido e/ou o gás produzido pelo reservatório ao longo do tempo. De acordo com a pressão dentro do reservatório em um dado momento o fluido poderá ascender do fundo do poço naturalmente. Quanto maior a pressão dentro do reservatório, maior a chance de se ter uma elevação natural do fluido. Normalmente isto

Organização

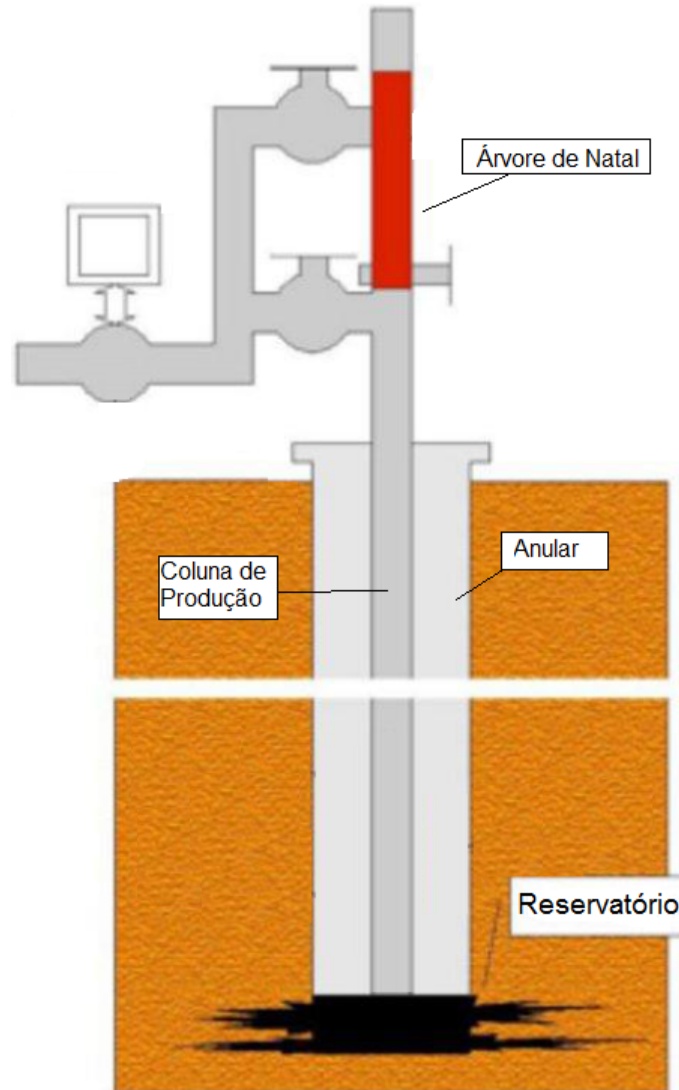


Promoção





Figura 1 – Configuração básica de um poço perfurado para extração de petróleo.



acontece no início da exploração de um poço e dura um certo período de tempo, enquanto houver pressão suficiente no reservatório para manter esta condição.

Quando a pressão do reservatório diminui e o fluido não ascende para a superfície naturalmente, este poço precisa de instrumentos adicionais para que possa ser fornecido mais energia ao reservatório. Dessa forma, torna-se possível a recuperação do fluido no fundo do poço. Todo o conjunto de equipamentos atrelados ao poço nesta situação é chamado de sistema de elevação artificial de petróleo (MITRA, 2012).

