



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



Simulador Computacional do Método de Elevação Artificial Plunger Lift e Implementação de Controladores para Estudo Comparativo

Danielson Flávio Xavier da Silva

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

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

Natal, RN, junho de 2017

Simulador Computacional do Método de Elevação Artificial Plunger Lift e Implementação de Controladores para Estudo Comparativo

Danielson Flávio Xavier da Silva

Dissertação de Mestrado aprovada em XX de junho de 2017 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli (orientador) DCA/UFRN

Prof. Dr. X DCA/UFRN

Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar DCA/UFRN

Prof. Dr. Pablo Javier Alsina DCA/UFRN

*À minha esposa, Juliane Karoline, e
meus pais pela paciência e auxílio
durante a realização e estudo deste
trabalho.*

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor André Laurindo Maitelli, sou grato pela orientação.

Aos demais docentes, pelo conhecimento passado.

Ao meu primo, Rafael Bessera Gomes pelas sugestões de correção durante o trabalho.

À minha família pelo apoio durante esta jornada.

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 na linguagem C++. Foram implementados dois tipos de controle para este método: controle por temporização e controle por pressão de revestimento. Por fim, resultados são obtidos com o simulador e então comparados para uma análise detalhada e retirado conclusões acerca da eficiência dos controladores implementados.

Palavras-chave: *Plunger Lift*, Elevação Artificial, Simulador Computacional, Pistão, Algoritmos de Controle.

Abstract

This work aboard the artificial lift method named plunger lift that is used in wells with low reservoir pressure. This method uses a mechanical plunger to help the oil lift from the bottom of the well to the surface through the well closing and opening with different time interval. The plunger lift has some stages that, when concluded, complete a cycle. It was developed a simulator in Java with mathematical model created in the AUTOPOC project developed at LAUT in C++ language. It were implemented two types of controls for this method: time control and control by casing pressure. In the end, results are obtained with the simulator and then compared for detailed analysis and take conclusions about the efficiency of the implemented controllers.

Keywords: *Plunger Lift*, Artificial Lift, Computational Simulator, Plunger, Control Algorithms.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Motivação	3
2 Método de elevação artificial <i>Plunger Lift</i>	5
2.1 Elevação Artificial	5
2.2 Introdução ao método <i>plunger lift</i>	8
2.3 Equipamentos	8
2.4 Ciclos do método <i>plunger lift</i>	9
2.5 Vantagens do método	11
2.6 Modos de Controle	12
2.6.1 Controle por temporização	12
2.6.2 Controle pela pressão de revestimento	13
2.6.3 Controle pelo fator de carga	13
2.6.4 Controle por pré-carga ou <i>Booster</i>	13
3 Simulador Computacional	15
3.1 Desenvolvimento do simulador computacional	15
3.2 Organização do <i>software</i>	16
3.3 Principais variáveis gerenciadas pelo simulador	17
3.4 Implementação de controladores	19
4 Validação do Simulador	21
5 Resultados	25
5.1 Controle e sua função no <i>plunger lift</i>	32
5.2 Comparativo entre as performances dos controladores	37
6 Conclusões	41

Lista de Figuras

1.1	Configuração básica de um poço perfurado para extração de petróleo . . .	2
2.1	Partes do fluxo	6
2.2	Curva de <i>IPR</i>	7
2.3	Aparato de equipamentos necessários para o pleno funcionamento do método <i>plunger lift</i>	10
2.4	Exemplo de um ciclo do método <i>Plunger Lift</i>	11
3.1	Exemplo da tela de desenvolvimento do <i>software Eclipse MARS.1</i>	16
3.2	Variáveis que podem ser plotadas no gráfico do simulador	17
3.3	Amostra do gráfico pertencente ao simulador mostrando uma execução . .	18
3.4	Definições iniciais para a execução do método <i>plunger lift</i>	19
3.5	Estrutura do padrão de projeto <i>Strategy</i> para o simulador <i>plunger lift</i> . . .	20
4.1	Parte final da simulação realizada para a validação	23
4.2	Configuração do poço para a realização do teste de simulação	24
5.1	Exemplo de uma execução bem sucedida durante 3 ciclos completos com configuração do poço padrão	26
5.2	Simulação de um poço onde o tempo da etapa de <i>afterflow</i> foi alterado para 180 segundos	28
5.3	Simulação de um poço onde o tempo da etapa de <i>build-up</i> foi alterado para 900 segundos	30
5.4	Simulação de um poço onde o tempo da etapa de <i>build-up</i> foi alterado para 1200 segundos e a etapa de pós-fluxo para 450 segundos	31
5.5	Configuração de teste para a simulação de afogamento de um poço	33
5.6	Simulação de um afogamento no método <i>plunger lift</i> no segundo ciclo . .	34
5.7	Correção do afogamento pelo controle por temporização	35
5.8	Correção do afogamento pelo controle por pressão de revestimento	36
5.9	Simulação com o controlador do tipo temporizador	38
5.10	Simulação com o controlador do tipo pressão de revestimento	39

Lista de Tabelas

4.1	Dados do poço de petróleo de teste em que as saídas fornecidas foram calculadas	22
4.2	Comparação entre as saídas fornecidas pelo poço da tabela 4.1 e as saídas do modelo matemático	22
5.1	Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.1	27
5.2	Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.2	27
5.3	Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.3	29
5.4	Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.4	29
5.5	Parâmetros adotados nos controladores	33
5.6	Parâmetros adotados nos controladores nas simulações das figuras 5.9 e 5.10	37
5.7	Dados recuperados das simulações das figuras 5.9 e 5.10 referentes ao ciclo de número 130	40

Lista de Símbolos e Abreviaturas

BHP: Bottomhole pressure

FC: Fator de Carga

IP: Índice de produtividade

IPR: Inflow Performance Relationship

P_{cab}: Pressão na cabeça do poço

P_e: Pressão média do reservatório

P_{ls}: Pressão na linha de surgência

P_{rev}: Pressão de revestimento

P_w: Pressão de fluxo no fundo do poço

q: Vazão

AUTOPOC: Automação de Poços

IDE: Integrated Development Environment ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado

LAUT: Laboratório de Automação em Petróleo

RAD: Rapid Application Development ou Desenvolvimento de Aplicação Rápida

RGL: Razão Gás-Líquido

SP: Set-point ou ponto de equilíbrio

UML: Unified Modelling Language ou Linguagem de Modelagem Unificada

Capítulo 1

Introdução

O petróleo é uma das mais importantes matérias primas e é utilizada largamente na indústria de geração de energia, principalmente em transporte (aéreo, terrestre ou marítimo) ou como insumo da indústria química para geração de outros elementos necessários. Este elemento é uma combinação complexa, principalmente de hidrocarbonetos. Este componente é formado em acumulações de hidrocarbonetos em armadilhas geológicas que podem ser classificadas como reservatório. Reservatório é uma formação subterrânea porosa e permeável que confina os hidrocarbonetos por rochedos impermeáveis ou barreiras de água existindo uma certa pressão acumulada neste confinamento. Neste reservatório pode existir óleo, gás condensado ou gás não-condensado.

Com o objetivo de alcançar a este reservatório, é perfurado o solo desde a superfície até o reservatório. Enquanto que o poço é perfurado, um tubo de revestimento metálico concêntrico, chamado de 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.

Todo o aparato de perfuração e equipamentos do poço, mostrados na figura 1.1, tem como objetivo trazer para a superfície o fluido 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 que o poço tenha uma elevação do fluido natural. Quando um poço eleva o fluido produzido pelo reservatório naturalmente, este poço é chamado de poço surgente. Normalmente isto acontece no início da vida 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 cai e o fluido não ascende para a superfície naturalmente, este poço precisa de instrumentos adicionais para que possa ser fornecido mais energia ao poço. Dessa forma, o processo de trazer o fluido para a superfície tem sucesso. Todo o conjunto de equipamentos atrelado ao poço nesta situação é chamado de sistema de elevação artificial de petróleo.

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

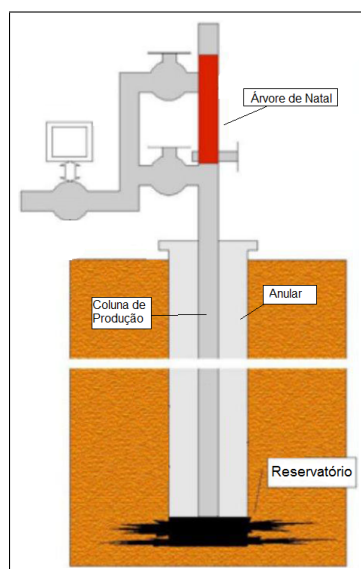


Figura 1.1: Configuração básica de um poço perfurado para extração de petróleo

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 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*.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é fornecer um estudo comparativo de alguns algoritmos de controle para o método de elevação artificial *Plunger Lift* utilizando um simulador computacional.

Para atingir este objetivo, um simulador computacional desenvolvido em linguagem de programação Java foi criado. Este simulador contém a implementação de um modelo matemático desenvolvido durante o projeto AUTOPOC nas dependências do LAUT.

O simulador atualmente conta com um controle manual, na qual o operador modifica as variáveis no início do processo e verifica o desenvolvimento do processo em um poço simulado. Neste simulador serão implementados, pelo menos, dois algoritmos de controle com suas características próprias e alteráveis. Serão comparados diversas características, como velocidade do pistão durante seu trajeto de subida e descida e volume de fluido produzido, do método em cada um dos algoritmos de controle para que seja possível tirar conclusões e realizar um estudo mais aprofundado nestes tipos de controles.

1.2 Motivação

Em muitos poços é utilizado o método de que trata este trabalho e, para manter um funcionamento adequado de todas as variáveis, é necessário um processo de controle adaptado para cada ocasião. Apesar da grande quantidade de estudos acadêmicos referentes ao método de elevação artificial *Plunger Lift*, a maioria destes estudos se referem ao seu modelo matemático ou as características de poços de petróleo mais vantajosas para a utilização deste método.

O processo de controle do método de elevação artificial *Plunger Lift* requer um estudo comparativo simulado para auxiliar no desenvolvimento de ferramentas reais de forma a garantir o bom funcionamento do método ou aumentar a produção de fluidos ou gás do poço. Através de algumas comparações de algoritmos de controle em ambiente simulado pode-se concluir em quais casos, determinados controles, devem ser utilizados para garantir um objetivo específico de um poço particular.

Capítulo 2

Método de elevação artificial *Plunger Lift*

Este capítulo apresenta considerações de ordem geral sobre elevação natural e artificial de poços e a teoria sobre o método de elevação artificial chamado *Plunger Lift*. Aprofundando neste método, são expostos o funcionamento e os equipamentos necessários para o pleno funcionamento em um poço de produção de gás ou óleo.

2.1 Elevação Artificial

Na elevação natural de óleo em reservatórios, o líquido chega à superfície sem a necessidade de operações e equipamentos diversos junto ao poço. Estes poços são chamados de poços surgentes. Com o passar do tempo de exploração de um poço, a pressão do reservatório é similar a pressão da superfície e o líquido não emerge para a superfície naturalmente, sendo necessário utilizar-se de técnicas e equipamentos para auxiliar o líquido do reservatório chegar à superfície.

Em poços surgentes, a elevação natural leva os fluidos do reservatório até os equipamentos da superfície que tratam deste produto, como separadores e tanques, somente com a energia acumulada do reservatório. Este estado ocorre, principalmente, no início da vida produtiva de um certo poço, no qual existe grande pressão dentro do reservatório. Existem, além da pressão do reservatório, outros fatores que contribuem para uma elevação artificial ou natural de um poço: propriedades dos fluidos que estão sendo produzidos, índice de produtividade de um poço, dano causado à formação produtora durante a perfuração e adequado controle de produção através de testes periódicos de produção.

Até que seja produzido nas facilidades da superfície, o óleo produzido no reservatório passa por três partes, como mostrado na figura 2.1, que definem se um poço deve utilizar uma técnica de elevação artificial: fluxo no meio poroso, fluxo na coluna de produção e fluxo na superfície ou coleta.

O fluxo no meio poroso corresponde ao fluxo entre o reservatório e a entrada do óleo na coluna de produção de um poço. A vazão de um poço é influenciada pelo diferencial de pressão sobre o meio poroso, de modo que quanto maior é esse diferencial, maior a vazão de líquido que se desloca para o poço. Um teste pode ser realizado com a finalidade de definir a produtividade daquela formação específica. Este teste expressa que a capacidade

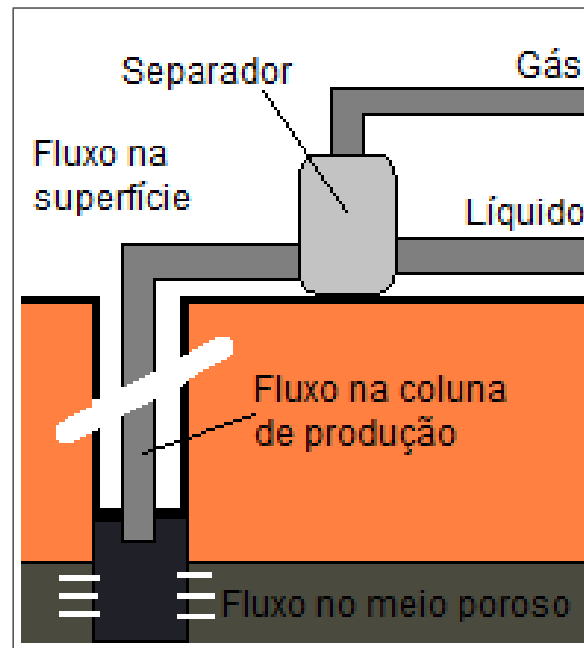


Figura 2.1: Partes do fluxo

de fluxo de um poço é caracterizada pelo índice de produtividade (IP) que é definido pela equação 2.1.

$$IP = \frac{q}{P_e - P_w} \quad (2.1)$$

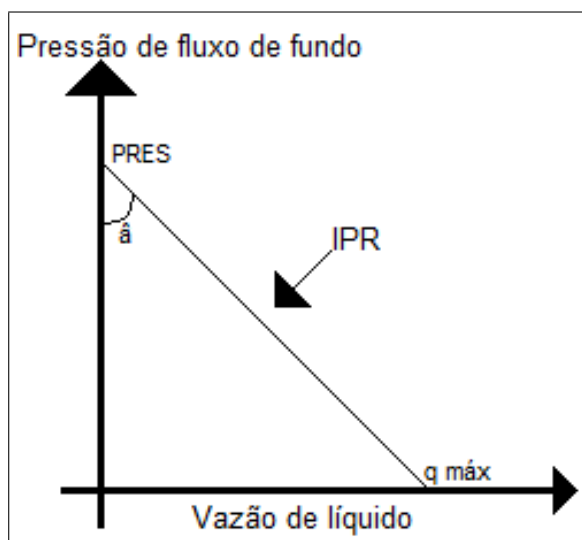
Onde q é a vazão, P_e a pressão média do reservatório e P_w a pressão de fluxo no fundo do poço. Este índice pode ser utilizado para estimar vazão de um certo poço para diferentes pressões de fluxo no meio poroso. Pode-se reescrever a equação acima para a definição da pressão de fluxo no fundo do poço em função dos outros parâmetros de acordo com a equação 2.2.

$$P_w = P_e - \frac{q}{IP} \quad (2.2)$$

Considerando IP constante, qualquer que seja a vazão q , a equação 2.2 forma uma reta denominada de IPR (*Inflow Performance Relationship*) como mostra na figura 2.2. Nesta reta podemos encontrar a vazão máxima que poderia ser alcançada caso a pressão dinâmica no fundo pudesse ser reduzida a zero.

Este modelo linear não se aplica nos casos onde há produção de gás saindo da solução e aumentando a saturação dos fluidos. Quando isto ocorre, há variação no índice de produtividade com a variação da pressão, que torna a lógica que afirma um IP constante inadequada.

Para um caso geral, a determinação do gráfico de IPR pode ser alcançado de alguns modos. Uma das mais precisas é a medição direta. Este modo é determinado produzindo o poço de forma estável em muitas vazões diferentes e verificar as pressões de fluxo no

Figura 2.2: Curva de *IPR*

meio poroso correspondente para cada valor de vazão.

Após o fluido passar pelo meio poroso do reservatório, ele deve vencer diversas forças (fricção, restrições de válvulas e reguladores de fluxo, coluna hidrostática do fluido na coluna de produção) para atravessar todo o caminho até a superfície do poço. O fluido deve vencer a pressão que está na coluna que é a soma do gradiente devido à elevação, à fricção e à aceleração. O gradiente devido à elevação é o gradiente hidrostático do fluido que está escoando e varia de acordo com a sua densidade. O gradiente devido a fricção existe toda vez que há movimentação de fluidos e é função da rugosidade, diâmetro da coluna de produção e vazão da mesma. O gradiente devido à aceleração é nulo nos casos de fluidos incompressíveis pois não há variação na velocidade do fluido na trajetória até a superfície.

O fluxo do fluido que está sendo produzido tem sua última etapa na superfície, desde a cabeça do poço até o separador passando pela linha de produção e regulador de fluxo. O gradiente de pressão do fluxo na superfície é verificado da mesma forma que no fluxo da coluna de produção. Um dos equipamentos que se encontram na superfície de um poço que exerce função importante no fluxo na superfície é o regulador de fluxo que tem com finalidade restringir a vazão de fluido, ajustando a produção do poço de acordo com as características do reservatório.

As técnicas e equipamentos de elevação artificial de poços tratam de diminuir a *BHP* para obter uma maior produção do reservatório. Em muitos poços de produção de óleo utilizam alguma técnica de elevação artificial em alguma parte durante a vida operacional do poço e em poços de produção de gás se beneficiam destas técnicas por expulsar o líquido do reservatório para que o gás possa fluir mais facilmente para a superfície.

Deste modo, o estudo de elevação artificial auxilia os poços que tem pressão de reservatório baixa quando o fluido não atinge a superfície sem algum tipo de energia suplementar. Esta energia é fornecida através de equipamentos e técnicas específicas que

reduzem a pressão de fluxo no fundo do poço aumentando a vazão de produção. Existem diversos métodos de elevação artificial, cada um para certas configurações de poços, de acordo com suas vantagens e desvantagens. Pode-se citar alguns dos métodos empregados na engenharia de poços: gás *lift*, bombeio centrífugo submerso, bombeio mecânico com hastes e bombeio por cavidades progressivas. Neste trabalho explora-se um método chamado *Plunger Lift*.

2.2 Introdução ao método *plunger lift*

Quando se começou a utilizar este método nos poços, ele era utilizado em poços de produção de óleo e após algum tempo tornou-se mais comum o utilizar em poços de produção de gás. Seja em poços de produção de óleo ou gás, o método *plunger lift* tem como sua principal característica a utilização de uma interface mecânica, chamada de pistão, que é instalada no fundo da coluna de produção do poço para evitar que o líquido volte para o fundo do poço e a formação de incrustação de parafina ou hidratos.

Após um certo período do poço em atividade, as pressões do reservatório caem e o líquido que existe no reservatório fica na parede da coluna de produção devido ao reservatório não ter pressão suficiente para trazer todo o líquido para a superfície. Essa armazenagem de líquido na parede da coluna de produção começa a ficar maior e prejudicar a passagem do gás, diminuindo sua velocidade. Para diminuir o volume de líquido que é deixado na parede da coluna de produção, é introduzido um êmbolo no fundo da coluna de produção e deixa-se que seja acumulada pressão dentro do poço fechando o poço na superfície. O pistão age como um selo entre o gás e o líquido prevenindo que o líquido fique na parede da coluna (*fallback*), expulsando o líquido da coluna e removendo o pouco líquido que ficou na parede da coluna do ciclo anterior. Por conta desta ação do pistão como uma interface mecânica entre o gás e o líquido, a velocidade que o gás necessita para empurrar o pistão pela tubulação é menor que o caso da não utilização do pistão.

2.3 Equipamentos

O método de elevação artificial *plunger lift* é composto por um aparato de equipamentos (mostrados na figura 2.3) para realização do seu funcionamento apropriado. Desde o fundo da coluna de produção à árvore de natal, existem equipamentos que devem ser mencionados para se melhor entender o método. Estes equipamentos são:

- Sensor de pressão — envia informações de pressão pela coluna de produção e anular para o controlador para que as ações programadas sejam tomadas;
- Regulador — mantém a pressão menor que um SP controlando a abertura da válvula motora;
- Válvula motora — válvula pneumática que abre e fecha a linha de produção e é ativada por pressão;
- Sensor de chegada — verifica quando o pistão chega ao lubrificador;

- PAINEL SOLAR — armazena energia solar para fornecer energia para o controlador;
- MOLAS NO FUNDO DA COLUNA DE PRODUÇÃO — suaviza a chegada do pistão ao fundo do poço na etapa de *build-up*;
- PISTÃO — equipamento que dá o nome ao método. Age como selante entre o gás e o líquido e ajuda-os a subir até a superfície para os equipamentos;
- RASTREADOR DO PISTÃO — um ecômetro que rastreia onde o pistão se encontra dentro da coluna de produção para assegurar sua chegada ao fundo do poço e estudar os dados de queda;
- CONTROLADOR — equipamento utilizado para otimizar o funcionamento do método em cada poço diferente;
- LUBRIFICADOR — fica no topo da coluna de produção e é composto de uma mola para suavizar o impacto da chegada do pistão à superfície.

2.4 Ciclos do método *plunger lift*

No funcionamento padrão, o método *plunger lift* é dividido em fases de fluxo de líquido-gás e poço fechado.

O ciclo deste método começa com uma etapa de fechamento do poço para que se possa acumular pressão dentro do reservatório e para que o pistão possa cair até chegar ao fundo do poço. Quando o poço estiver fechado tempo suficiente para acumular energia bastante para trazer o pistão à superfície, o ciclo de fluxo começa. Quando o fluxo começa, o gás empurra o pistão e líquido até a superfície. Ao pistão chegar à superfície, ele envia o líquido pela linha de produção e então o poço fica livre de líquido. O pistão passa pela linha de produção e se fixa ao topo do poço somente com a pressão do gás acumulada deixando o poço produzindo o gás do reservatório. Depois de um período o líquido começa a se acumular novamente no poço e as velocidades caem, logo o poço é fechado e o pistão cai para o fundo do poço para recomençar o ciclo.

Com mais detalhes, um ciclo do método de elevação *plunger lift* pode ser dividido em quatro etapas mostradas na sequência de imagens da figura 2.4.

- CRESCIMENTO DE PRESSÃO NO POÇO OU *Build-up* — nesta etapa a pressão dentro do anular cresce assim como a pressão abaixo da golfada devido ao fechamento da válvula motora do poço. A golfada aumenta à medida que o poço produz líquido e ocorre a despressurização 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 a golfada 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.

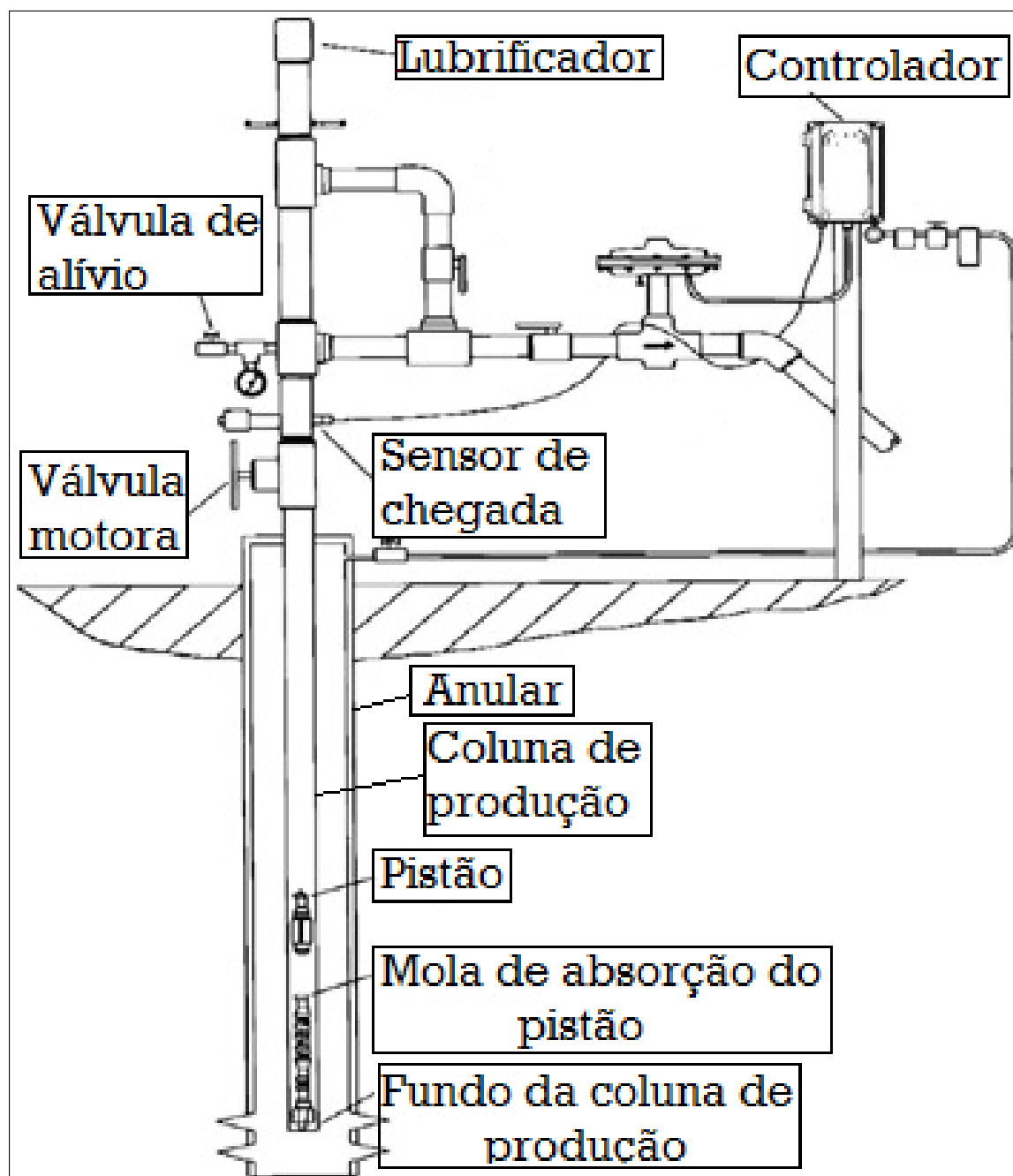


Figura 2.3: Aparato de equipamentos necessários para o pleno funcionamento do método *plunger lift*

- Produção — essa fase ocorre a produção do líquido que foi acumulado na coluna de produção durante a etapa de *build-up*. Toda a golfada escoar 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, quando acaba esta etapa.
- Pós fluxo ou *Afterflow* — Ao pistão chegar ao topo, todo o gás acumulado no anular e na coluna de produção escoar 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 for fechada o pistão cai e o método vai para a etapa de *build-up*, iniciando um novo ciclo.