## 2. MÉTODO *PLUNGER LIFT*

Existem diversos sistemas de elevação artificial para cada tipo de características do poço. Cada sistema têm suas vantagens e desvantagens e estudos são realizados para explorar seus usos e ter maior conhecimento antes de colocar certo sistema em prática. Um destes sistemas requer o uso de um pistão em um poço intermitente que age como

Organização



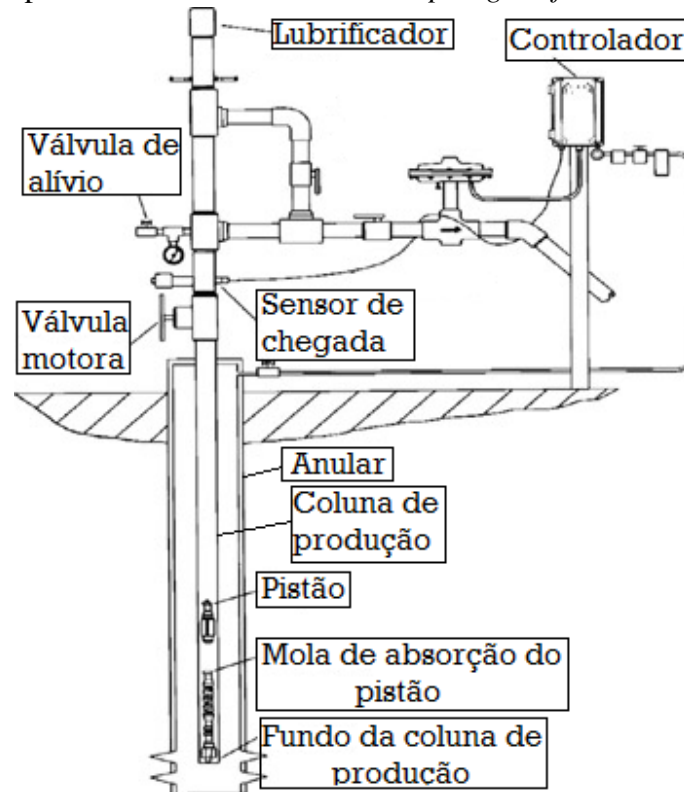
Promoção





uma interface mecânica entre o fluido e o gás do reservatório, que auxilia na ascensão dos elementos mencionados para a superfície. Este método específico é chamado de sistema de elevação por *Plunger Lift* (BROWN, 1982) e utiliza equipamentos mostrados na Figura 2.

Figura 2 – Equipamentos utilizados no método *plunger lift*.



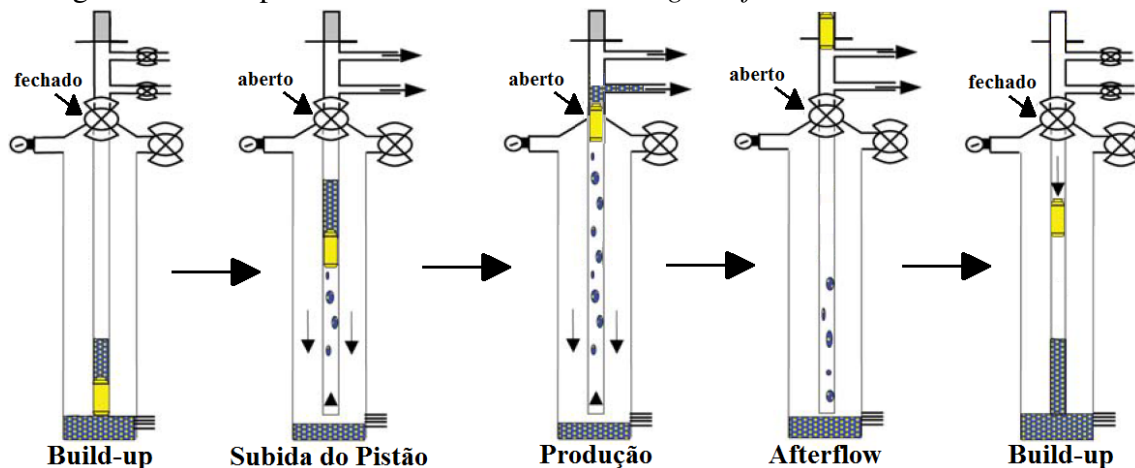
Com mais detalhes, um ciclo do método de elevação *plunger lift* pode ser dividido em quatro etapas mostradas na sequência de imagens da Figura 3:

- Crescimento de pressão no poço ou *Build-up*: nesta etapa a pressão dentro do anular cresce devido ao fechamento da válvula motora do poço. O líquido acumulado no fundo do poço aumenta à medida que o reservatório produz líquido e ocorre a depressurização da linha de produção. Quando a pressão dentro da coluna de produção estiver aumentado suficiente para levar o pistão ao lubrificador, a válvula motora é aberta e a etapa de subida do pistão se inicia;
- Subida do pistão ou *Piston rise*: quando o poço é aberto, o gás acumulado no anular escoar para a coluna de produção atravessando o pistão e a golfada de líquido. Nesse escoamento, parte do gás pressiona o pistão e o líquido para o topo da coluna de produção e o gás que está acima da golfada é levado para a linha de produção. Esta etapa acaba quando o topo da golfada chega na linha de produção na árvore de natal do poço;



- Produção: nesta fase ocorre a produção do líquido que foi acumulado na coluna de produção durante a etapa de *build-up*. Toda a golfada escoo horizontalmente pela linha de produção para fora do poço e o pistão chega ao topo da árvore de natal dentro da coluna de produção chamado de lubrificador;
- Pós fluxo ou *Afterflow*: Ao pistão chegar ao topo, todo o gás acumulado no anular e na coluna de produção escoo horizontalmente pela linha de produção atravessando o líquido que foi produzido na etapa anterior. O pistão pode cair caso a velocidade do gás não for suficiente para mantê-lo no topo mas esta etapa termina quando a linha de produção for fechada, quando o método passa para a etapa de *build-up*, iniciando um novo ciclo.

Figura 3 – Exemplo de um ciclo do método *Plunger Lift*.



O custo de instalação é relativamente bem menor que a instalação de outros métodos. Segundo (AIR; RADIATION, 2001), o custo da instalação dos equipamentos do *plunger lift* é entre \$1.900 à \$7.800 enquanto que a instalação de um método de bombeamento, como o *beam lift*, custa entre \$26.000 à \$52.000. Há um menor custo de manutenção e tratamentos de remediação, os quais ocorrem emissão de metano associados a operações de *blowdowns* para remoção de fluidos. Este sistema consegue conservar a energia de elevação do poço e é auxiliado pela constante remoção do líquido e parafina do poço, que aumenta a produção de gás. A maioria dos controladores do método de *plunger lift* são movidos com energia solar, então os custos energéticos para o funcionamento deste método são bem menores que em outros métodos.

### 3. SIMULADOR COMPUTACIONAL

O simulador foi desenvolvido na linguagem de programação *Java* utilizando a IDE *Eclipse* para organização dos arquivos. A linguagem foi escolhida pela característica de portabilidade do simulador, então será capaz de ser executado em sistemas operacionais diferentes, desde que eles possuam o *Java Runtime Environment*. O *software* é composto de 3 *threads*: uma interface responsável para apresentação dos dados em um gráfico 2D,

Organização



Promoção





um modelo matemático para o cálculo do comportamento do poço e outro objeto para realização da troca de dados entre a interface e o modelo matemático.

O modelo matemático do simulador criado foi adaptado para a linguagem Java seguindo o proposto por (BARUZZI, 1994) em outro projeto de desenvolvimento de um simulador programado em C++ (SALAZAR et al., 2012). O projeto se encontra disponível e está sendo desenvolvido em um repositório no *GitHub*, encontrado no endereço <https://github.com/DanielsonSilva/SimulatorPlungerLiftControl>, para publicação. Pode-se observar uma tela do simulador em execução pela Figura 4.

Figura 4 – Exemplo do simulador em execução.