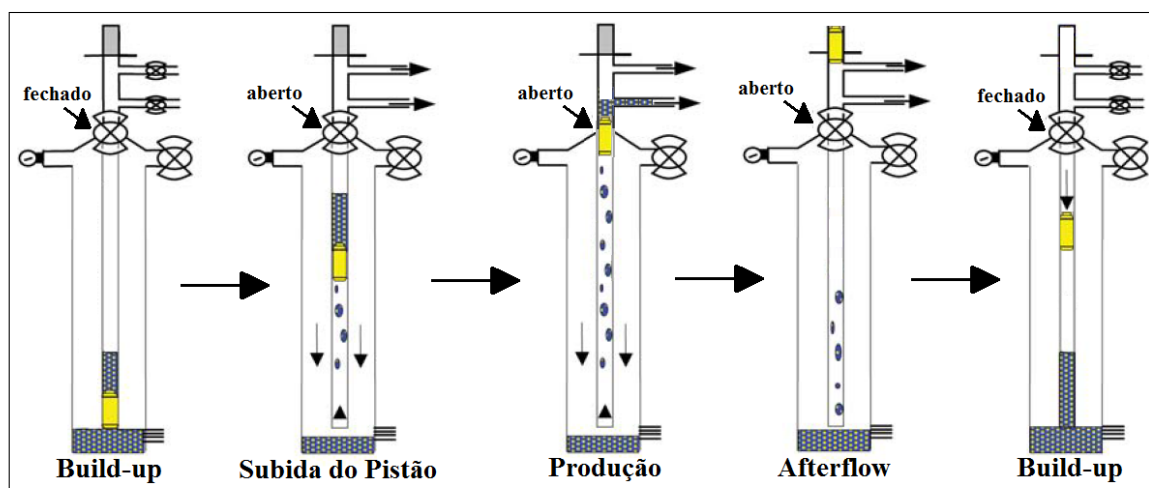


Figura 2.4: Exemplo de um ciclo do método *Plunger Lift*

2.5 Vantagens do método

Por conta da simplicidade dos equipamentos em comparação com equipamentos de outros métodos, a instalação do *plunger lift* tem benefícios econômicos e ambientais.

O custo de instalação é relativamente bem menor que a instalação de outros métodos. Segundo [of 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, pois a frequência de realização destes procedimentos é menor em relação à outros métodos. 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.

2.6 Modos de Controle

Em todo processo industrial, desenvolvem-se maneiras de melhorar o resultado de acordo com um certo objetivo. O processo de melhora do resultado passa por uma análise de lógica do processo procurando garantir o pleno funcionamento do mesmo. O resultado desta análise, em certos procedimentos, é desenvolvido em um controlador que trabalha na observação de certas variáveis deste sistema e na alteração, quando necessário, das mesmas ou outras variáveis. Segundo [Vieira 2009] a baixa utilização do *plunger lift* na indústria do petróleo ocorreu pela dificuldade em determinar os tempos corretos para a otimização de um certo poço em controladores pneumáticos.

De acordo com o que foi visto na seção 2.3, em um poço que utiliza do método *plunger lift* existem um sensor de pressão no anular, um sensor de chegada do pistão, um controlador e uma válvula motora. Com as informações fornecidas por estes equipamentos pode-se realizar o controle de abertura e fechamento da válvula de algumas maneiras diferentes, dependendo do objetivo do operador para a operação de um certo poço. Nesta seção são discutidos alguns algoritmos de controle que são possíveis de ser implementados em um controlador na árvore de natal de um poço para que ocorra a otimização operacional de um poço.

2.6.1 Controle por temporização

Este controle se caracteriza por ser o mais simples e requerer o mínimo de instrumentos. Este algoritmo tem o objetivo de manter a continuidade operacional do método, não importando a produção do poço, para que o poço não afogue e traga mais custos de manutenção. 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 fase de subida. 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, na 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. Os valores de tempo só podem ser aumentados e diminuídos até um certo limite para permitir que o pistão chegue, pelo menos, ao fundo do poço.

Essa descrição da ação de controle mostra conexão entre a velocidade de subida do pistão e a pressão acumulada dentro do poço. Quanto maior for a energia concentrada no interior do poço, maior será a velocidade do pistão na subida do pistão, arriscando danificar equipamentos na árvore de natal do poço, logo algo indesejável. Se a mesma energia for de pequena intensidade, poderá ocorrer a não ascensão completa do pistão à superfície, não ocorrendo a etapa de produção de líquido e nem a etapa de pós-fluxo.

A pressão acumulada depende dos tempos de pós-fluxo e fechamento de maneira que quanto maior for o tempo de *shut-in*, maior energia será armazenada dentro do poço e quanto maior for o tempo de pós-fluxo, mais energia interior do poço será consumida.

2.6.2 Controle pela pressão de revestimento

Este controle procura manter as viagens do pistão estáveis enquanto maximiza a produção de líquidos. Para chegar a tal objetivo, 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 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 caso 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 do método.

2.6.3 Controle pelo fator de carga

Este algoritmo procura garantir a continuidade operacional deste método assegurando a chegada do pistão à superfície, examinando algumas variáveis dentro do poço e na árvore de natal.

Este controle utiliza-se de uma equação para garantir a subida e produção do líquido no ciclo atual. Esta equação resulta em um valor chamado fator de carga e depende dos valores de pressão na cabeça do poço (P_{cab}), pressão de revestimento (P_{rev}) e a pressão na linha de surgência (P_{ls}). A equação 2.3 demonstra a relação entre carga de líquido a ser transportada à superfície e a potencial capacidade do sistema. Normalmente os valores aceitáveis para FC são menores ou iguais a 0.5 mas este limite pode ser modificado pelo tempo de viagem do pistão deslocado da janela de chegada, incrementando o valor limite de FC quando ocorrer chegada rápida do pistão ou diminuindo, caso contrário.

$$FC = \frac{P_{cab} - P_{rev}}{P_{ls}} \quad (2.3)$$

2.6.4 Controle por pré-carga ou *Booster*

Esta forma de gerenciar o poço utiliza mais equipamentos que os descritos na seção 2.3. O equipamento necessário ao poço para aplicação dentro do controle é uma linha de gás em alta pressão ligada ao revestimento através de uma válvula de bloqueio do tipo *abre-fecha*.

Em todo ciclo, durante a fase de *shut-in*, é fornecida uma quantidade fixa de energia, pela linha de gás, ao poço para auxiliar na subida do pistão e carregar toda a golfada de líquido até a superfície. O tempo em que a referida linha de gás fornece energia é chamada tempo de pré-carga e este pode ser aumentado ou diminuído pelo controlador de acordo com a verificação do tempo de viagem do pistão. Caso o tempo de viagem do pistão for menor que a da janela de chegada, então o controlador diminui o tempo de pré-carga e caso contrário, incrementa o tempo de pré-carga do próximo ciclo. O excesso de gás acumulado no poço durante este processo é consumido pelo aumento do tempo de *afterflow* daquele mesmo ciclo.

Capítulo 3

Simulador Computacional

Um simulador computacional é uma ferramenta que auxilia no processo do estudo de um certo procedimento, simples ou complexo, que evita a má gerência de um sistema específico. O ajuste de parâmetros iniciais em um procedimento pode ser estudado previamente por um simulador computacional para obter maior segurança quando esta alteração for realizada em um sistema real. Na aquisição de conhecimento sobre o procedimento através do simulador, o operador será capaz de compreender e testar formas de otimizar aquele sistema específico seguindo algum objetivo especial. Alcançada esta otimização no simulador e verificada através de testes, o operador poderá ter maior garantia de sucesso ao aplicar a técnica em um processo na prática.

Com a finalidade de preparação para a implementação dos controladores descritos na seção 2.6, foi desenvolvido e está sendo melhorado um aplicativo *desktop* para simular um poço de extração de petróleo próximo do real contendo os equipamentos e outras variáveis que existem no método de elevação artificial *plunger lift*. Este simulador terá a capacidade de verificar as alterações ocorridas em um poço de acordo com um tipo de controlador e seus parâmetros informados pelo usuário. Será possível a comparação dos dados adquiridos entre as simulações de controladores diferentes para um poço com condições iniciais iguais com os resultados mostrados pelo simulador.

3.1 Desenvolvimento do simulador computacional

O *software* foi desenvolvido usando a ferramenta *Eclipse MARS.1* para programar na linguagem de programação *Java*. A ferramenta *Eclipse MARS.1* é utilizada para criar programas em diversas linguagens, mas normalmente é utilizado para programar em *Java*. A vantagem de desenvolver um *software* em *Java* é a facilidade de programação, inclusive de componentes gráficos de interface de entrada e saída de dados, e sua portabilidade, executando em qualquer máquina que existir a JVM (*Java Virtual Machine*). O programador consegue resolver diversos problemas mais facilmente através da linguagem *Java* do que em outras linguagens existentes durante a fase de desenvolvimento.

Diferente de uma ferramenta RAD (*Rapid Application Development*) na qual existe a possibilidade de clicar e arrastar componentes para uma janela com o objetivo de tornar rápida o desenvolvimento de um *software*, a construção do sistema foi realizada em uma IDE (*Integrated Development Environment*) onde não há opção de criar interfaces mas

não cria códigos em *background*. Esta criação de código em *background* torna o sistema lento e confuso pois adiciona muito código que não é utilizado pelo sistema. A ferramenta *Eclipse MARS.1* está sendo mostrada na figura 3.1 exibindo todos os arquivos do projeto à esquerda e o código de um dos arquivos na parte central. Esta ferramenta ajuda na gerência do código e arquivos adicionados ao projeto para que estejam incorporados e funcionando corretamente, facilidade na manutenção e ligação entre as classes criadas pelo desenvolvedor.

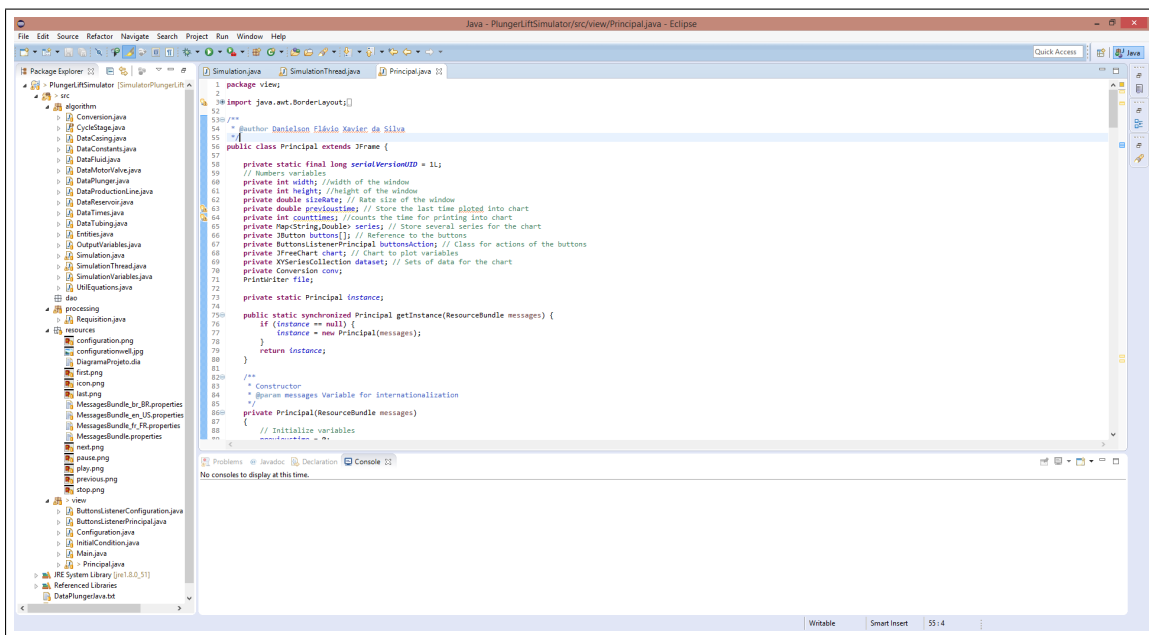


Figura 3.1: Exemplo da tela de desenvolvimento do *software Eclipse MARS.1*

O simulador foi desenvolvido e adaptado para aceitar internacionalização do sistema. Com poucas alterações esta característica permite executar o simulador com todas as legendas usadas no programa em outros idiomas como inglês ou francês. Estas definições ficam na pasta *resources* dentro do projeto, um arquivo por idioma. Em cada arquivo existem definições de identificadores e o respectivo texto que deve ser apresentado no programa. Quando o programa for executar, é passado o idioma que deseja apresentar e então a classe principal do sistema seleciona o arquivo respectivo para aquele determinado idioma. Dessa forma, pessoas que não entendem o português brasileiro podem utilizar este sistema e obter proveito do estudo do método *plunger lift*.

3.2 Organização do *software*

Antes do desenvolvimento de um *software*, deve ser levada em consideração a organização e arquitetura do sistema. Esta definição tem objetivo de evitar que o programa fique com código desnecessário e de difícil compreensão para um desenvolvedor. O sistema foi ser dividido em três partes com objetivos distintos para obter o funcionamento preciso.

Uma das partes do simulador tem a responsabilidade de gerenciar a interface de entrada e saída de dados, outra executa os cálculos do modelo matemático referente ao método estudado e a última trabalha para transferir os dados calculados do modelo matemático à interface e os dados de entrada para o modelo matemático. Cada uma dessas partes irá efetuar suas operações concorrentemente para não haver prejuízo no tempo de processamento durante o andamento do programa. Para que isso ocorra, cada parte foi criada como uma *thread*. *Threads* representam tarefas concorrentes e permitem que o programa execute mais suavemente comparado a somente uma tarefa realizando todas as atividades.

Segundo [Javier 2012], concorrência é uma série de tarefas executando simultaneamente em um processador, que pode ser real no caso do processador ter mais de um núcleo ou aparente caso existir somente um núcleo. Durante a execução do sistema operacional, podem existir vários processos efetuando tarefas simultâneas, que se denominam *threads* dentro de um processo. Outro termo utilizado é paralelismo, que normalmente é utilizado por autores para definir um processo com *multi-threads* exercendo suas tarefas em um computador com mais de um processador.

Cada uma das partes do simulador é desenvolvida em diretórios diferentes dentro do projeto para melhor gerência. A ligação existente entre os diretórios de classes se dão na relação de um-para-um, ou seja, entre diretórios somente uma classe se conecta à uma outra classe de outro diretório. Dessa forma é garantido uma maior segurança entre as mensagens trocadas durante a execução entre as *threads*, evitando problemas no andamento do sistema e desorganização de código. Outra vantagem deste tipo de abordagem é que, no caso em que ocorrer erros no sistema, estes serão mais facilmente rastreáveis e solucionados.

3.3 Principais variáveis gerenciadas pelo simulador

O modelo matemático implementado no simulador dispõe de diversas variáveis que podem ser observadas pelo usuário assim como existem diversas variáveis que podem ser definidas antes da execução começar. Estas definições podem ser realizadas com relação ao pistão utilizado no poço, estrutura da coluna de produção e anular, RGL (razão gás-óleo) do reservatório que está retirando óleo, tamanho inicial da golfada entre outras. O simulador está definido para apresentar certas variáveis (mostradas da figura 3.2) em um gráfico de duas dimensões (figura 3.3) plotando os valores calculados pelo tempo decorrido. Antes da execução, o usuário deve definir as condições iniciais abrindo o menu de configuração (figura 3.4) e alterar as características que forem necessárias ao teste de simulação.

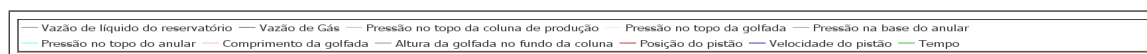


Figura 3.2: Variáveis que podem ser plotadas no gráfico do simulador

Ao definir as condições iniciais do simulador, o usuário poderá executar e observar o andamento de certas variáveis durante os ciclos em que o *software* continuar sendo



Figura 3.3: Amostra do gráfico pertencente ao simulador mostrando uma execução

Coluna de Produção		Anular		Válvula Motora	Linha de Produção
Comprimento (m):	1000.0	Comprimento (m):	1000.0	Diâmetro (pol):	0.75
Rugosidade (mm):	0.132	Rugosidade (mm):	0.132		Pressão no separador (psig):
Diâmetro interno (pol):	1.995	Diâmetro interno (pol):	4.95		45.0
Diâmetro externo (pol):	2.375	Diâmetro externo (pol):	5.5		
Peso (lb/ft):	4.7	Peso (lb/ft):	15.5		

Reservatório		Pistão		Fluidos		Condições Iniciais	
Pressão estática (kgf/cm²):	50.0	Eficiência de Vedação (%):	90.0	Líquido BSW (%):	0.5	Tempo de válvula aberta (s):	600.0
Vazão de testes (m³/dia):	2.3	Comprimento (m):	0.45	Óleo AP:	37.0	Tempo de válvula fechada (s):	585.0
Pressão de testes (kgf/cm²):	25.0	Massa (kg):	4.48	Água SG:	1.01	Tempo de pós fluxo (s):	60.0
RGL:	595.0	Diâmetro (pol):	1.95	Gás SG:	0.8	Comprimento inicial da golfada (m):	15.3
				Gás Gama:	1.21	Pressão no topo do anular (psig):	90.0

Opções de amostragem		Passos de integração	
Subida da golfada:	10000.0	Subida da golfada:	10.0
Produção da golfada:	1000.0	Produção da golfada:	10.0
Pós fluxo:	10000.0	Pós fluxo:	10.0
Buildup Gás:	10000.0	Buildup Gás:	10.0
Buildup Gás->Líquido:	10000.0	Buildup Gás->Líquido:	10.0
Buildup Líquido:	0.0	Buildup Líquido:	10.0

Fechar Confirmar

Figura 3.4: Definições iniciais para a execução do método *plunger lift*

executado podendo ser pausado e resumido ao comando do utente. Caso não ocorram problemas com o poço as variáveis seguem um aspecto recorrente devida a natureza cíclica do método.

Algumas variáveis importantes para um ciclo completo do método *plunger lift* devem ser impressas em um arquivo de texto separado para análise na finalização do sistema pelo usuário. Estas variáveis seriam: tempo total do ciclo e de cada uma das suas etapas, tempo da válvula aberta e fechada, velocidade média do pistão na fase de subida, pressão máxima e mínima do anular, volume de produção no ciclo, o total de líquido produzido até o momento, velocidade de impacto do pistão e o tempo exato da chegada do pistão à superfície. Estes valores são únicos em cada ciclo do método e será utilizado no estudo da comparação entre diferentes controladores.

3.4 Implementação de controladores

A implementação e integração dos variados tipos de controladores ao simulador devem ser planejados de modo simples e de forma organizada. Este planejamento envolve um estudo nos padrões de projeto, que representam as melhores formas de arquitetura de *software* para resolução de diversos tipos de problemas. Uma análise de UML (*Unified Modelling Language*) é recomendada para garantir por onde a informação será transportada entre as *threads*, principalmente no diagrama de classe.

O padrão de projeto que é utilizada para organização da implementação destes controladores é chamada de *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 cliente 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 3.5, fornecendo uma interface comum para todos os algoritmos, a implementação de cada um dos algoritmos e o objeto contexto para utilizar os algoritmos.

Os tipos de controladores devem ser armazenados em um diretório separado com cada

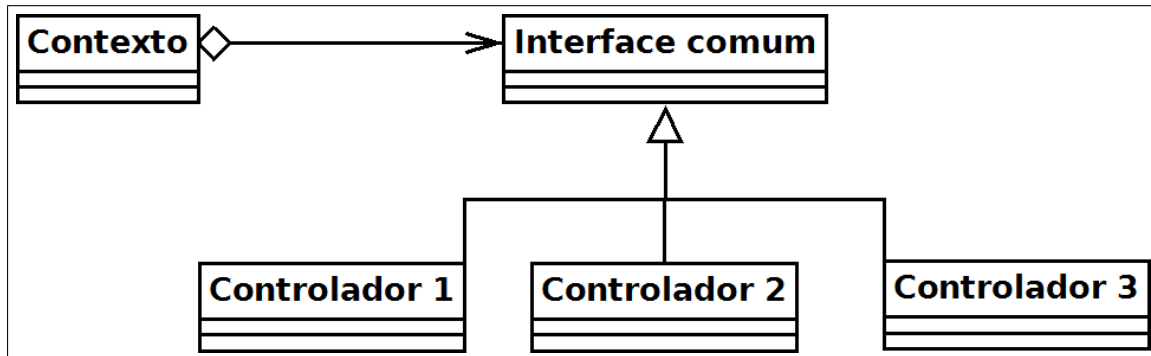


Figura 3.5: Estrutura do padrão de projeto *Strategy* para o simulador *plunger lift*

classe representando um controlador diferente e cada controlador deve estender de uma classe com atributos e funções padrões com que todo controlador deve implementar. A simulação deve ser selecionada somente um controlador para cada execução. A simulação necessita ser finalizada para testar outro controlador. Estes controladores fazem parte do processo contendo o modelo matemático, alterando suas variáveis ou não durante a execução do processo.

Para cada etapa do método *plunger lift*, existe uma função associada no modelo matemático e em cada uma dessas funções existe uma iteração que executa numerosos cálculos diversas vezes até que seja o momento de sair da iteração e executar outra etapa do método. Em cada iteração de qualquer das etapas é chamada a função do controlador selecionado de checagem, em seguida o objeto do controlador verifica as condições do poço e decide se modifica ou não certas variáveis do poço. Dessa maneira os cálculos e iterações do modelo não necessitam passar por adaptações no código e o controlador pode modificar as variáveis do poço em certas partes contidas no ciclo do referido método, facilitando a programação e o entendimento do funcionamento da execução do *software*.

Capítulo 4

Validação do Simulador

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 [do Amaral 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 4.1 mostra os dados do poço de petróleo que foram retiradas as saídas e a tabela 4.2 compara as saídas fornecidas com as saídas geradas pelo simulador deste trabalho.

Foi inserido a configuração no simulador de acordo com os valores mostrados na tabela 4.1 e adotado alguns valores para parâmetros não informados (figura 4.2), 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 4.2 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 4.1.

Observa-se a alta concordância entre os dados fornecidos pelo modelo e pelo simulador, verificando 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 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 comparação dos dados

Tabela 4.1: 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 4.2: Comparação entre as saídas fornecidas pelo poço da tabela 4.1 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*	$\frac{ps}{min}$	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

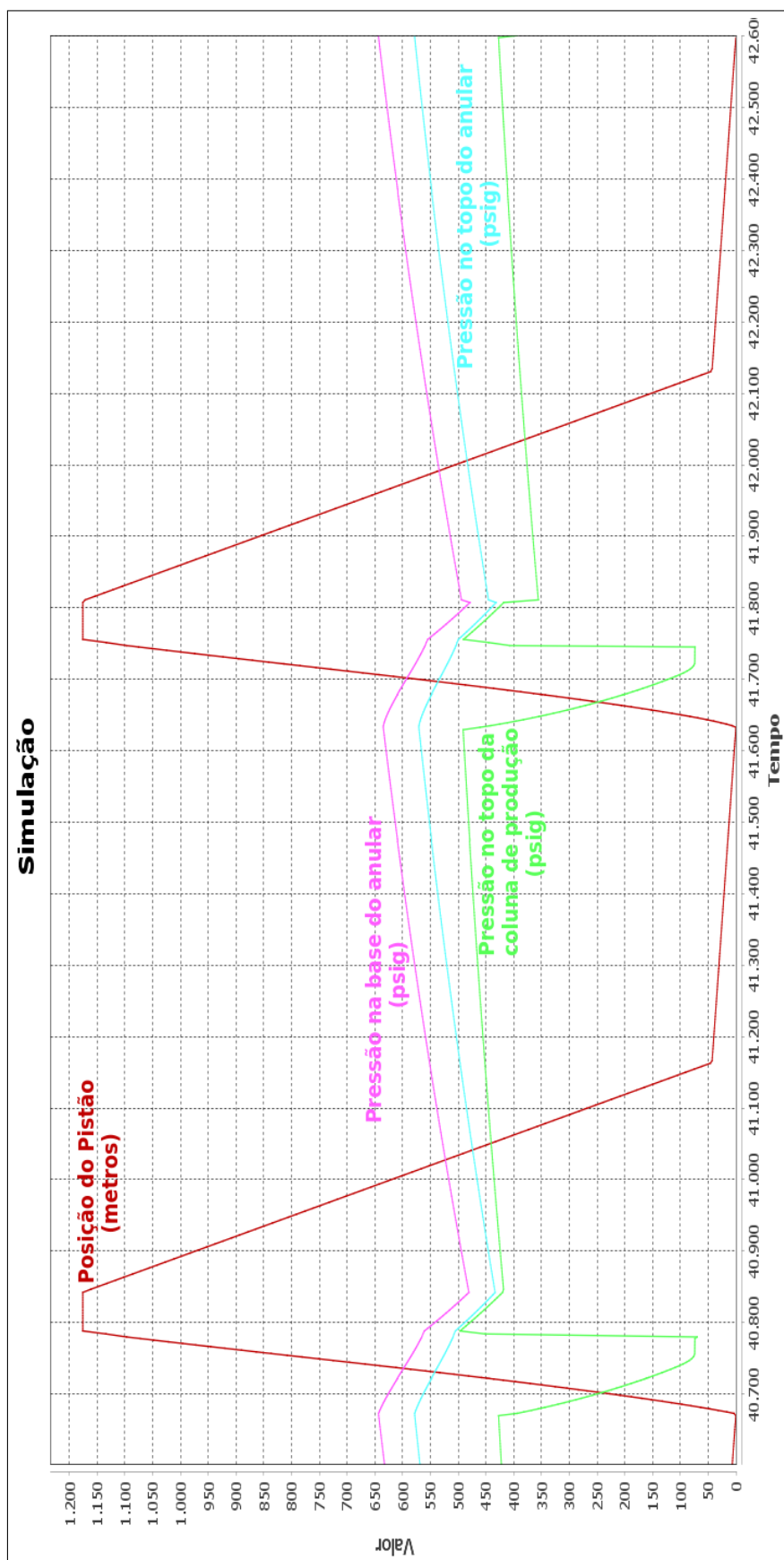


Figura 4.1: Parte final da simulação realizada para a validação

Coluna de Produção Comprimento (m): 1176.0 Rugosidade (mm): 0.25908 Diâmetro interno (pol): 1.995 Diâmetro externo (pol): 2.375 Peso (lb/ft): 4.7				Anular Comprimento (m): 1176.0 Rugosidade (mm): 0.132 Diâmetro interno (pol): 4.95 Diâmetro externo (pol): 5.5 Peso (lb/ft): 15.5			
Válvula Motora Diâmetro (pol): 0.75				Linha de Produção Pressão no separador (psig): 70.0			
Reservatório Pressão estática (kgf/cm²): 61.4 Vazão de testes (m³/dia): 2.3 Pressão de testes (kgf/cm²): 26.0 RGL: 949.0				Pistão Eficiência de Vedação (%): 90.0 Comprimento (m): 0.45 Massa (kg): 3.6 Diâmetro (pol): 1.95			
Fluidos Líquido BSW (%): 0.0 Óleo API: 45.0 Água SG: 1.07 Gás SG: 0.75 Gás Gama: 1.21				Condições Iniciais 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			
Opções de amostragem 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				Passos de integração 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				<div> <div>Confirmar</div> <div>Fechar</div> </div>			

Figura 4.2: Configuração do poço para a realização do teste de simulação

e análise dos resultados obtidos.

Capítulo 5

Resultados

Após o desenvolvimento de um sistema, é necessário vários testes para verificação da exatidão dos valores calculados e se o andamento ocorre sem travas ou erros em tempo de execução. O desenvolvedor deve realizar diversos testes com algumas configurações diferentes de uso para investigar possíveis falhas que venham tornar o sistema inoperante. Alguns dos testes realizados são explicados a seguir e afirmam o funcionamento corretamente do método *plunger lift*.