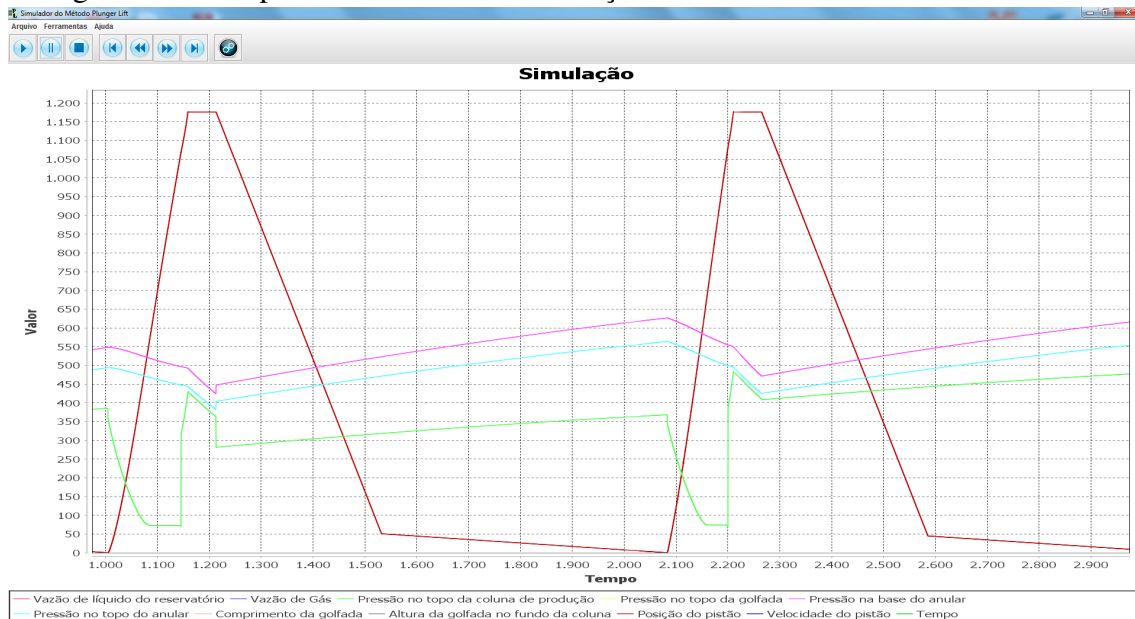


Figura 5 – Configuração do poço e controlador utilizado no simulador.

<b>Coluna de Produção</b> Comprimento (m): 1176.0    Rugosidade (mm): 0.25908 Diâmetro interno (pol): 1.995    Diâmetro externo (pol): 2.375 Peso (lb/ft): 4.7		<b>Anular</b> Comprimento (m): 1176.0    Rugosidade (mm): 0.132 Diâmetro interno (pol): 4.95    Diâmetro externo (pol): 5.5 Peso (lb/ft): 15.5	
<b>Válvula Motora</b> Diâmetro (pol): 0.75		<b>Linha de Produção</b> Pressão no separador (psig): 70.0	
<b>Reservatório</b> Pressão estática (kgf/cm <sup>2</sup> ): 61.4    Vazão de testes (m <sup>3</sup> /dia): 2.3 Pressão de testes (kgf/cm <sup>2</sup> ): 26.0    RGL: 949.0		<b>Pistão</b> Eficiência de Vedação (%): 90.0    Comprimento (m): 0.45 Massa (kg): 3.6    Diâmetro (pol): 1.95	
<b>Fluidos</b> Líquido BSW (%): 0.0    Óleo API: 45.0 Água SG: 1.07    Gás SG: 0.75 Gás Gama: 1.21		<b>Condições Iniciais</b> Tempo de válvula aberta (s): 600.0    Tempo de válvula fechada (s): 200.0 Tempo de pós fluxo (s): 54.0    Comprimento inicial da golfada: 15.3 Pressão no topo do anular (p...): 368.0	
<b>Opções de amostragem</b> Subida da golfada: 10000.0    Produção da golfada: 1000.0 Pós fluxo: 10000.0    Buildup Gás: 10000.0 Buildup Gás->Líquido: 10000.0    Buildup Líquido: 0.0		<b>Passos de integração</b> Subida da golfada: 10.0    Produção da golfada: 10.0 Pós fluxo: 10.0    Buildup Gás: 10.0 Buildup Gás->Líquido: 10.0    Buildup Líquido: 10.0	
Seleção de Controlador Qual controlador utilizar? <input type="radio"/> Temporização <input type="radio"/> Pressão de Revestimento <input checked="" type="radio"/> Sem controlador		Confirmar    Fechar	