O *software* simulador do método de elevação artificial *plunger lift* explicado no capítulo 3 foi construído e testado para um poço com valores mostrados na figura 3.4. Os resultados foram satisfatórios no momento em que a simulação mostra um comportamento cíclico evidenciando o método de estudo. Podem-se observar as pressões sendo incrementadas durante a fase de *build-up* e sendo decrementadas nas outras fases. Também observa-se o comportamento do pistão em todas as etapas quando o mesmo se dirige à superfície e ao fundo do poço durante cada ciclo. A figura 5.1 mostra um exemplo de uma simulação durante 3 ciclos completos (apresentando todas as etapas) com as principais variáveis do método, passível de obter uma ampliação em qualquer área deste gráfico usando o mouse.

Nos ciclos mostrados na figura 5.1 foram obtidos alguns valores via arquivo de texto sobre variáveis de cada um destes ciclos. Estes valores servem para diversos propósitos, como a comparação de produção ou de velocidade do pistão durante a fase de subida. As variáveis e seus valores coletados durante a simulação estão expressados na tabela 5.1 com suas respectivas unidades de medição.

Ao modificar algumas variáveis exploráveis no simulador, verifica-se mudanças significativas no funcionamento do método e comportamentos diversos no processo. Ao acrescentar o tempo de pós-fluxo do método em 120 segundos, tornando a duração da etapa total em 180 segundos, verifica-se o comportamento das pressões dentro do poço. Durante a fase de pós-fluxo as pressões no topo da coluna de produção, na base e no topo do anular caem de forma consideravelmente maior que na etapa de subida do pistão. Isso é consequência do atingimento do pistão na superfície e a possibilidade do gás que há dentro do poço sair pela linha de produção sem obstáculos. Ao não modificar o tempo de válvula fechada ao variar o tempo de pós-fluxo, verifica-se também que o pistão não consegue chegar ao fundo do poço, tornando a produção de líquido do poço menor. Como durante a fase de *afterflow* o poço libera gás, o poço perde pressão e torna a viagem do pistão à superfície mais lenta, diminuindo a velocidade média e o impacto do pistão na

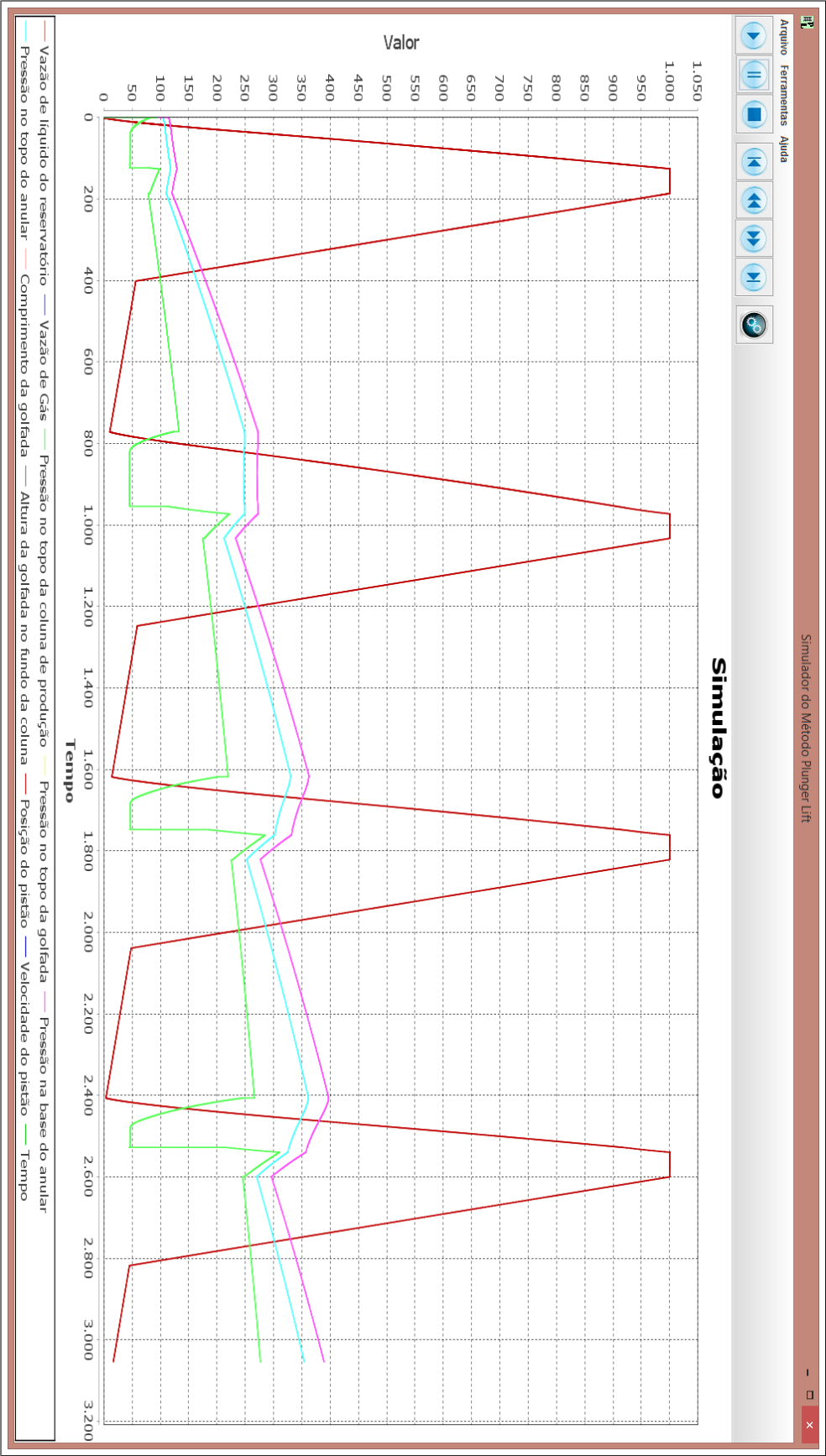


Figura 5.1: Exemplo de uma execução bem sucedida durante 3 ciclos completos com configuração do poço padrão

Tabela 5.1: Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.1

Característica	Valores		
	Ciclo nº1	Ciclo nº2	Ciclo nº3
Duração da etapa Subida(s)	123,74	183,1	129,97
Duração da etapa Produção(s)	2,45	18,55	13,49
Duração da etapa <i>Afterflow</i> (s)	60	60	60
Duração da etapa <i>Build-up</i> (s)	585,02	585,02	585,02
Duração do ciclo completo(s)	771,21	846,67	788,48
Volume de produção no Ciclo(barril)	0,193	1,19	1,102
Total produzido pelo poço(barril)	0,193	1,383	2,484
Tempo de viagem do pistão(s)	128	204	145
Média de velocidade do pistão($\frac{m}{s}$)	7,759	4,899	6,851
Velocidade de impacto do pistão($\frac{m}{s}$)	5,778	6,845	8,098

Tabela 5.2: Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.2

Característica	Valores		
	Ciclo nº1	Ciclo nº2	Ciclo nº3
Duração da etapa Subida(s)	123,74	183,23	142,86
Duração da etapa Produção(s)	2,45	19,09	15,51
Duração da etapa <i>Afterflow</i> (s)	180	180	180
Duração da etapa <i>Build-up</i> (s)	585,02	585,02	585,02
Duração do ciclo completo(s)	891,21	967,33	923,39
Volume de produção no Ciclo(barril)	0,193	1,20	1,15
Total produzido pelo poço(barril)	0,193	1,398	2,548
Tempo de viagem do pistão(s)	128	204	160
Média de velocidade do pistão($\frac{m}{s}$)	7,759	4,884	6,219
Velocidade de impacto do pistão($\frac{m}{s}$)	5,778	6,798	7,574

chegada à superfície. Toda a simulação descrita neste parágrafo pode ser vista na figura 5.2 e os valores de certas variáveis nos ciclos simulados são descritos na tabela 5.2.

Logo, quando o operador deseja diminuir a velocidade do pistão para decrementar a força de impacto do pistão ao chegar à superfície, deve-se aumentar o tempo de pós-fluxo para obter sucesso no resultado. Mas quando o operador quer o oposto do descrito, deve-se aumentar o tempo de válvula fechada. Com um maior tempo de válvula fechada, o poço deve acumular mais energia para, quando for a etapa de subida do pistão, impulsionar o êmbolo com maior força, aumentando a sua velocidade média e de impacto consideravelmente. Com um tempo de válvula fechada suficientemente alto, garante-se a chegada do pistão ao fundo do poço mantendo a produção de líquido alta trazendo toda a golfada formada no fundo do poço para a superfície. O aumento da velocidade pela maior pressão dentro do poço é contrabalanceada com o maior peso da golfada que o êmbolo deve carregar pela coluna de produção. A execução da simulação com um tempo de válvula fechada ajustado para 900 segundos pode ser observada pela figura 5.3 e seus valores

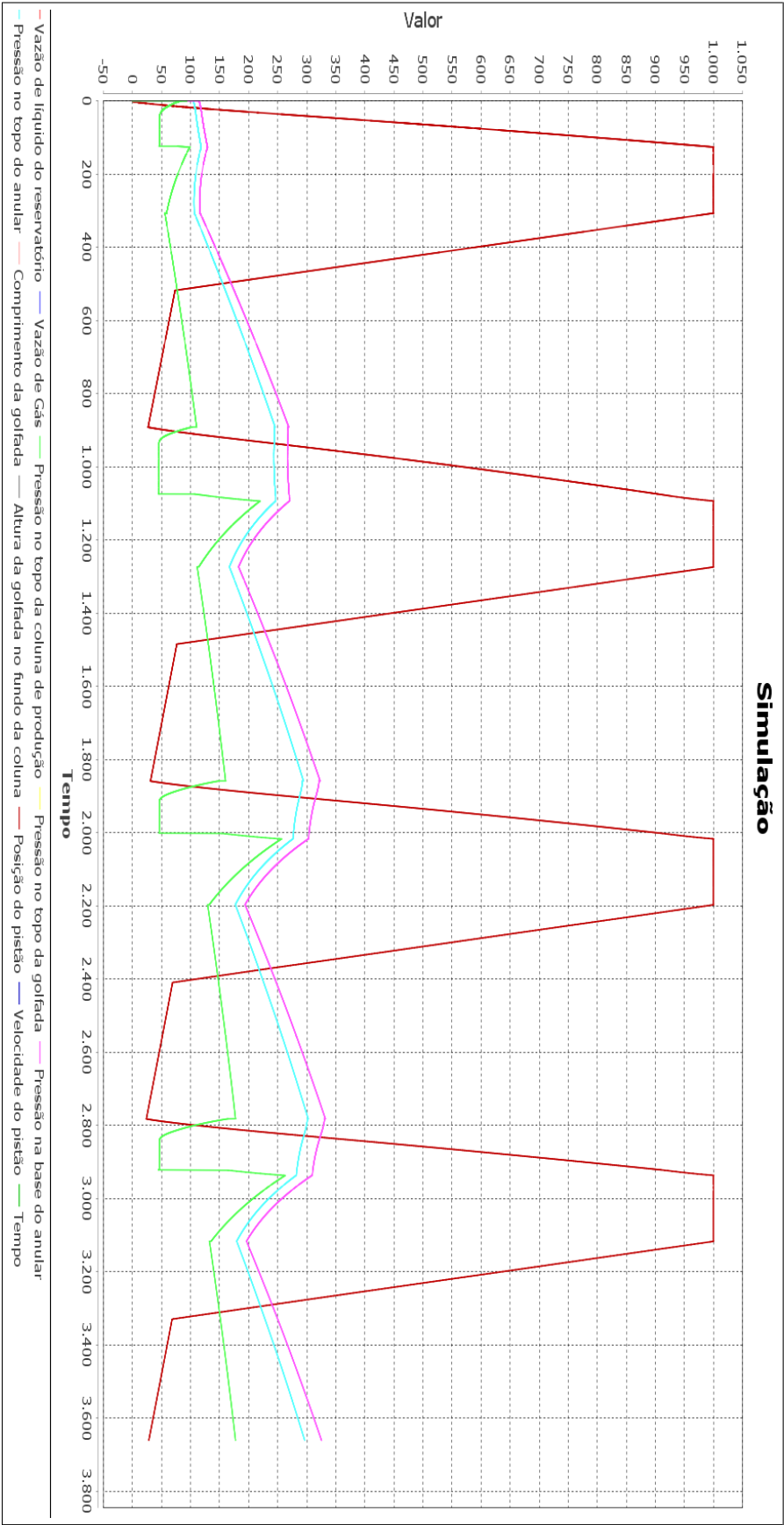


Figura 5.2: Simulação de um poço onde o tempo da etapa de *afterflow* foi alterado para 180 segundos

Tabela 5.3: Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.3

Característica	Valores		
	Ciclo nº1	Ciclo nº2	Ciclo nº3
Duração da etapa Subida(s)	123,74	210,49	140,65
Duração da etapa Produção(s)	2,45	28,14	19,12
Duração da etapa <i>Afterflow</i> (s)	60	60	60
Duração da etapa <i>Build-up</i> (s)	900	900	900
Duração do ciclo completo(s)	1086,21	1198,65	1119,79
Volume de produção no Ciclo(barril)	0,193	1,79	1,60
Total produzido pelo poço(barril)	0,193	1,981	3,581
Tempo de viagem do pistão(s)	128	240	162
Média de velocidade do pistão($\frac{m}{s}$)	7,759	4,149	6,164
Velocidade de impacto do pistão($\frac{m}{s}$)	5,778	7,662	9,095

Tabela 5.4: Valores dos 3 ciclos completos coletados durante a execução da figura 5.4

Característica	Valores		
	Ciclo nº1	Ciclo nº2	Ciclo nº3
Duração da etapa Subida(s)	123,74	290,35	260,87
Duração da etapa Produção(s)	2,45	49,83	47,73
Duração da etapa <i>Afterflow</i> (s)	450	450	450
Duração da etapa <i>Build-up</i> (s)	1200	1200	1200
Duração do ciclo completo(s)	1776,21	1990,2	1958,62
Volume de produção no Ciclo(barril)	0,193	2,824	2,843
Total produzido pelo poço(barril)	0,193	3,017	5,860
Tempo de viagem do pistão(s)	128	342	310
Média de velocidade do pistão($\frac{m}{s}$)	7,759	2,921	3,218
Velocidade de impacto do pistão($\frac{m}{s}$)	5,778	8,400	8,656

das variáveis de ciclo pela tabela 5.3.