O estudante que estiver trabalhando com o método *plunger lift* poderá, no início da simulação, configurar características específicas dos elementos utilizados no poço. A

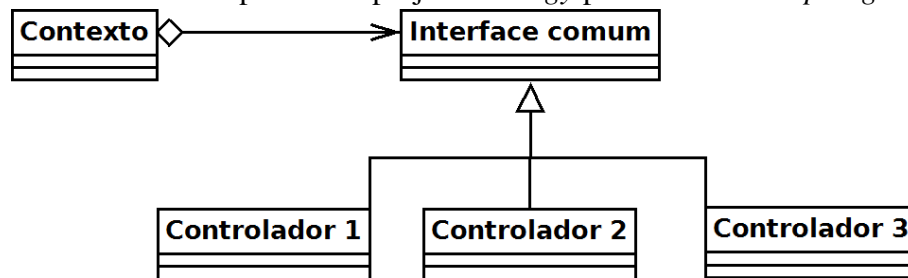




Figura 5 mostra a tela de configuração onde podem ser observadas características personalizáveis de equipamentos como a coluna de produção e o pistão utilizado dentro do poço. Com estas informações dadas, a simulação pode ser executada para este conjunto de informações e seu comportamento será diferente de outro conjunto de informações de configuração. Outras características importantes da tela da Figura 5 são as informações de controladores, nova característica do modelo matemático em relação ao desenvolvido anteriormente. O usuário pode optar pela utilização de um controle por temporização, por pressão de revestimento ou deixar a simulação sem um tipo de controle. Cada opção tem seus parâmetros configuráveis que influenciam no comportamento da simulação.

Para a implementação dos controladores do simulador foi utilizado o padrão de projeto *Strategy*. Segundo (GAMMA et al., 2004), o padrão de projeto *Strategy* define uma família de algoritmos diferentes, encapsulando cada um deles em uma classe diferente e os faz alternáveis. O contexto que utilizá-los não precisa definir a qual classe recorrer. Este padrão é aplicável quando existem variantes de um algoritmo que modifica somente o seu comportamento quando é chamado no cliente. Sua estrutura é definida como na figura 6, fornecendo uma interface comum para todos os algoritmos, a implementação de cada um dos algoritmos e o objeto contexto para utilizar os algoritmos.

Figura 6 – Estrutura do padrão de projeto *Strategy* para o simulador *plunger lift*.



### 3.1. Controle por temporização

Este algoritmo tem o objetivo de manter a continuidade operacional do método. Neste controle é definido um valor padrão mínimo e máximo, chamado de janela de chegada, do tempo de viagem do pistão ao longo da coluna de produção durante a subida do pistão. As variáveis que o controlador poderá modificar são os tempos de fechamento e pós-fluxo da válvula motora.

A ação deste controlador está diretamente ligada à medição do tempo de viagem do pistão na etapa da subida do pistão comparando aos valores padrões mínimos e máximos definidos pelo usuário previamente. Caso a comparação resultar em um tempo de viagem muito curto, que significa uma velocidade de subida alta, haverá uma diminuição do tempo de fechamento e/ou incremento do tempo de pós-fluxo. Se ocorrer o caso contrário, no qual o tempo de viagem muito longo, que significa uma velocidade de subida baixa, haverá um aumento do tempo de fechamento e/ou diminuição do tempo de pós-fluxo. Dessa forma, o controle tenta manter uma velocidade do pistão na subida aceitável para um certo poço.



### 3.2. Controle pela pressão de revestimento

Este controle monitora o momento da chegada do pistão assim como a pressão de revestimento durante a fase de *build-up*. O operador define valores de pressões máximo e mínimo da pressão no anular para o controlador analisar e comparar com os valores medidos pelos instrumentos.

Durante a fase crescimento de pressão, a válvula motora é aberta pelo controlador quando a pressão de revestimento alcança o valor máximo definido pelo operador e é fechada quando a mesma atinge o valor mínimo durante a fase de *afterflow*. Enquanto o controlador abre e fecha a válvula motora, o mesmo analisa o tempo de viagem do pistão à superfície e verifica se está dentro da janela de chegada do pistão. Se não estiver dentro desta janela, o controlador modifica os valores máximo e mínimo da pressão da seguinte maneira: para tempo de viagem abaixo do esperado haverá decremento nos valores das pressões e caso o tempo de viagem for maior que o esperado, incrementa-se os valores das pressões. Desse modo, o controlador permite adequar a pressão que acumula dentro do poço para a ascensão do líquido no próximo ciclo.

## 4. VALIDAÇÃO

De posse do simulador completo e funcionando, é possível a realização de testes do modelo matemático programado para verificar se os dados de saída condizem com a realidade dos poços de petróleo que utilizam este método para recuperação de óleo dos reservatórios. Os dados de saída deste sistema são vários, dentre eles estão as durações de cada etapas do método (subida do pistão, pós-fluxo e *build-up*), velocidade média do pistão na etapa de subida do pistão, pressão mínima atingida no anular na superfície e as pressões mínima e máxima da coluna de produção na superfície.

Os dados reais podem ser obtidos a partir de (BARUZZI, 1994), onde existem dados fornecidos de pressões na superfície e durações de etapas distintas. Então pode-se comparar os dados fornecidos com os dados gerados pelo simulador deste trabalho. A tabela 1 mostra os dados do poço de petróleo que foram retiradas as saídas e a tabela 2 compara as saídas fornecidas com as saídas geradas pelo simulador deste artigo.

Foi inserido a configuração no simulador de acordo com os valores mostrados na tabela 1 e adotado alguns valores para parâmetros não informados (figura 8), por exemplo, eficiência de vedação do pistão (90%), diâmetro do pistão (4,953cm) e o comprimento inicial da golfada no fundo do poço acima do pistão (15,3m). O resultado mostrado na tabela 2 foi recuperado a partir dos dados do ciclo de número 44 da simulação. Estes valores foram recuperados através da impressão de variáveis do modelo matemático em um arquivo de texto e de apresentação de outras variáveis na tela de *log* da IDE utilizada. A última parte do gráfico executado no simulador, mostrando as variáveis do sistema mais importantes para visualização do andamento do sistema, após a execução desta configuração, é apresentada na figura 7.

Observa-se a alta concordância entre os dados fornecidos pelo modelo e pelo simulador, efetivando a validade do uso deste modelo matemático neste simulador para o método de elevação artificial *plunger lift*. Estas pequenas diferenças entre os valores ocorrem por consequência de um maior tempo de duração da etapa de *build-up*. Este maior tempo da etapa de acúmulo de pressão dentro do poço influencia na força que empurra o



Tabela 1 – Dados do poço de petróleo de teste em que as saídas fornecidas foram calculadas

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro interno da linha de produção	2,9	pol
Diâmetro interno da coluna de produção	1,995	pol
Diâmetro externo da coluna de produção	2,375	pol
Comprimento da coluna de produção	1176	m
Diâmetro interno do revestimento	4,95	pol
Rugosidade	0,132	mm
Pressão do separador	70	psig
BSW	0	%
API do óleo	45*	-
Densidade relativa da água	1,07*	-
Densidade relativa do gás	0,75	-
RGL	949	$\frac{std.m^3}{m^3}$
Massa do pistão	3,6	kg
Comprimento do pistão	0,45	m
Pressão do anular de abertura da linha	366	psig
Duração do <i>afterflow</i>	54	s

\* valores estimados

Tabela 2 – Comparação entre as saídas fornecidas pelo poço da tabela 1 e as saídas do modelo matemático