O simulador também permite a alteração de mais variáveis do tempo de etapas simultaneamente dos que os executados nas figuras 5.2 e 5.3. Ao alterar o tempo de *afterflow* do ciclo para 450 segundos e o tempo de válvula fechada para 1200 segundos, obtêm-se a execução mostrada na figura 5.4 e suas variáveis de ciclo na tabela 5.4. Nesta execução, observa-se uma mudança na inclinação durante a trajetória do pistão (linha vermelha), na etapa de subida do pistão nos três ciclos mostrados, próximo da superfície. Isto é causado pelo amplo volume da golfada, que se formou durante a grande duração do ciclo, que o êmbolo traz consigo do fundo do poço. O desvio da golfada para a linha de produção torna-se um grande obstáculo para o êmbolo atingir a superfície. Então quando todo o volume da golfada foi produzido e não há mais obstáculos para o pistão, o mesmo aumenta sua velocidade consideravelmente até a superfície.

Estes resultados exemplificam os tipos de simulações que podem ser realizadas com este simulador e que conclusões pode-se tirar do gráfico formado e dos valores de suas

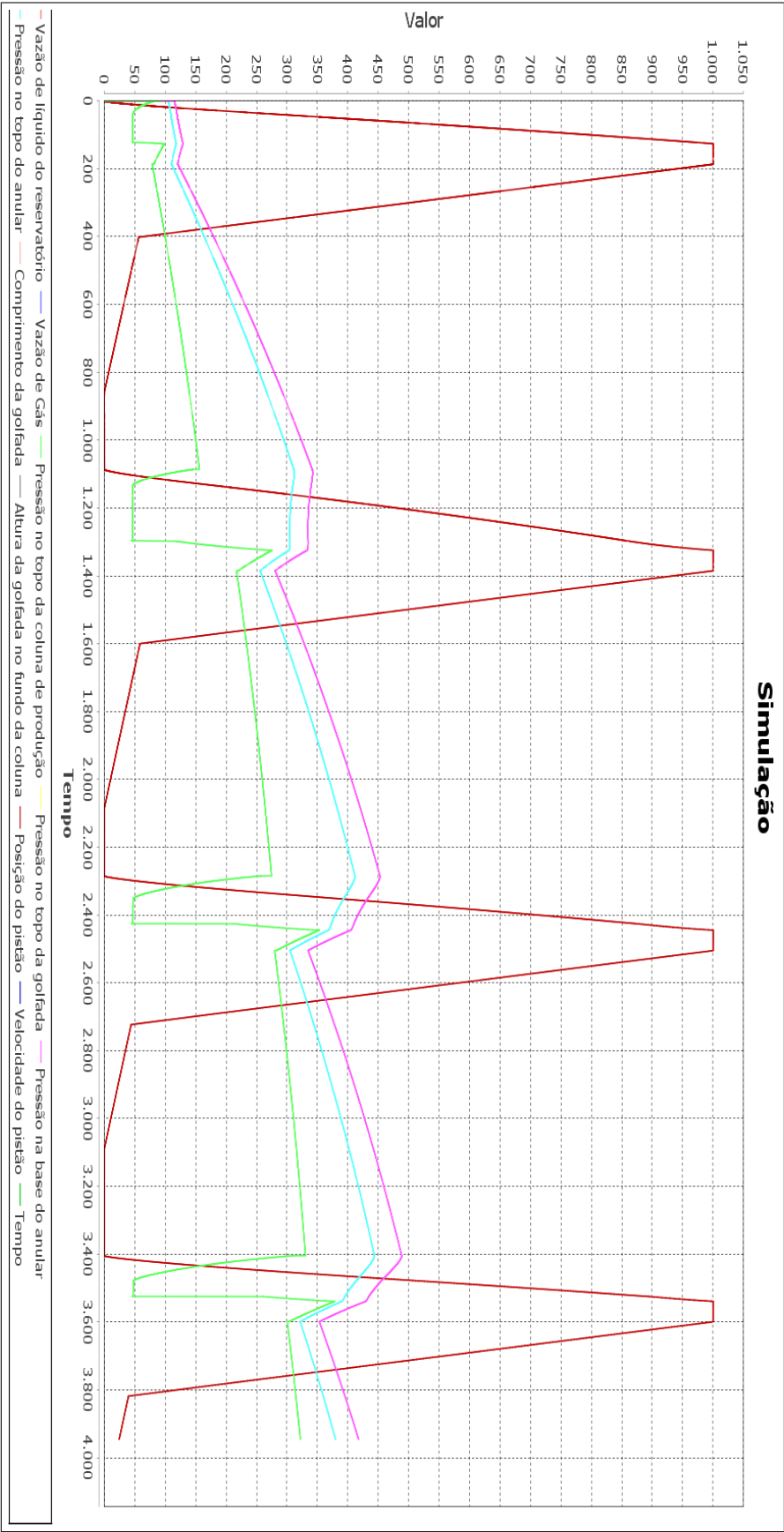


Figura 5.3: Simulação de um poço onde o tempo da etapa de *build-up* foi alterado para 900 segundos

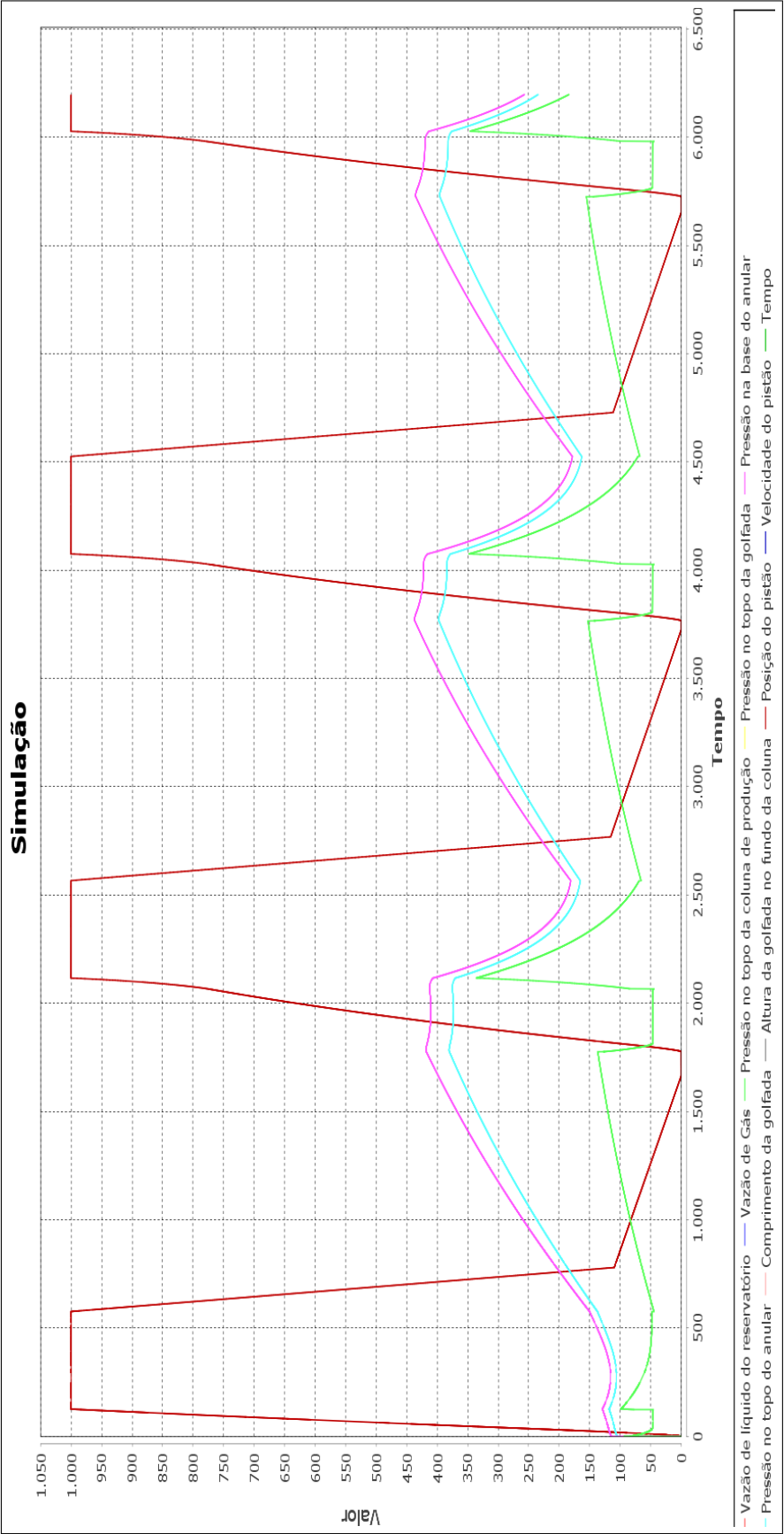


Figura 5.4: Simulação de um poço onde o tempo da etapa de *build-up* foi alterado para 1200 segundos e a etapa de pós-fluxo para 450 segundos

variáveis de ciclo. Dependendo dos valores dos tempos de cada etapa do método, a simulação pode seguir diversos caminhos, otimizados ou não. De acordo com os resultados coletados durante todo projeto, o simulador segue conforme o esperado apresentando comportamento adequado e execução suave em processadores medianos.

5.1 Controle e sua função no *plunger lift*

Existem alguns algoritmos, como os explicados na seção 2.6, que melhoram o processo e/ou garantem o funcionamento adequando o sistema a novas características ou até pará-los em casos de falta de segurança. Estes algoritmos contêm parâmetros que, com o maior conhecimento do operador sobre o processo, o controle pode ser melhor apropriado para uma certa situação. Os parâmetros do controle irão depender da característica do poço como RGL (Razão gás-líquido) e profundidade do poço, por exemplo.

Ao longo do tempo da exploração de um poço o RGL do reservatório vai diminuindo, necessitando que o controle sofra alterações para manter a performance do sistema, funcionando no processo cíclico do método *plunger lift*. Com o RGL do poço menor, o tempo de pós-fluxo deve ser menor e o tempo de acúmulo de pressão deve ser maior para que seja possível que o pistão chegue na superfície todos ciclos.

Pode existir casos de poços que, caso não houver controle ou conhecimento prévio do método, os tempos de abertura e fechamento de válvula não sejam adequados e levam o poço a um afogamento, ou seja, o pistão não chega na superfície com o óleo acumulado no fundo do poço. Uma simulação com as características mostradas na figura 5.5 foi realizada e o simulador obteve como resultado o mostrado na figura 5.6. Na simulador pode-se perceber que no momento da subida do pistão, o mesmo não consegue chegar à superfície e então pula a etapa de pós-fluxo para o *build-up* e o líquido acumulado no fundo do poço se torna maior e mais pesado, de forma que o pistão não é capaz de chegar na superfície nos próximos ciclos.

O controle por temporização e por pressão de revestimento resolve este transtorno com algoritmos explicados nas subseções 2.6.1 e 2.6.2. Enquanto que o controle por temporização tem três parâmetros (mínimo tempo de viagem do pistão, máximo tempo de viagem do pistão e o valor de modificação de tempo de pós-fluxo e *build-up*), o controle por pressão de revestimento tem dois parâmetros adicionais (máxima pressão de revestimento e mínima pressão de revestimento). A figura 5.7 e 5.8 mostram o resultado da aplicação destes dois controladores, respectivamente, na configuração do poço dada pela figura 5.5. Os parâmetros utilizados nos controladores estão descritos nas tabela 5.5 e estes valores foram adotados a partir de testes no simulador de forma que permitisse que o método seguisse os ciclos normalmente

O resultado dos dois controladores foram similares devido aos valores de máximo e mínimo tempo de viagem do pistão aproximados definidos para os controladores. É possível identificar um controle da pressão de revestimento maior pelo controlador que recebe este nome, evitando que durante a fase de crescimento de pressão, ela não cresça até pontos críticos para o equipamento utilizado. De posse deste resultado, pode-se verificar a importância do uso de controladores para tornar o sistema mais confiável e seguro para a exploração de recursos naturais neste método de elevação artificial.