Parâmetro	Unidade	Poço	Modelo
Duração do ciclo	s	907	967
Duração da subida do pistão	s	128	114,5
Duração do <i>build-up</i>	s	682	790
Velocidade média de subida do pistão*	$\frac{pés}{min}$	1341	1837,74
Pressão mínima no anular na superfície	psig	303	433
Pressão mínima no <i>tubing</i> na superfície	psig	103	73
Pressão máxima no <i>tubing</i> na superfície	psig	342	496

\* tempo estimado

Organização



Promoção







Figura 7 – Parte final da simulação realizada para a validação

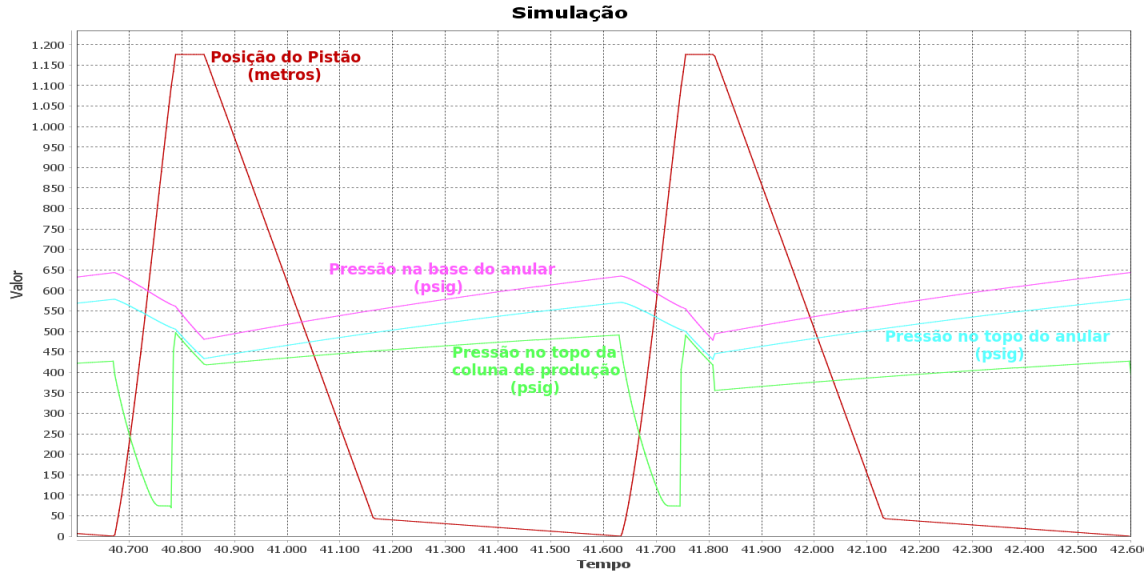


Figura 8 – Configuração do poço para a realização do teste de simulação

<b>Coluna de Produção</b> Comprimento (m): 1176.0    Rugosidade (mm): 0.25908 Diâmetro interno (pol): 1.995    Diâmetro externo (pol): 2.375 Peso (lb/ft): 4.7		<b>Anular</b> Comprimento (m): 1176.0    Rugosidade (mm): 0.132 Diâmetro interno (pol): 4.95    Diâmetro externo (pol): 5.5 Peso (lb/ft): 15.5	
<b>Válvula Motora</b> Diâmetro (pol): 0.75		<b>Linha de Produção</b> Pressão no separador (psig): 70.0	
<b>Reservatório</b> Pressão estática (kgf/cm²): 61.4    Vazão de testes (m³/dia): 2.3 Pressão de testes (kgf/cm²): 26.0    RGL: 949.0		<b>Pistão</b> Eficiência de Vedação (%): 90.0    Comprimento (m): 0.45 Massa (kg): 3.6    Diâmetro (pol): 1.95	
<b>Fluidos</b> Líquido BSW (%): 0.0    Óleo API: 45.0 Água SG: 1.07    Gás SG: 0.75 Gás Gama: 1.21		<b>Condições Iniciais</b> Tempo de válvula aberta (s): 600.0    Tempo de válvula fechada (s): 200.0 Tempo de pós fluxo (s): 54.0    Comprimento inicial da golfada...: 15.3 Pressão no topo do anular (p...): 366.0	
<b>Opções de amostragem</b> Subida da golfada: 10000.0    Produção da golfada: 1000.0 Pós fluxo: 10000.0    Buildup Gás: 10000.0 Buildup Gás->Líquido: 10000.0    Buildup Líquido: 0.0		<b>Passos de integração</b> Subida da golfada: 10.0    Produção da golfada: 10.0 Pós fluxo: 10.0    Buildup Gás: 10.0 Buildup Gás->Líquido: 10.0    Buildup Líquido: 10.0	
Seleção de Controlador Qual controlador utilizar? <input type="radio"/> Temporização <input type="radio"/> Pressão de Revestimento <input checked="" type="radio"/> Sem controlador		<input type="button" value="Confirmar"/> <input type="button" value="Fechar"/>	