Coluna de Produção Comprimento (m): 1176.0 Rugosidade (mm): 0.25908 Diâmetro interno (p...): 1.995 Diâmetro externo (...): 2.375 Peso (lb/ft): 4.7				Anular Comprimento (m): 1176.0 Rugosidade (mm): 0.132 Diâmetro interno (p...): 4.95 Diâmetro externo (...): 5.5 Peso (lb/ft): 15.5			
Válvula Motora Diâmetro (pol): 0.75				Linha de Produção Pressão no separa...: 70.0			
Reservatório Pressão estática (k...): 61.4 Vazão de testes (m...): 2.3 Pressão de testes (...): 26.0 RGL: 500				Pistão Eficiência de Vedaç...: 90.0 Comprimento (m): 0.45 Massa (kg): 3.6 Diâmetro (pol): 1.95			
Fluidos Líquido BSW (%): 0.0 Óleo API: 45.0 Água SG: 1.07 Gás SG: 0.75 Gás Gama: 1.21				Condições Iniciais Tempo de válvula a...: 600.0 Tempo de válvula fe...: 500 Tempo de pós fluxo...: 500 Comprimento inicia...: 15.3 Pressão no topo do...: 366.0			
Opções de amostragem Subida da golfada: 10000.0 Produção da golfada: 1000.0 Pós fluxo: 10000.0 Buildup Gás: 10000.0 Buildup Gás->Líquid...: 10000.0 Buildup Líquido: 0.0				Passos de integração Subida da golfada: 10.0 Produção da golfada: 10.0 Pós fluxo: 10.0 Buildup Gás: 10.0 Buildup Gás->Líquid...: 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				<div> <div>Confirmar</div> <div>Fechar</div> </div>			

Figura 5.5: Configuração de teste para a simulação de afogamento de um poço

Tabela 5.5: Parâmetros adotados nos controladores

Parâmetro	Temporização	Pressão de Revestimento
Máximo tempo de viagem do pistão	120 segundos	140 segundos
Mínimo tempo de viagem do pistão	80 segundos	90 segundos
Valor de alteração das durações das etapas de <i>build-up</i> e <i>afterflow</i> *	50 segundos	**
Máxima pressão de revestimento	**	620 psi
Mínima pressão de revestimento	**	400 psi
Valor de alteração nas pressões máxima e mínima de revestimento	**	20 psi

** não utiliza

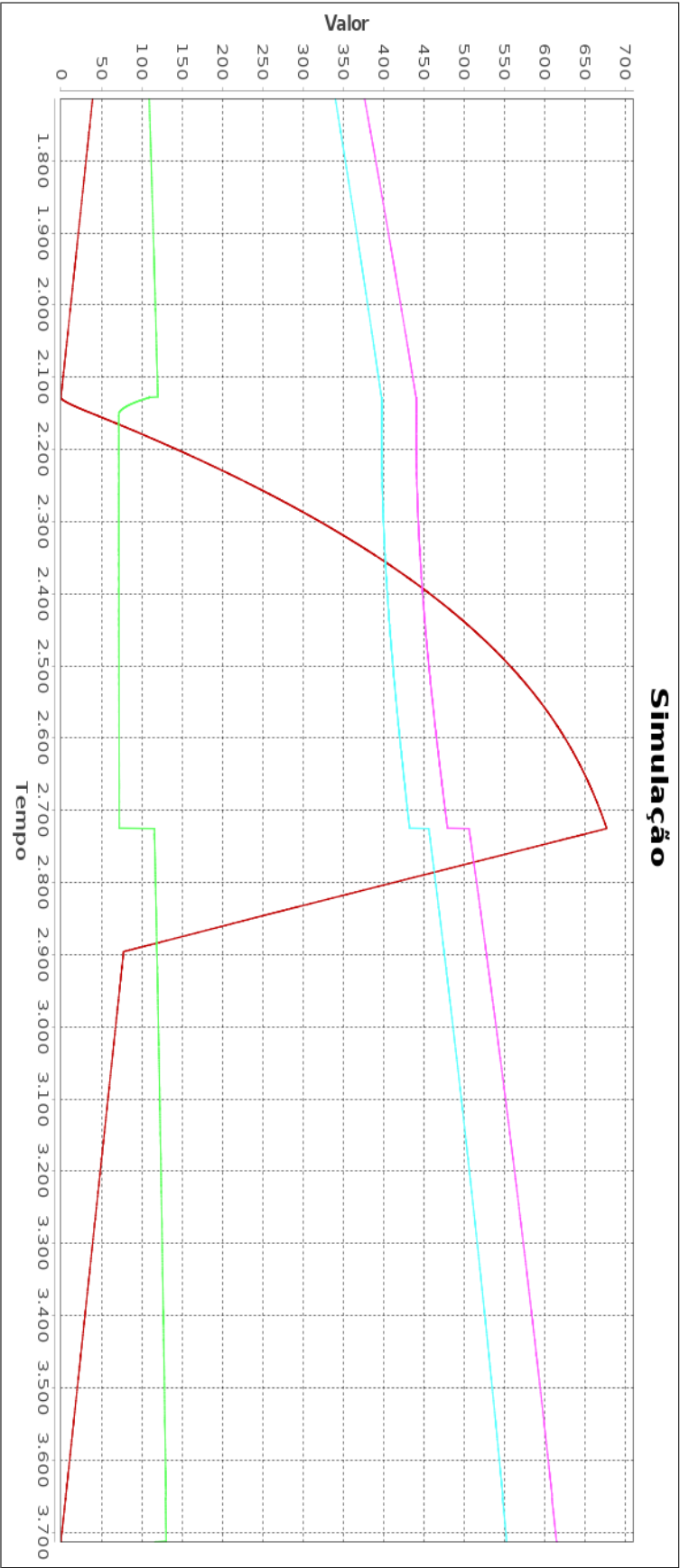


Figura 5.6: Simulação de um afogamento no método *plunger lift* no segundo ciclo

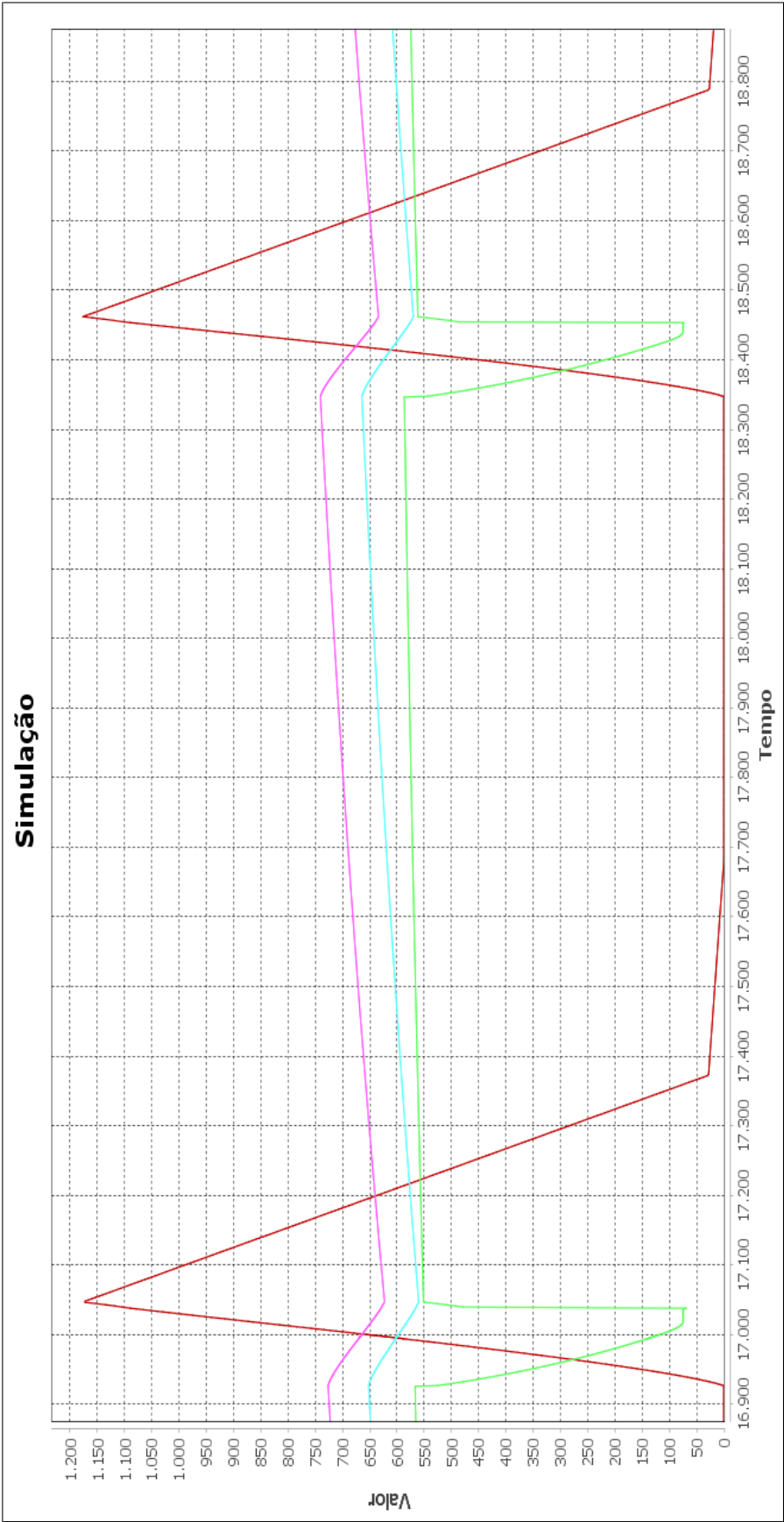


Figura 5.7: Correção do afogamento pelo controle por temporização

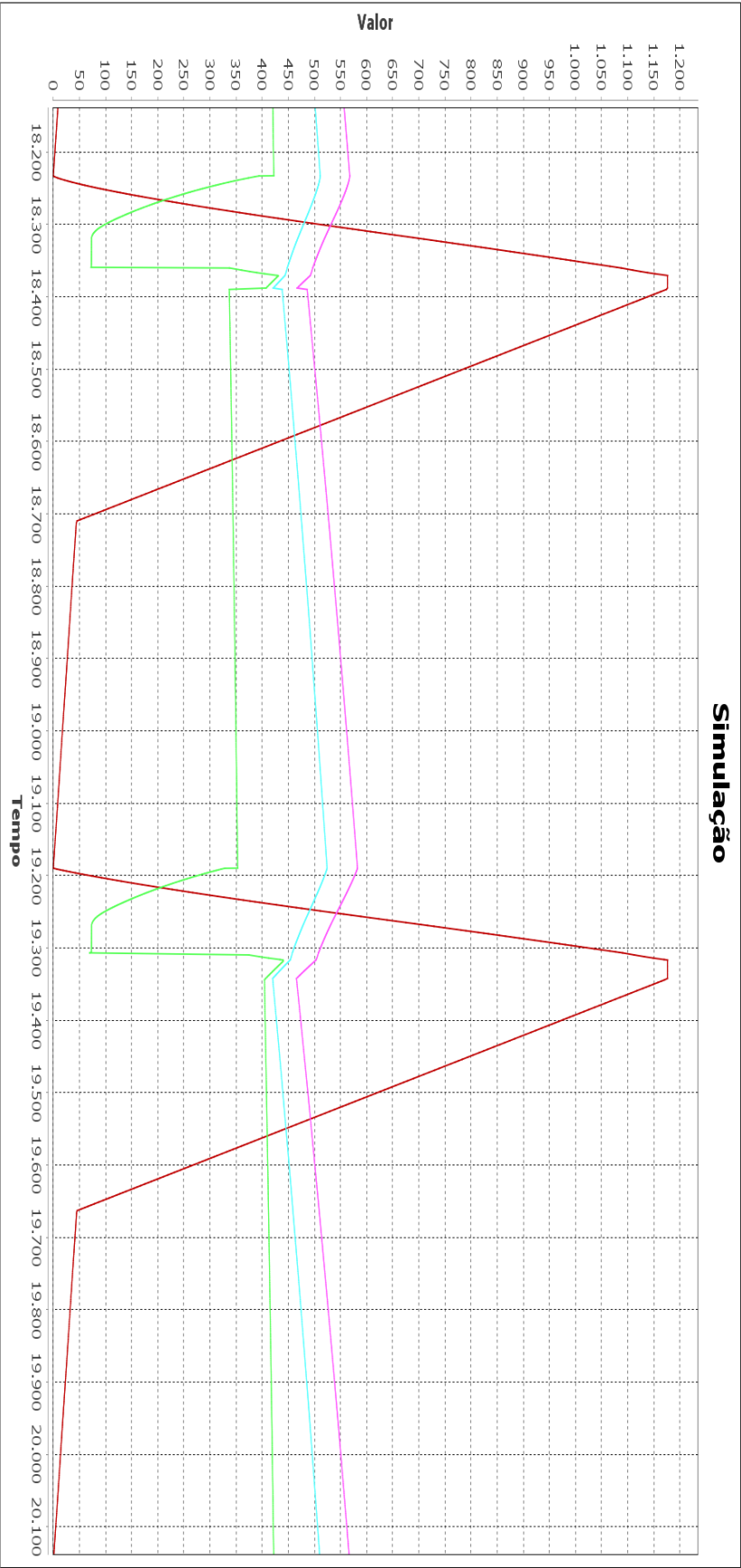


Figura 5.8: Correção do afogamento pelo controle por pressão de revestimento

Tabela 5.6: Parâmetros adotados nos controladores nas simulações das figuras 5.9 e 5.10

Parâmetro	Temporização	Pressão de Revestimento
Máximo tempo de viagem do pistão	150 segundos	150 segundos
Mínimo tempo de viagem do pistão	100 segundos	100 segundos
Valor de alteração das durações das etapas de <i>build-up</i> e <i>afterflow</i> *	20 segundos	**
Máxima pressão de revestimento	**	620 psi
Mínima pressão de revestimento	**	440 psi
Valor de alteração nas pressões máxima e mínima de revestimento	**	20 psi

** não utiliza

5.2 Comparativo entre as performances dos controladores

De acordo com a seção 5.1, os controladores são importantes pois mantêm o método funcionando no poço adequadamente. Todos os dois controladores exemplificados neste trabalho podem evitar o afogamento de um poço assegurando que o pistão alcance a superfície em todos os ciclos.

Apesar dos controladores terem mesma importância de manter o método progredindo sem transtornos, eles apresentam performances diferentes no que diz respeito à produtividade e à segurança do poço. Adotando a configuração do poço dada pela figura 4.2, foram realizadas algumas simulações para determinar parâmetros de forma a garantir produtividade e continuidade do sistema por um número indeterminado de ciclos. Após as simulações atingirem um estado de equilíbrio, ou seja, tenha se passado um grande espaço de tempo, foram capturadas as situações das figuras 5.9 e 5.10. Os dados recuperados das duas simulações através de impressão em arquivo e *log* do programa estão descritos na tabela 5.7 para comparação de resultados. Nestas duas simulações foi escolhido controlar o tempo de viagem do pistão entre 100 e 150 segundos, logo os parâmetros para cada controlador está expresso na tabela 5.6.