pistão para a superfície, aumentando sua velocidade média durante a subida e, por consequência, diminuindo o tempo de duração da subida do pistão. Além disso, ocasiona um maior acúmulo de pressão na superfície da coluna de produção e no revestimento do poço.

Dessa forma, consegue-se a validação do modelo matemático para aceitação da veracidade dos resultados obtidos na simulação dos controladores para que o comportamento do poço seja o mais próximo da realidade para que o estudo do método seja melhor aproveitado.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de elevação artificial *plunger lift* é bastante utilizado na indústria em poços específicos que correspondam a certas características que proporcione o bom funcionamento do método. Os estudantes de engenharia, principalmente aqueles relacionados à



indústria de petróleo, tais como engenharia mecânica, engenharia de petróleo e engenharia química, podem tirar proveito do estudo deste método através de um simulador computacional. Desse modo, os futuros engenheiros poderão exercer suas funções com um maior conhecimento acerca de método de elevação artificial e mais especificamente, *plunger lift*.

Como *software* simulador conta com alta customização do poço de petróleo e controladores com suas características, os estudantes podem realizar diversos testes em vários casos diferentes. Estes casos podem agrupar poços com tamanho de colunas de produção diferentes, pistões de variados pesos ou diferentes proporções de líquido produzido pelo reservatório.

Além destas propriedades, o simulador está localizado no compartilhamento de projetos *GitHub*. Isto significa que outros estudantes podem manipular o código fonte através do *git* para aprimorar o modelo matemático ou adicionar novas funcionalidades ao *software*. O resultado do aprimoramento estará no *GitHub* para que outras pessoas possam estudar este método específico de elevação artificial.

### 5.1. Agradecimentos

Agradeço a Petrobras e o Laboratório de Automação em Petróleo da UFRN pela oportunidade de realizar diversas atividades de pesquisa e desenvolvimento de *software* neste assunto e me especializar neste método de elevação artificial e em programação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIR, U. S. E. P. A. O. of; RADIATION. *Installing Plunger Lift Systems in Gas Wells*. U.S. Environmental Protection Agency, Air and Radiation, 2001. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=vqHRZwEACAAJ>.

BARUZZI, J. O. do A. *Modelagem do plunger lift convencional*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM, Campinas, SP, Fevereiro 1994.

BROWN, K. E. Overview of artificial lift systems. *Journal of Petroleum Technology*, v. 34, 1982.

GAMMA, E. et al. *Padrões de Projeto — Soluções Reutilizáveis de Software Orientado a Objetos*. Porto Alegre: Bookman, 2004.

GUO, B.; LYONS, W. C.; GHALAMBOR, A. *Petroleum Production Engineering : A Computer-Assisted Approach*. Oxford: Elsevier, 2007.

LAKE, L. W.; CLEGG, J. D. *Petroleum Engineering Handbook Volume IV: Production Operations Engineering*. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2007.

MITRA, N. *Principles of Artificial Lift*. Allied Publishers Pvt. Limited, 2012. ISBN 9788184247640. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=6NokTvD4mjoC>.

SALAZAR, A. O. et al. Simulator of artificial lift method plunger-lift. *Rio Oil&Gas Conference 2012*, 2012.

Organização



Promoção