Observa-se, pelos dados obtidos no simulador *plunger lift*, uma menor produtividade por conta do controle por pressão de revestimento, ocorrida pelo fato do atingimento da pressão máxima de revestimento durante a etapa de crescimento de pressão que abre a válvula motora antes que o pistão chegue ao fundo do poço. Por outro lado, dependendo da velocidade na qual o pistão deve alcançar na etapa de subida do pistão, o comportamento da simulação sofre modificações. Por este motivo, o tempo que o sistema passa na etapa de produção de líquido é menor que a do controlador por temporização. Nota-se também que a janela de pressão de revestimento, inicialmente definida entre 440 e 620 psi, equilibrou-se entre 400 e 570 psi pelo controlador do sistema. Percebe-se ainda a menor duração do ciclo no controle por pressão de revestimento, a qual é vantajoso no ponto que quanto mais ciclos em um poço de *plunger lift* no mesmo intervalo de tempo, o pistão mantém as paredes da coluna de produção com menos óleo e mais limpas, aumentando a durabilidade do equipamento.

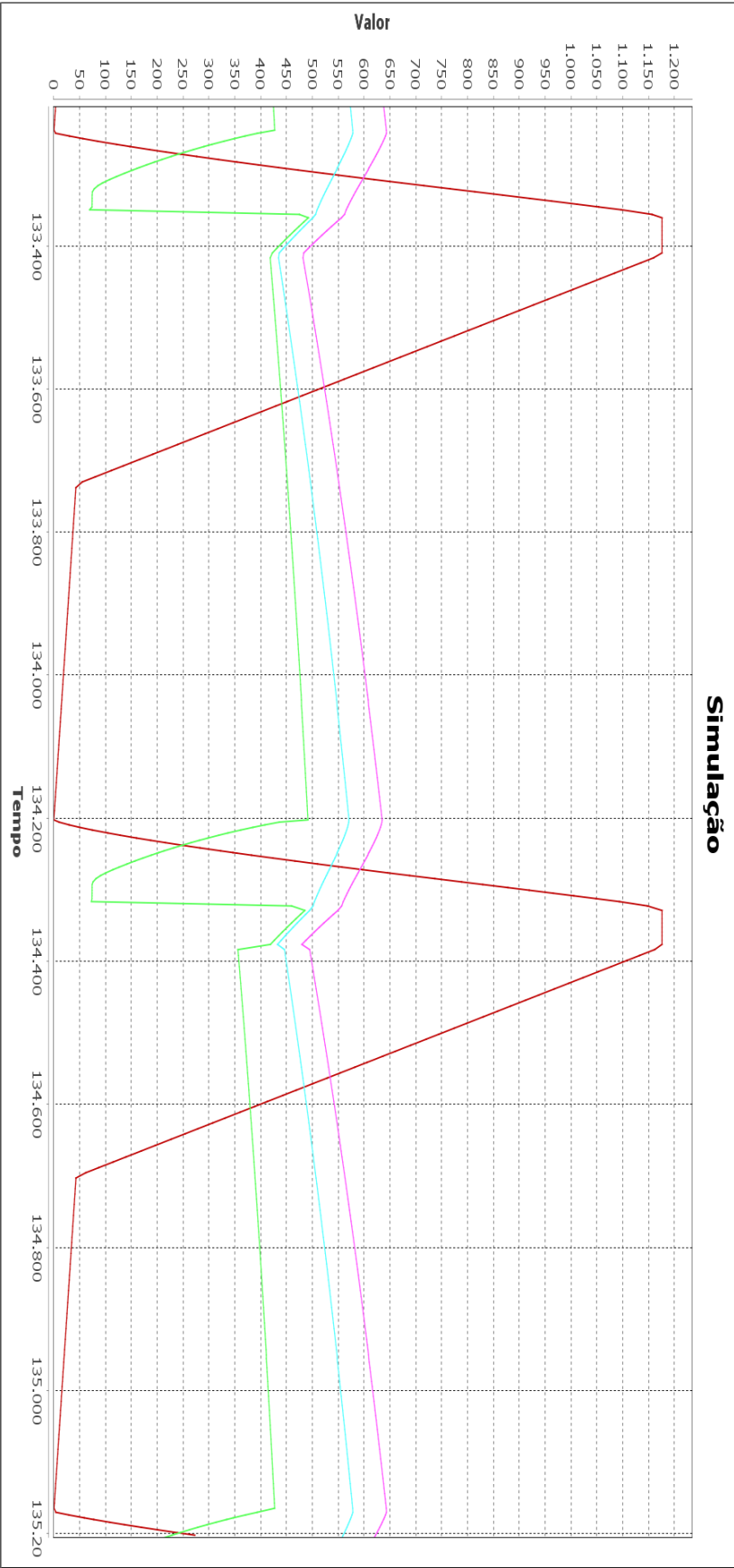


Figura 5.9: Simulação com o controlador do tipo temporizador

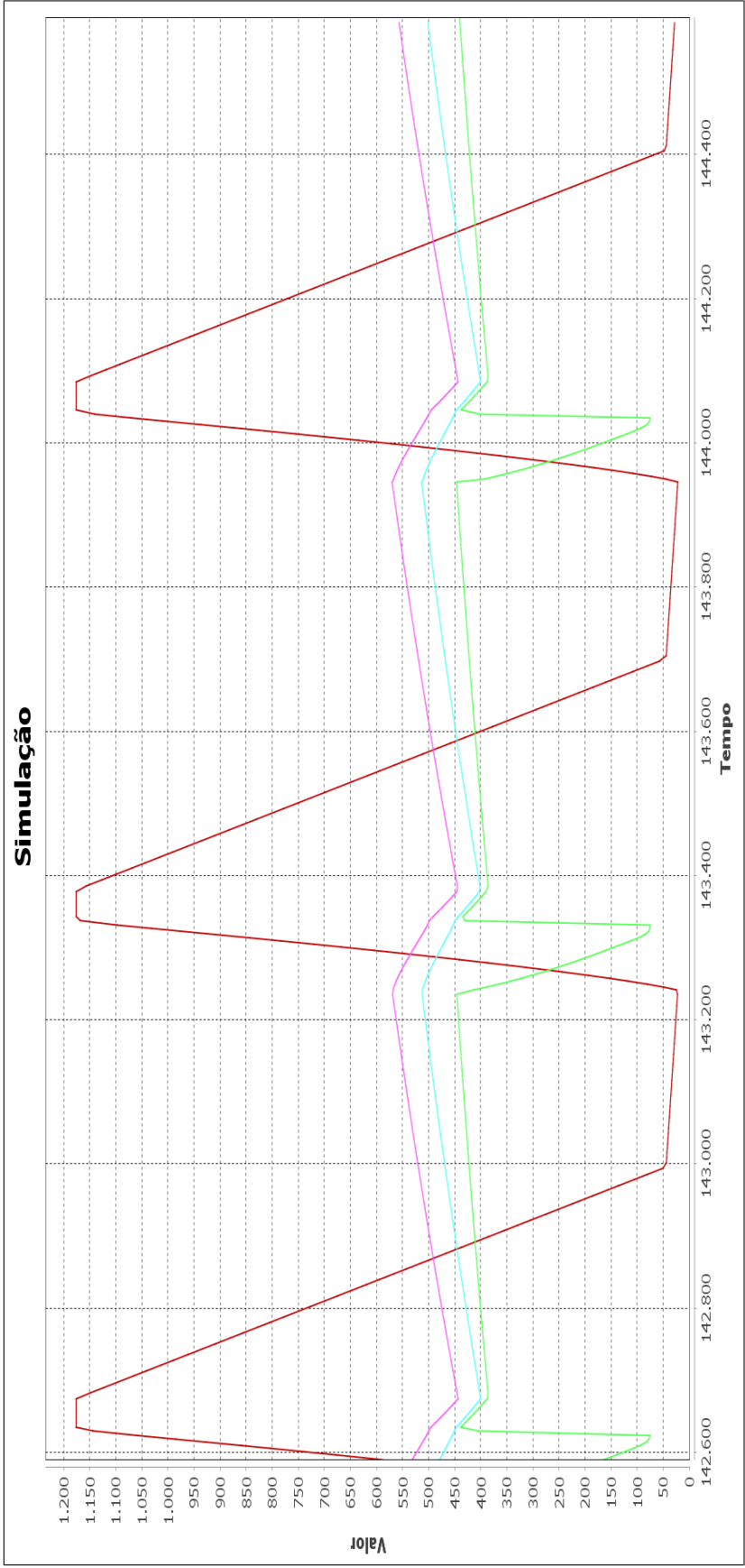


Figura 5.10: Simulação com o controlador do tipo pressão de revestimento

Tabela 5.7: Dados recuperados das simulações das figuras 5.9 e 5.10 referentes ao ciclo de número 130

Parâmetro	Temporização	Pressão de Revestimento
Duração da etapa Subida(s)	107,81	93,05
Duração da etapa Produção(s)	8,28	4,51
Duração da etapa <i>Afterflow</i> (s)	54	41,46
Duração da etapa <i>Build-up</i> (s)	790	566,12
Duração do ciclo completo(s)	960,16	705,14
Volume de produção no Ciclo(barril)	0,9914	0,56
Total produzido pelo poço(barril)	130,65	73,49
Tempo de viagem do pistão(s)	119	100
Média de velocidade do pistão($\frac{m}{s}$)	9,87	11,69
Velocidade de impacto do pistão($\frac{m}{s}$)	11,50	10,81
Tempo decorrido desde o início(hora)	35,13	25,68
Pressão mínima no anular (psi)	433,58	399,99
Pressão mínima da coluna de produção (psi)	69,59	75,28
Pressão máxima da coluna de produção (psi)	496,75	446,20
Pressão mínima de revestimento no controlador (psi)	*	400
Pressão máxima de revestimento no controlador (psi)	*	570

* não utiliza

Para o controlador por temporização, quanto maior o tempo de viagem do pistão, ele tende a aumentar consideravelmente o tempo de pós-fluxo deixando o tempo de crescimento de pressão somente o necessário para que o pistão chegue ao fundo do poço enquanto que o controlador por pressão de revestimento não modifica o tempo de pós-fluxo não conseguindo alcançar o tempo de viagem do pistão proposto para valores de RGL do reservatório muito altas.

Constata-se que o controlador por temporização é mais eficaz no sentido de adequar os tempos das etapas correspondentes afim de atingir o intervalo definido pelo operador da janela de tempo de viagem do pistão na etapa de subida do pistão pois ele modifica diretamente as durações das etapas. Em contrapartida, o controlador por pressão de revestimento, dependendo do valor requisitado de tempo de viagem do pistão e das características do reservatório, não é possível atingir a duração do tempo de viagem do pistão definida. Isso acontece devido ao fato que a simples modificação do intervalo da pressão máxima e mínima do revestimento não possibilita atingir certas condições dentro do poço, é necessário a modificação dos tempos de pós fluxo e crescimento do pistão. Apesar desta situação, o controlador por pressão de revestimento é mais seguro para o poço por possibilitar a abertura do poço em casos que a pressão acumulada se torne extremamente alta a ponto do andamento do sistema tornar-se algo perigoso, a qual não é disponível no controlador por temporização.

Com os dados fornecidos pelo simulador deste projeto, pode-se observar o papel de cada um destes controladores como otimizador e estabilizador deste método de elevação artificial a depender de características do reservatório explorado.

Capítulo 6

Conclusões

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. Este método sem algoritmo para o controlador, mantém intervalos de tempo da válvula motora aberta e fechada fixos. Esses intervalos de tempo fixos prejudicam a produção do poço a longo prazo, podendo vir a afogar o poço e requerer uma maior atenção para que o pistão consiga retornar à superfície. O trabalho do operador exige uma atenção maior em casos que não exista um controlador, pois o mesmo deverá modificar os tempos da válvula aberta de acordo com as leituras de pressões dentro do poço ou o tempo de viagem do pistão.

A otimização da produção destes poços deve passar por uma fase de estudos que inclui o desenvolvimento do simulador com interface gráfica funcional e saída de dados para análise. Este estudo vai fornecer dados comparativos entre alguns métodos de controle para este método viabilizando implementação com mais segurança e objetividade em campo um controlador. Como o programa simula características do poço como profundidade e a razão gás-líquido, por exemplo, há maior precisão nos resultados aproximando a simulação de um poço real.

A escolha correta do controlador em companhia com equipamentos de medição precisos com alta qualidade traz benefícios para a produção daquele poço, também evitando problemas que podem ocorrer devido à má tomada de decisão do controlador. A comparação entre resultados de controladores em alguns tipos de poços diferentes é essencial para a escolha de um algoritmo compatível com a configuração do poço em campo, levando ao aprimoramento da utilização do método pela indústria.

Referências Bibliográficas

- do Amaral Baruzzi, Jose Octavio (1994), Modelagem do plunger lift convencional, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM, Campinas, SP.
- GAMMA, ERICH, R Helm, R Johnson & J Vlissides (2004), *Padrões de Projeto — Soluções Reutilizáveis de Software Orientado a Objetos*, Bookman, Porto Alegre.
- Javier, Fernandez (2012), ‘Java 7 concurrency cookbook’.
- of Air, United States. Environmental Protection Agency. Office & Radiation (2001), *Installing Plunger Lift Systems in Gas Wells*, Lessons learned from Natural Gas STAR Partners, U.S. Environmental Protection Agency, Air and Radiation.
<https://books.google.com.br/books?id=vqHRZwEACAAJ>
- Vieira, Plínio Altoé Costa (2009), Projeto de um sistema emulador de escoamentos e vaso de separação primária, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN.