



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET



COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PETRÓLEO – CCEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA VÁLVULA DE
GAS LIFT DO TIPO PILOTO DE 1 POLEGADA UTILIZANDO
TÉCNICAS DE CFD**

Luan Fonseca de Medeiros

Orientadora: Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Dezembro de 2015

LUAN FONSECA DE MEDEIROS

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA VÁLVULA DE
GAS LIFT DO TIPO PILOTO DE 1 POLEGADA UTILIZANDO
TÉCNICAS DE CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Orientadora – UFRN

Prof. Msc. Sérgio José Gonçalves e Silva
Membro Examinador – UFRN

Msc. Fábio Soares de Lima
Membro Examinador – PETROBRAS

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial meu pai, minha mãe e meus irmãos, por todo apoio, incentivo, disponibilidade e por estarem sempre dispostos a se sacrificar por mim.

À minha orientadora, Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, pelo ensinamento, confiança e disponibilidade em ajudar.

Ao companheiro de projeto, colega de sala e amigo Gabriel Bessa de Freitas Fuezi Oliva, por toda colaboração e companheirismo ao longo da execução do trabalho.

À Maria Evane pela presença, apoio e carinho incondicional.

Aos demais amigos do LAUT, pelos momentos de dificuldade e de alegria que passamos juntos durante toda essa jornada.

Ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN) e membros do projeto AUTLEV, pela parceria para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Laboratório de Metrologia, em especial ao Professor Luiz Pedro pela contribuição e serviço de medição prestado.

Ao Professor Lúcio Fontes, pela contribuição na modelagem da válvula em CAD.

À Petrobras, pelo apoio ao projeto AUTLEV.

RESUMO

Gas Lift é um método de elevação artificial de petróleo onde gás é injetado continuamente com o objetivo de diminuir a componente hidrostática da perda de carga durante o escoamento do fluido através da coluna de produção, provocando uma diminuição no gradiente de pressão ao longo da tubulação. Outro método é a injeção de gás de forma intermitente elevando o fluido por meio de golfadas. O resultado é um aumento da vazão de produção. Este trabalho apresenta um modelo computacional para avaliar o escoamento através de uma válvula de *Gas Lift* do tipo piloto de 1 polegada. O modelo geométrico foi desenvolvido no ANSYS CFX, um programa comercial que utiliza técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Fluidodinâmica Computacional). Utilizou-se o programa para prever a vazão alcançada pela válvula no fluxo crítico. Com a finalidade de validar o modelo de simulação, os resultados computacionais foram comparados com um modelo experimental e apresentou resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Elevação Artificial, Válvula piloto, *Gas Lift*, CFD, Fluxo Crítico.

ABSTRACT

Gas lift is an artificial lift method which gas is injected in order to reduce the hydrostatic component of pressure drop for fluid flow through the tubing string, consequently requiring less bottom hole pressure. Gas Lift can be also intermittent, injecting gas in cycles, lifting oil slugs. The result is an increase fluid flow production. This work presents a computational model of a Gas lift pilot 1 inch valve developed in CAD and simulated on ANSYS CFX, a commercial software that utilize CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques. This software was utilized to predict the maximum flow the gas lift valve can reach on its choked flow. To validate this simulation model is necessary to compare the simulated results to experimental results.

Keywords: artificial lift, gas lift pilot valve, CFD, choked flow.

Sumário

| | |
|---|----|
| Sumário..... | 6 |
| 1. Introdução..... | 11 |
| 1.1. Objetivo Geral..... | 13 |
| 1.1.1. Objetivos específicos | 14 |
| 2. Aspectos Teóricos | 16 |
| 2.1. <i>Gas Lift</i> | 16 |
| 2.1.1. Equipamentos | 16 |
| 2.1.2. <i>Gas Lift</i> Contínuo (GLC) | 17 |
| 2.1.3. <i>Gas Lift</i> Intermitente (GLI) | 17 |
| 2.1.4. Válvulas de <i>Gas Lift</i> | 18 |
| 2.1.5. Fluxo Crítico | 20 |
| 2.2. Fluidodinâmica Computacional | 22 |
| 2.2.1 O Método dos volumes finitos | 23 |
| 2.2.2. Equações Governantes | 24 |
| 3. Metodologia e Desenvolvimento | 26 |
| 4. Resultados e Discussões..... | 36 |
| 5. Conclusão | 42 |
| Referências Bibliográficas..... | 44 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Poço operado por Gas Lift. | 13 |
| Figura 2 - Poço operando por GLI. | 18 |
| Figura 3 - Ilustração de uma Válvula de <i>Gas Lift</i> | 18 |
| Figura 4 - Fluxo Crítico atingido em teste computacional de uma válvula de gás. | 21 |
| Figura 5 - Fluxograma demonstrando as etapas para a solução de um problema em fluidodinâmica computacional (CFD) utilizando o ANSYS - CFX. | 23 |
| Figura 6 - Válvula desmontada. | 26 |
| Figura 7 - Partes constituintes da região modelada da válvula do tipo piloto. | 27 |
| Figura 8 - Vistas laterais (parte externa e interna) da válvula piloto em AutoCAD. | 27 |
| Figura 9 - Geometria simplificada da válvula do tipo piloto. | 28 |
| Figura 10 - Vista 3D da geometria simplificada da válvula no ANSYS 13.0. | 29 |
| Figura 11 - Domínio do fluido gerado no ANSYS CFX. | 29 |
| Figura 12 - Vista lateral da válvula de Gas Lift do tipo piloto. | 29 |
| Figura 13 - Malha da válvula do tipo piloto gerada no ANSYS CFX. | 30 |
| Figura 14 - Malha na região da válvula de retenção. | 30 |
| Figura 15 - Malha na região do pistão e entrada. | 30 |
| Figura 16 - Modificações na geometria. | 31 |
| Figura 17 - Visualização da entrada e saída da válvula. | 32 |
| Figura 18 - Variação da posição do pistão. | 33 |
| Figura 19 - Malha da válvula de orifício. | 34 |
| Figura 20 - Curvas da Válvula de <i>Gas Lift</i> do tipo piloto (vazão vs pressão de produção). | 36 |
| Figura 21 - Vazões obtidas no fluxo crítico para diferentes posições do pistão. | 37 |
| Figura 22 - Pistão posicionado a 0 mm, 7 mm e 14 mm. | 38 |
| Figura 23 - Comparação das curvas da válvula para diferentes pressões de injeção. | 39 |
| Figura 24 - Curvas da válvula de orifício simulada e da planta de testes. | 40 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Definições da simulação da válvula de Gas Lift. | 32 |
|--|----|

Lista de Símbolos e Abreviaturas

| | |
|-----------|--|
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> |
| CFD | <i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de fluido computacional) |
| GLC | <i>Gas Lift</i> Contínuo |
| GLI | <i>Gas Lift</i> Intermitente |
| h_{tot} | entalpia total |
| k | energia cinética turbulenta |
| M | vazão mássica |
| p | pressão |
| S | Termo fonte, representa força de campo ou de corpo |
| t | variável tempo |
| T | temperatura |
| U | velocidade |
| V | volume |

Letras gregas e operadores

| | |
|-----------|--|
| λ | Segundo coeficiente de viscosidade |
| ρ | massa específica |
| τ | tensor das tensões viscosas ou de fluxo do momento viscoso |
| \otimes | operador tensorial |
| \cdot | operador escalar |
| Δ | variação, intervalo |
| ∇ | operador gradiente |

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Poços de petróleo que, no início de sua vida produtiva, possuem energia suficiente para que os fluidos sejam produzidos naturalmente são chamados poços surgentes. Estes poços cumprem o pré-requisito básico para garantir a produção de um poço, que é possuir pressão de fundo maior do que a soma das perdas de carga que ocorrem ao longo do fluxo até a superfície. Quando esse pré-requisito não é cumprido, o poço para de produzir. Existem dois principais motivos que causam a morte de um poço: a pressão de fluxo no fundo do poço cai até não ser mais suficiente para superar as perdas de carga, ou as perdas de carga aumentam até superarem a pressão de fluxo no fundo do poço. O primeiro caso acontece devido à retirada de fluidos do reservatório que causa uma queda gradual da pressão do reservatório. No segundo caso problemas mecânicos como restrições ao fluxo no meio poroso ou na coluna de produção ou mudança na composição dos fluidos aumentam a resistência do fluxo e conseqüentemente as perdas de carga (TAKÁCS, 2003).

Para que poços improdutivos voltem a produzir ou mesmo para aumentar a produção de poços surgentes, métodos de elevação artificial são utilizados. Esses métodos atuam fornecendo energia adicional ao poço necessária para elevar os fluidos ou diminuindo as perdas de carga ao longo do fluxo do poço. Um dos métodos de elevação artificial mais simples e mais utilizados é o *Gas Lift*.

O método de elevação artificial por *Gas Lift* consiste na injeção de gás em um determinado ponto da coluna de produção de forma contínua para gaseificar a coluna diminuindo a densidade do fluido (*Gas Lift* contínuo - GLC), ou intermitentemente (*Gas Lift* intermitente - GLI) através da injeção de volumes elevados de gás pressurizado para deslocar golfadas de líquido. Este método de elevação é altamente confiável, de baixo custo em relação a outros métodos como o BCS (Bombeio Centrífugo Submerso), apresenta tolerância a presença de areia e outros sólidos, além de ser adequado para produção de poços desviados.

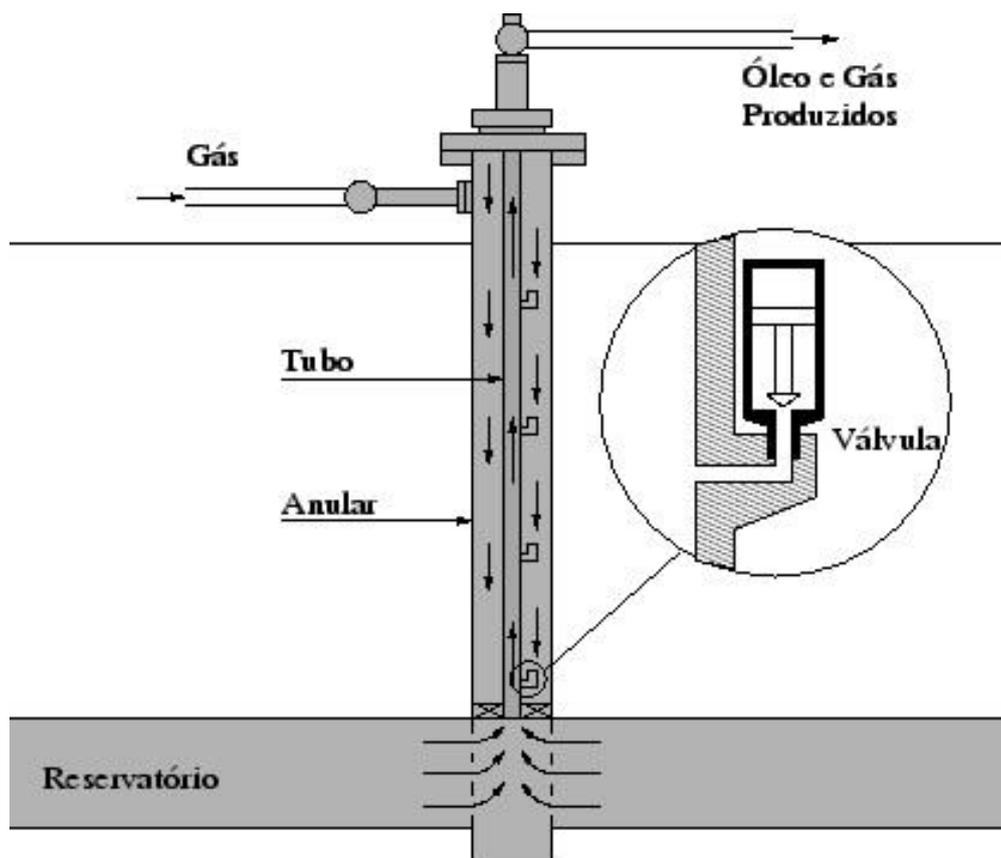
Os sistemas de produção por GLC e GLI são semelhantes e compostos basicamente das fontes de gás pressurizado (compressores), controladores de injeção de

gás de superfície, válvulas de *Gas Lift*, instaladas na coluna de produção, equipamentos de separação de óleo e gás e equipamentos de armazenamento dos fluidos produzidos.

As válvulas de *Gas Lift* são consideradas peças essenciais do sistema e regulam as pressões do poço na subsuperfície através do controle da injeção do fluxo de gás, além de facilitar a retirada do fluido de amortecimento do poço (descarga). São componentes de fundo colocadas dentro de mandris, instalados na coluna de produção. A válvula é aberta pelo aumento da pressão de injeção em relação à pressão do revestimento e no período em que ela permanece aberta o gás é injetado para produzir fluidos.

A Figura 1 mostra um poço operando por *Gas Lift*. As válvulas localizadas ao longo do tubo de produção são necessárias apenas para o início da operação do poço. A descarga do poço consiste em retirar o fluido presente na coluna de produção e/ou anular para colocar o poço em produção. Inicialmente todas as válvulas estão abertas. Conforme o gás é injetado no anular há uma transferência de fluido dele para dentro do tubo de produção. Quando o nível do fluido no anular baixar da altura da válvula, esta deve ser fechada para que o processo se mantenha nas outras válvulas e o gás não entre diretamente no tubo de produção. O fechamento das válvulas ocorre em sequência. Quando todo o fluido for expulso da região anular apenas a última válvula se mantém aberta, iniciando a produção do poço. Este procedimento deve ser realizado lentamente para não danificar as válvulas.

Figura 1 - Poço operado por Gas Lift.



Fonte: ECONOMIDES (1993)

A válvula estudada nesse trabalho é uma válvula do tipo piloto. Este tipo de válvula tem como vantagem a característica de vazão que permite que o controle de abertura e fechamento seja feito na própria válvula, substituindo o painel de controle de automação e a válvula de ciclo que são usados na instalação convencional. Outro benefício é a redução no tempo de instalação do método intermitente em poços marítimos (off-shore) devido a simplificação das instalações de superfície.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste na modelagem/simulação computacional de uma válvula de *Gas Lift* do tipo piloto de 1 polegada através de um programa comercial que utiliza técnicas de CFD e averiguação de diversos parâmetros relacionados ao funcionamento desse equipamento. Posteriormente, para validação do modelo computacional, foi necessário fazer comparação de seus resultados com os resultados de

um modelo experimental obtidos por meio de uma planta de testes. Ao término desse trabalho ainda não houve dados experimentais disponíveis para a válvula de *Gas Lift* do tipo piloto estudada, então se decidiu validar um modelo de válvula de orifício de 1 polegada e meia, sendo o orifício 20/64 de polegada, por ser um tipo de válvula de geometria simples e de fácil modelagem e por ter a disposição de um relatório contendo seus dados experimentais, permitindo uma comparação de resultados.

1.1.1. Objetivos específicos

- Desenvolvimento de um modelo em ferramenta CAD para a válvula do tipo piloto de 1 polegada;
- Desenvolvimento de um modelo computacional para definir o escoamento na válvula do tipo piloto e de orifício;
- Simulações para obtenção de curvas de desempenho de ambas as válvulas;
- Comparação com dados experimentais.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos Teóricos

Nesse capítulo são abordados fundamentos teóricos fundamentais para o entendimento e o desenvolvimento do trabalho.

2.1. *Gas Lift*

A elevação natural utiliza apenas a própria energia do reservatório para elevar os fluidos da zona produtora até a superfície. Sob determinadas circunstâncias, porém, a energia (pressão) disponível não é suficiente para manter os poços com altos valores de produção. Nestas situações, a elevação artificial entra como um método para adicionar energia ao fluido, complementando a energia do reservatório. O *Gas Lift* (GL) é um método de elevação de petróleo, largamente usado. É empregado não só em poços sem condições de surgência, mas também naqueles onde se pretende aumentar a produção de óleo. Consiste basicamente na injeção de gás em um determinado ponto da coluna, podendo ser de forma contínua ou intermitente.

Embora existam variações, o esquema básico de um poço equipado para produzir por *Gas Lift* pode ser assim descrito: ao longo da coluna de produção estão distribuídos alguns mandris de *Gas Lift* contendo cada um uma válvula de *Gas Lift*. O gás é normalmente injetado através do espaço anular e penetra na coluna por meio das válvulas especialmente desenhadas para essa finalidade.

2.1.1. Equipamentos

Equipamentos de superfície:

São os equipamentos responsáveis por ancorar a coluna de produção, fazer a vedação entre a coluna e o revestimento de produção, e controlar o fluxo de fluidos à superfície. Os principais equipamentos são: árvore de natal, controlador lógico programável (CLP). Válvula solenoide e válvula controladora (motor valve) são utilizadas somente no método GLI.

Equipamentos de subsuperfície:

São os equipamentos responsáveis pela interação entre a injeção de gás e a condução dos fluidos à superfície. Os principais são: coluna de produção, obturador (*packer*), válvula de pé, mandril e válvulas da *Gas Lift*.

2.1.2. *Gas Lift* Contínuo (GLC)

Baseia-se na injeção controlada e contínua de gás a alta pressão na coluna de produção com o objetivo de gaseificar o fluido desde o ponto de injeção à superfície. Até certos limites aumentando-se a quantidade de gás na coluna de produção, ocorre uma diminuição no gradiente médio de pressão, com diminuição da pressão de fluxo no fundo e aumento da vazão.

2.1.3. *Gas Lift* Intermitente (GLI)

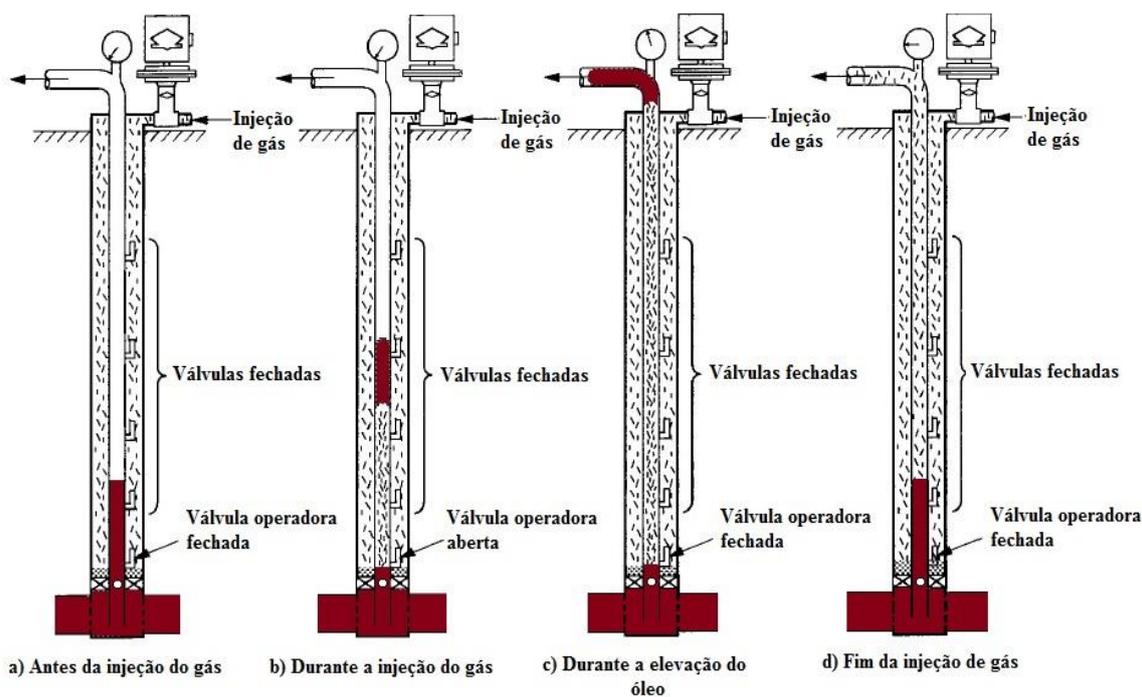
O método de elevação por *Gas Lift* Intermitente baseia-se no deslocamento de golfadas de fluido para a superfície através da injeção de gás a alta pressão na base das golfadas. A injeção de gás possui tempos bem definidos e normalmente é controlada na superfície por um intermitor de ciclo e uma válvula controladora. Normalmente sua aplicabilidade se restringe a poços com baixa pressão de fundo (alto ou baixo Índice de Produtividade - IP) e poços com alta pressão de fundo, mas baixo IP.

O ciclo de intermitência corresponde às fases que ocorrem para a elevação de uma golfada de fluido até a superfície. O tempo do ciclo corresponderá ao tempo decorrido entre duas aberturas consecutivas da válvula operadora. Dependendo das características de profundidade e produtividade, este tempo pode demorar de minutos a horas. Os períodos de ciclo de intermitência são:

- i) Acumulação de óleo no fundo do poço. Pressão no anular e na coluna aumenta gradativamente até uma que a altura desejada de óleo na coluna seja alcançada;
- ii) Injeção rápida de gás pela válvula operadora a uma pressão inicial muito alta, criando uma grande bolha de gás abaixo do óleo;
- iii) A golfada de óleo é elevada até a superfície.
- iv) A válvula operadora fecha e o ciclo se repete.

A Figura 2 ilustra o funcionamento de um poço operado por GLI.

Figura 2 - Poço operando por GLI.

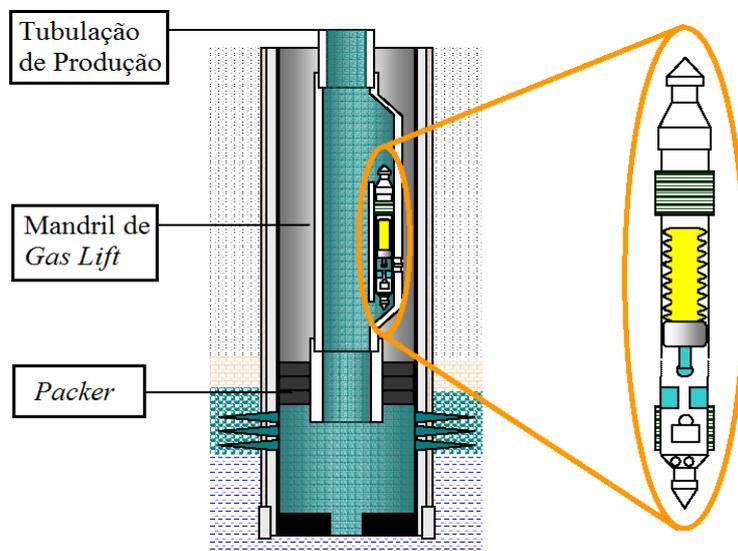


Fonte: Adaptado de ARTIFICIAL LIFT MANUAL PART 2A (1993).

2.1.4. Válvulas de Gas Lift

São válvulas instaladas no interior dos mandris de *Gas Lift*, em profundidades pré-determinadas ao longo da coluna de produção (Figura 3), com a finalidade de direcionar e controlar o fluxo de gás do anular para o interior da coluna.

Figura 3 - Ilustração de uma Válvula de *Gas Lift*.



Fonte: Adaptado de COSTA, RUTÁCIO O. (2015)

A grande variedade de características e princípios operacionais de válvulas de *Gas Lift* desenvolvidas ao longo do tempo torna difícil a criação de um sistema que englobe todos os tipos de válvulas possíveis. Baseado em diferentes aspectos, as válvulas podem ser agrupadas em diferentes classes. A visão geral a seguir apresenta as principais classes em que as válvulas são associadas e uma breve descrição de seu funcionamento (TAKÁCS, 2005).

Baseado no controle de operação, todas as válvulas de *Gas Lift* podem ser classificadas em um desses grupos abaixo:

- Controlada mecanicamente da superfície;
- Controle pode ser feito também por velocidade, densidade, etc;
- Válvulas operadas por pressão são abertas ou fechadas por pressão de injeção e/ou de produção. Elas incluem diversos subtipos que serão descritas a seguir.

De acordo com sua aplicação, elas podem ser usadas como válvulas de descarga ou operadoras:

- Válvulas de descarga são usadas somente para dar início a operação de *Gas Lift* e normalmente são fechadas durante a produção normal. Uma série de válvulas de descarga é ativada sempre que o poço volta a produzir depois de uma parada (*shutdown*).
- Válvulas operadoras garantem a operação de *Gas Lift* e injetam a quantidade certa de gás no poço. Válvulas adaptadas para GLC e GLI podem ser diferentes de acordo com as necessidades de cada um desses dois principais tipos de *Gas Lift*.

Válvulas de *Gas Lift* podem ser classificadas de acordo com o modo que elas são descidas no poço:

- Válvulas convencionais são acopladas por fora da coluna de produção em mandris especiais, somente podem ser descidas ou retiradas junto com a coluna de produção.
- Válvulas retiráveis (retrievable) requerem mandris especiais com um espaço interno para receber a válvula. Este tipo de válvula é descida por

equipamentos por dentro da coluna de produção e podem ser retiradas sem a necessidade de retirar coluna.

Características na construção e montagem da válvula podem ser usadas para diferenciar as válvulas:

- Válvulas diferenciais normalmente contém apenas uma mola, na qual a força de pressão exercida sobre ela determina se a válvula abre ou fecha.
- Válvula de fole contém um fole de metal carregado com uma pressão pré-determinada. A pressão atuando no fole fornece uma força de controle que junto com as forças vindo da pressão de injeção e produção, determinam a operação da válvula.
- Válvulas piloto têm duas seções: o piloto e a válvula principal. O gás do piloto controla a operação da válvula principal e a cooperação das duas seções fornecem os resultados desejados. A maioria das válvulas tipo piloto é desenhada para o método de elevação por *Gas Lift* Intermitente com aberturas maiores que proporcionam uma elevação eficiente do óleo acumulado no fundo do poço.
- Válvulas de luvas flexíveis têm elementos concêntricos flexíveis e um carregamento de gás, ela abre ou fecha as portas de injeção dependendo da pressão de produção.

Finalmente, válvulas de *Gas Lift* podem ser classificadas de acordo com o sentido em que o fluxo do gás ocorre:

- Válvula de tubo de produção injeta gás do anular para dentro da coluna de produção.
- Válvula anular permite a injeção pela coluna de produção em direção ao anular.

2.1.5. Fluxo Crítico

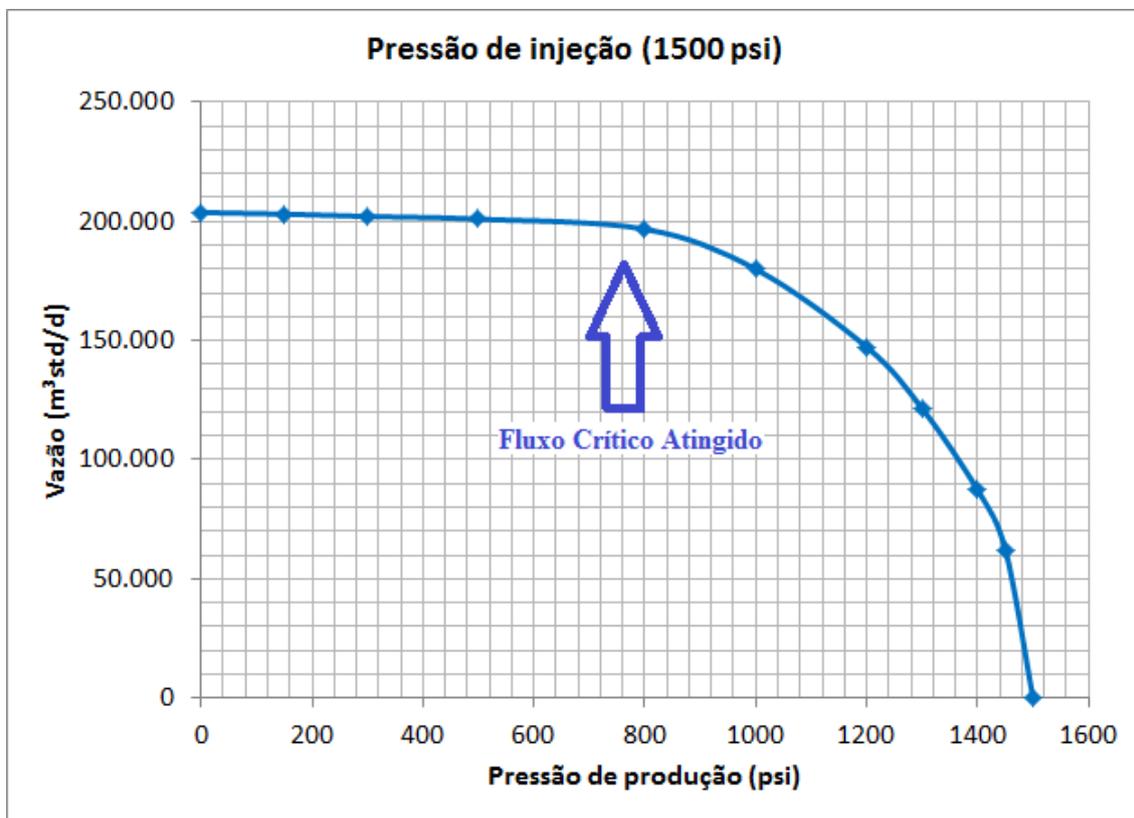
O Fluxo Crítico ocorre quando a velocidade superficial do fluido através da restrição (*choke*) é maior ou igual à velocidade do som no meio. Neste tipo de escoamento a pressão a jusante não influencia no valor da vazão. Na prática, para que essa condição seja atingida é necessário manter a pressão a montante maior ou igual a

duas vezes a pressão a jusante da restrição, esse valor é válido para válvulas que funcionam como uma válvula de orifício. Válvulas do tipo venturi atingem o fluxo crítico de maneira muito mais antecipada.

Para o método de elevação artificial por *Gas Lift*, é importante que o fluxo crítico seja atingido, pois nessa faixa de fluxo a vazão é constante, permitindo um maior controle de injeção de gás no poço, mesmo que haja alguma variação no valor de pressão a jusante.

Um típico teste para levantar uma curva de desempenho (vazão vs pressão de produção) de uma válvula de gás é realizado inicialmente com as pressões a montante e a jusante com o mesmo valor (vazão = 0). A pressão a montante da restrição permanece constante durante todo o teste, por outro lado, a pressão a jusante é diminuída progressivamente, fazendo com que a vazão cresça, até que o fluxo crítico seja atingido, pois após a pressão a jusante ser diminuída pela metade e o fluxo crítico ser atingido, mesmo que a pressão a jusante continue a diminuir a vazão permanecerá constante, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxo Crítico atingido em teste computacional de uma válvula de gás.



Fonte: do Autor.

2.2. Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) é um ramo da ciência que estuda a solução de problemas práticos, com a finalidade de obter soluções numéricas para o cálculo de pressões, velocidade e temperatura através de simulações computacionais. Técnicas de CFD vêm sendo empregadas há pelo menos três décadas, nas mais diversas áreas, dentre elas estão aeroespacial, oceanografia, transferência de calor em equipamentos, processos químicos, engenharia biomédica, escoamento de fluidos, etc.

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizado o programa ANSYS CFX 13.0. Códigos de CFD em geral seguem um mesmo padrão de passo a passo (Figura 5), iniciando com módulos de pré-processamento em que se define a geração da geometria e geração da malha. A quantidade de células da malha tridimensional gerada determinará a precisão da solução. É importante salientar que tanto maior será o tempo de processamento quanto maior a quantidade de nós e elementos gerados. Ainda na etapa de pré-processamento, há o módulo em que são definidas as propriedades do fluido, são especificadas as condições de contorno do problema e são escolhidas as equações que governam o fenômeno. Deve-se, também, escolher os modelos de turbulência e a função de parede, a fim de representar adequadamente o modelo físico.

Em seguida há o módulo de processamento (*solution*) no qual o modelo é simulado de acordo com as definições previamente estabelecidas na etapa de pré-processamento, utilizando o método dos volumes finitos como método numérico para resolução das equações de conservação.

O módulo pós-processador é utilizado para analisar os resultados obtidos. Esse módulo possibilita analisar os resultados de diversas maneiras, através de tabelas, gráficos, vetores indicando direção de velocidade, animação em 3D do escoamento do fluido, entre outras funções.

Figura 5 - Fluxograma demonstrando as etapas para a solução de um problema em fluidodinâmica computacional (CFD) utilizando o ANSYS - CFX.



Fonte: do Autor

2.2.1 O Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos é uma das técnicas de discretização mais versáteis usada em CFD, que tem por objetivo dividir o domínio do cálculo em um certo número de subdomínios, nos quais a lei da física de conservação seja feita válida. A característica mais marcante do método é que a solução resultante satisfaz as equações da conservação da massa, momento e energia. Essa condição é satisfeita para qualquer volume de controle, assim como para o domínio computacional completo e para qualquer número de

volumes de controle, por isso é considerado um método que não apresenta problemas de instabilidade ou convergência. Sendo o método computacional ideal para simular escoamento de fluidos compressíveis.

2.2.2. Equações Governantes

O sistema de equações diferenciais parciais utilizado para a solução do problema é formado pelas equações de conservação de Navier-Stokes para a massa (Equação 1), quantidade de movimento (Equação 2) e energia (Equação 3), conforme descrito no guia teórico do ANSYS CFX.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (3)$$

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento

3. Metodologia e Desenvolvimento

Nesse capítulo são apresentadas as etapas do trabalho, mostrando detalhadamente cada passo para o desenvolvimento e estudo do modelo de simulação para a válvula de *Gas Lift* do tipo piloto e válvula de orifício. Tendo como objetivo do trabalho analisar computacionalmente uma válvula do tipo piloto, foi necessário definir uma região de interesse que supriria a demanda de resultados.

Inicialmente, para a modelagem da válvula do tipo piloto, foi realizada a sua desmontagem. Esse procedimento foi realizado na Oficina Mecânica do NTI (UFRN) utilizando equipamentos apropriados. A Figura 6 ilustra a válvula completa já desmontada assim como a região de interesse para o estudo/modelagem da mesma.

Figura 6 - Válvula desmontada



Fonte: do Autor.

Percebe-se pela Figura 6 que apenas parte da válvula é de interesse para o estudo em questão, pois para objetivo do trabalho, obter curvas de desempenho, é necessário apenas a região que compreende o espaço entre a região de entrada de fluido até a saída. A partir da Figura 7 é possível identificar mais detalhadamente as partes constituintes dessa região de interesse.

Figura 7 - Partes constituintes da região modelada da válvula do tipo piloto

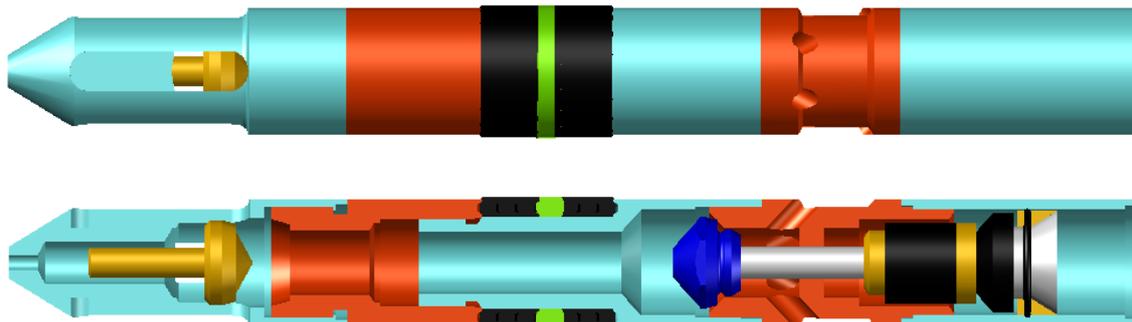


Fonte: do Autor.

Pela Figura 7 é possível localizar as entradas e saídas dos fluidos, a válvula de retenção (*check valve*) e também o Pistão da válvula.

Em seguida foi feita a modelagem da válvula piloto em AutoCAD, para geração do arquivo tridimensional da válvula (Figura 8).

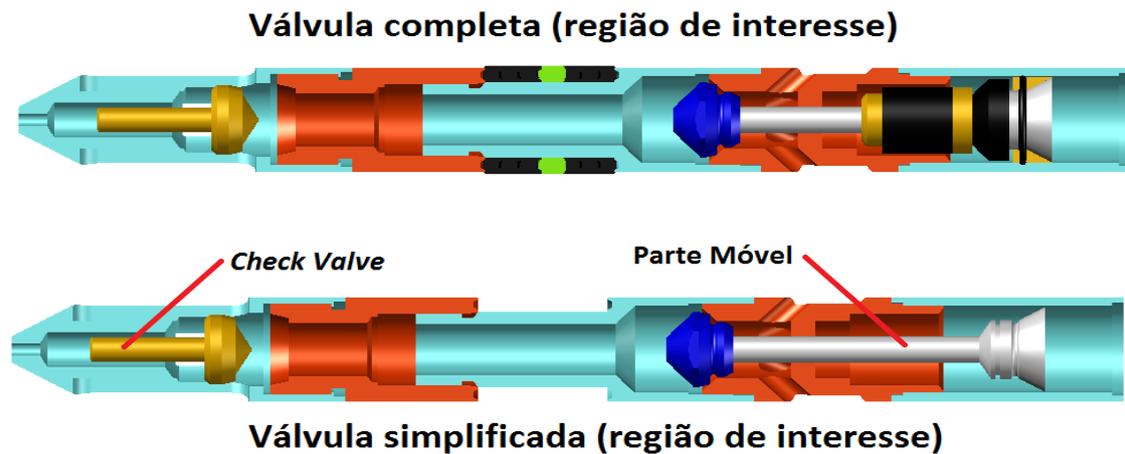
Figura 8 - Vistas laterais (parte externa e interna) da válvula piloto em AutoCAD.



Fonte: do Autor.

Posteriormente foram definidos quais constituintes internos e externos da válvula do tipo piloto seriam exportados para o programa de simulação ANSYS 13.0.

Figura 9 - Geometria simplificada da válvula do tipo piloto.

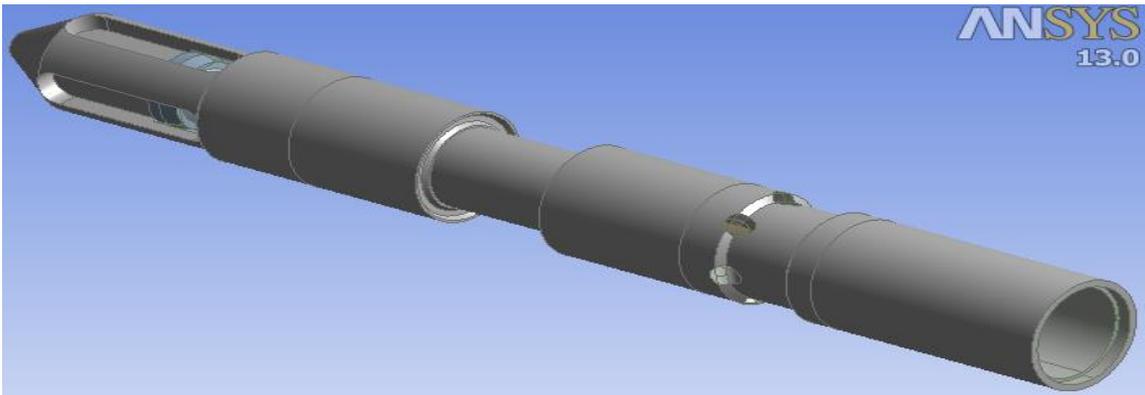


Fonte: do Autor.

A Figura 9 exibe uma comparação entre a “válvula completa” e a “válvula simplificada”. A válvula simplificada é aquela que contém apenas os componentes que foram exportados para o ANSYS e que foram posteriormente estudados, ou seja, a partir deste momento a modelagem da válvula foi feita usando a “válvula simplificada”, pois para trabalhar no CFX quanto mais componentes de geometria, maior o tempo de simulação, então a simplificação do modelo a ser trabalhado faz parte de uma estratégia para facilitar a geração de uma boa malha e melhorar o tempo de simulação. A partir da Figura 9 também é possível visualizar a válvula de retenção, o pistão e a região interior da válvula na qual o fluido escoar.

Após definida a geometria a ser exportada, foi iniciado o trabalho com a válvula no programa computacional ANSYS 13.0. O módulo do programa que está sendo utilizado para a análise da válvula é o CFX, que tem sido amplamente aplicado para simular e resolver complexos problemas de fluxo de fluidos por décadas. A Figura 10 mostra a geometria da válvula do tipo piloto no ANSYS CFX.

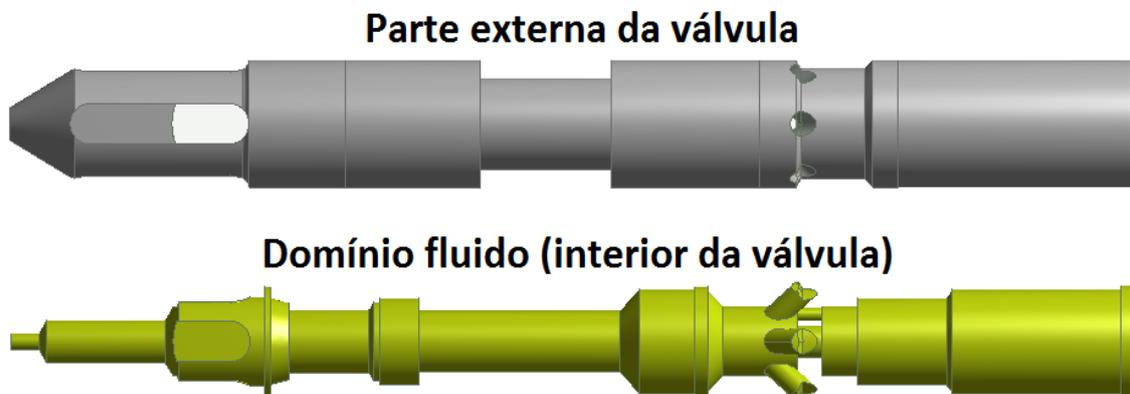
Figura 10 - Vista 3D da geometria simplificada da válvula no ANSYS 13.0.



Fonte: do Autor.

A etapa seguinte da modelagem foi criar a região na qual o fluido escoar, ou seja, embora a parte externa da válvula estivesse modelada era preciso que fosse gerado um domínio fluido que representasse a região interna da válvula. Para a criação desse domínio foi utilizado um recurso de preenchimento do ANSYS CFX. A Figura 11 ilustra o domínio fluido e a parte externa da válvula. Já a Figura 12exibe as arestas do domínio fluido com a válvula de retenção e o pistão.

Figura 11 - Domínio do fluido gerado no ANSYS CFX



Fonte: do Autor.

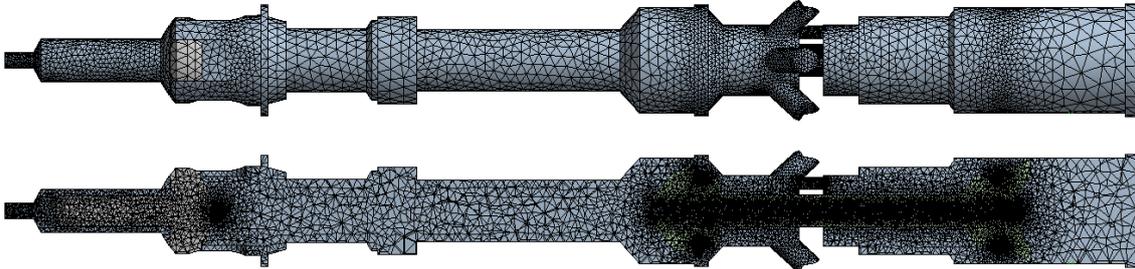
Figura 12 - Vista lateral da válvula de Gas Lift do tipo piloto.



Fonte: do Autor.

Em seguida foi gerada a malha para o sistema em estudo, que pode ser visualizada a partir da Figura 13.

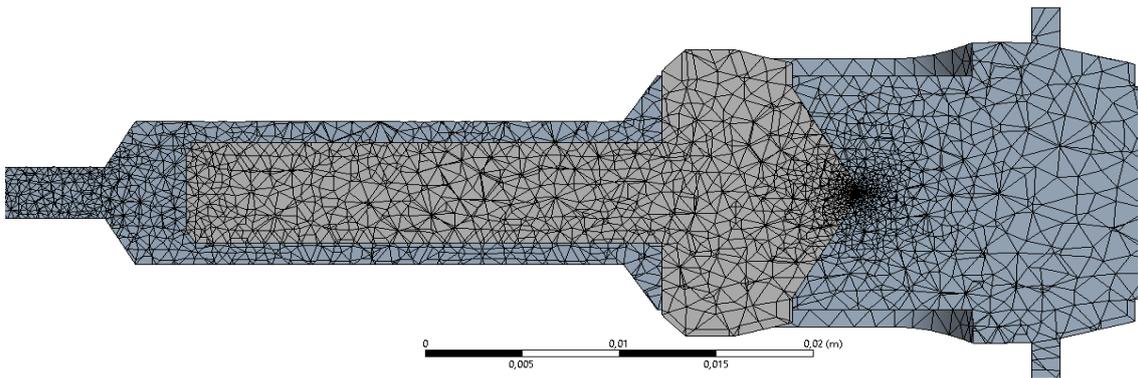
Figura 13 - Malha da válvula do tipo piloto gerada no ANSYS CFX.



Fonte: do Autor.

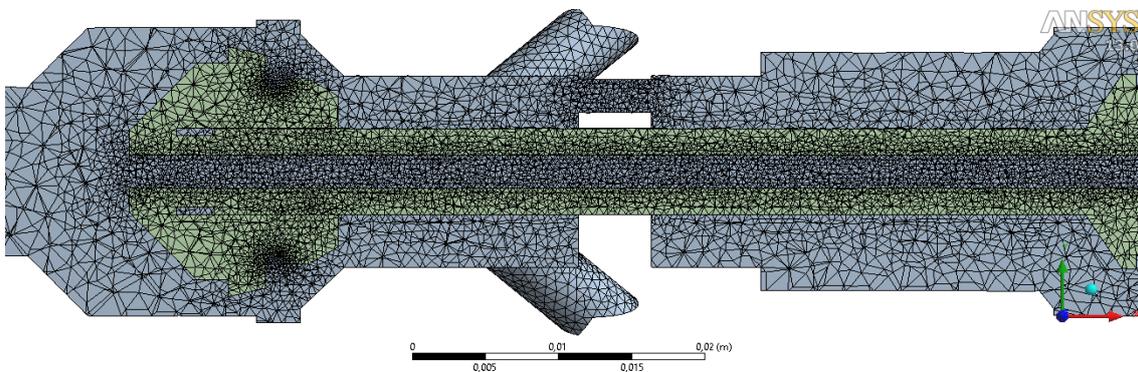
As Figuras 14 e 15 exibem a malhas geradas, respectivamente, nas proximidades de válvula de retenção e do pistão.

Figura 14 - Malha na região da válvula de retenção.



Fonte: do Autor.

Figura 15 - Malha na região do pistão e entrada.

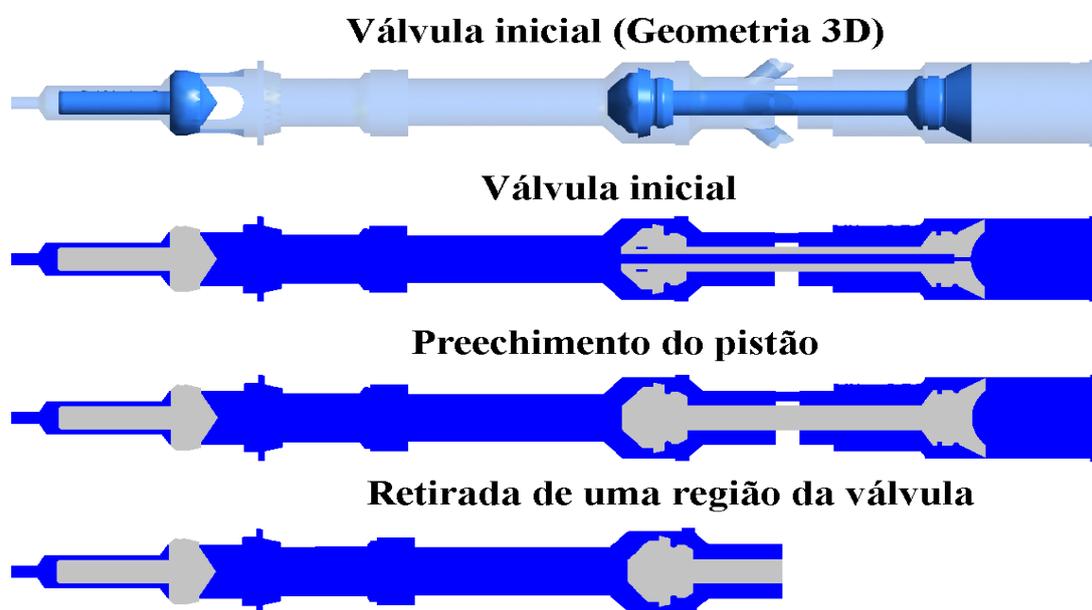


Fonte: do Autor.

Para um melhor detalhamento em regiões de geometria mais complexa, foi definida uma opção de malha avançada em regiões de curvatura. Para esse modelo a quantidade de elementos gerados foi de aproximadamente 750 mil com cerca de 150 mil nós.

Outra simplificação na geometria foi feita com intenção de reduzir problemas com refluxo do fluido em determinada área do conjunto válvula-pistão, como também reduzir o custo operacional de cada simulação. Essa simplificação consistiu no preenchimento do pistão e remoção de uma região de não interesse, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Modificações na geometria.



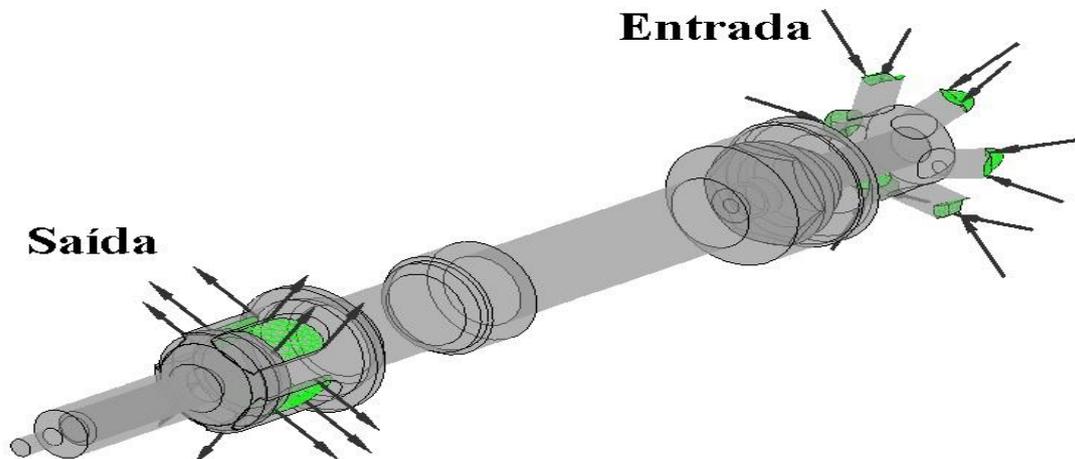
Fonte: do Autor.

A etapa seguinte do estudo consistiu na definição do fluido a ser simulado assim como definir uma estratégia para que o modelo de simulação esteja de acordo com o modelo experimental.

O fluido definido para o trabalho foi o CH₄ (metano) como gás ideal, pois após estudo foi considerado o fluido adequado à situação proposta. Inicialmente foi utilizado gás metano com propriedades constantes, mas esse tipo de fluido não gerava os resultados esperados, pois apenas com o gás metano ideal é que o modelo de simulação considerava o gás como compressível, permitindo atingir o fluxo crítico. Em seguida foi necessário

definir algumas condições de contorno para a entrada e saída (Figura 17) da válvula, como definir as pressões de injeção (entrada) e de produção (saída).

Figura 17 - Visualização da entrada e saída da válvula



Fonte: do Autor.

Algumas definições de simulação podem ser vistas na Tabela 1, abaixo:

Tabela 1. Definições da simulação da válvula de Gas Lift do tipo piloto.

| Definições de simulação | |
|------------------------------------|---------------------------|
| Número total de elementos da malha | 332801 |
| Número de nós da malha | 66760 |
| Pressão entrada | 1500 psi |
| Pressão saída | de 1500 psi até 0 psi |
| Fluido | CH ₄ Gás ideal |
| Modelo de turbulência | $K-\epsilon$ |

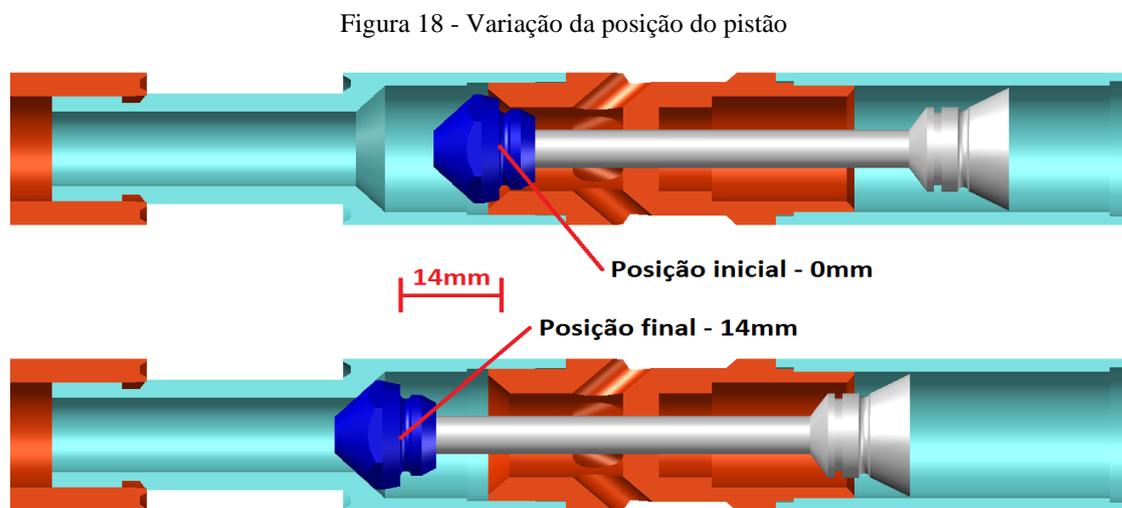
Neste trabalho foi utilizado o modelo de turbulência $K-\epsilon$ por sua confiabilidade no que diz respeito às aplicações envolvendo domínios fechados e por sua larga aplicação. O modelo $K-\epsilon$ padrão envolve a solução da energia cinética turbulenta K , definida pela variação das flutuações na velocidade, e sua taxa de dissipação ϵ .

Enfatizando que a pressão de injeção (Entrada) é mantida fixa a 1500 psi e a pressão de produção (Saída) é variável, iniciando a 1500 psi e reduzindo até 0 psi.

No entanto, há um detalhe que deve ser observado, pois as simulações em CFD são executadas para o caso de uma determinada posição do pistão da válvula, enquanto

que na operação experimental essa posição varia de acordo com a pressão de produção. Na intenção de minimizar esse problema o pistão foi posicionado em diversas posições ao longo do eixo central da válvula.

Para cada pressão de produção o pistão foi posicionado em sete diferentes posições ao longo do eixo central: 0 mm (totalmente fechado a direita), 1 mm, 4 mm, 7 mm, 10 mm, 13 mm e 14 mm (totalmente fechado a esquerda), essas posições foram definidas para que compreendessem todo o percurso possível do pistão na válvula do tipo piloto. A Figura 18 ilustra como foi realizada a variação da posição do pistão (posições 0 mm e 14 mm).

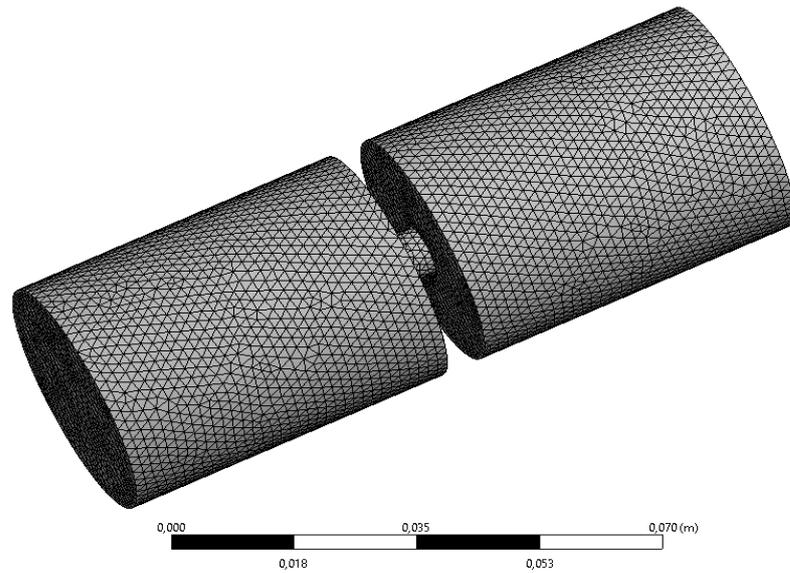


Fonte: do Autor.

Na ausência de um modelo experimental da válvula do tipo piloto para comparação com os resultados obtidos computacionalmente, foi criado um modelo de uma válvula de orifício em que fosse possível essa comparação com um modelo experimental e também por se tratar de um modelo simples e de pouco custo operacional.

Consultando o relatório de ensaio da válvula de orifício contendo as informações necessárias para modelagem dessa válvula e sua respectiva curva de desempenho, foi desenvolvido o modelo de válvula de orifício, Figura 19.

Figura 19 - Malha da válvula de orifício.



Fonte: do Autor.

Tudo que foi definido para o modelo da válvula de *Gas Lift* do tipo piloto foi replicado para o modelo da válvula de orifício, excetuando questões de geometria, como as posições do pistão.

Capítulo 4

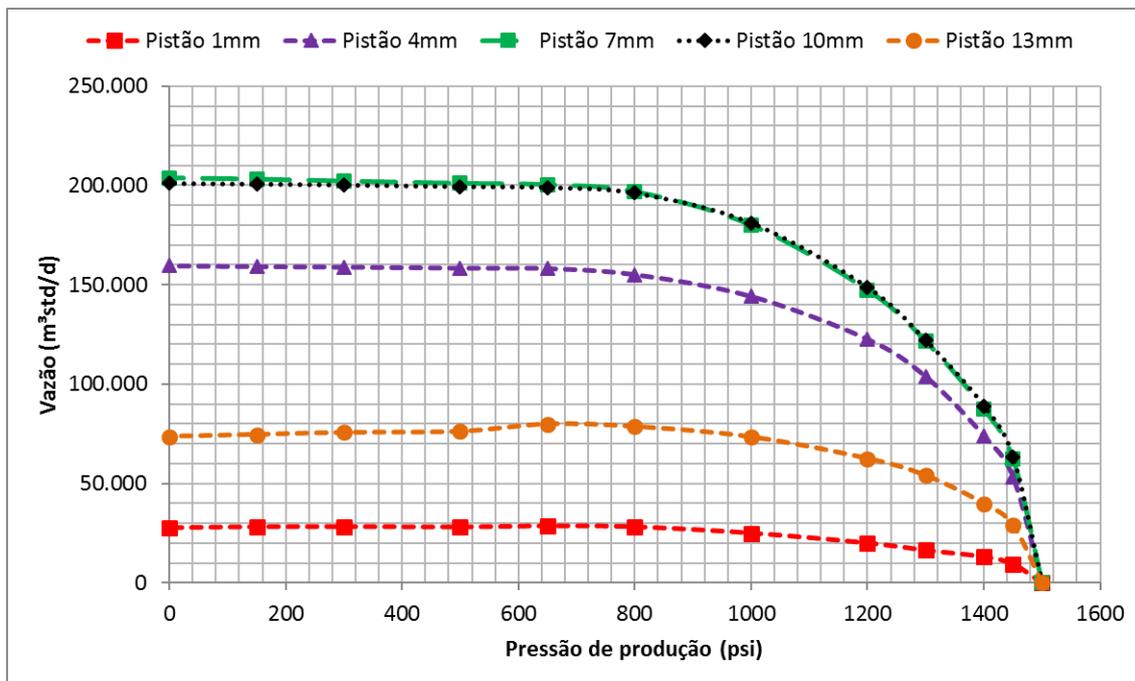
Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

Nesse capítulo serão apresentados os resultados, em forma de gráfico, das curvas de desempenho da válvula de *Gas Lift* do tipo piloto para diferentes posições do pistão, assim como os resultados para a válvula de orifício, comparando com os dados experimentais disponíveis.

Na primeira análise realizada, Figura 20, foi possível obter as curvas da válvula de *Gas Lift* do tipo piloto com o pistão posicionado em cinco diferentes posições. Nota-se que em todas elas o fluxo crítico foi atingido, sendo as posições 7 mm e 10 mm aquelas que alcançaram os valores mais altos (aproximadamente 200 mil m³std/dia).

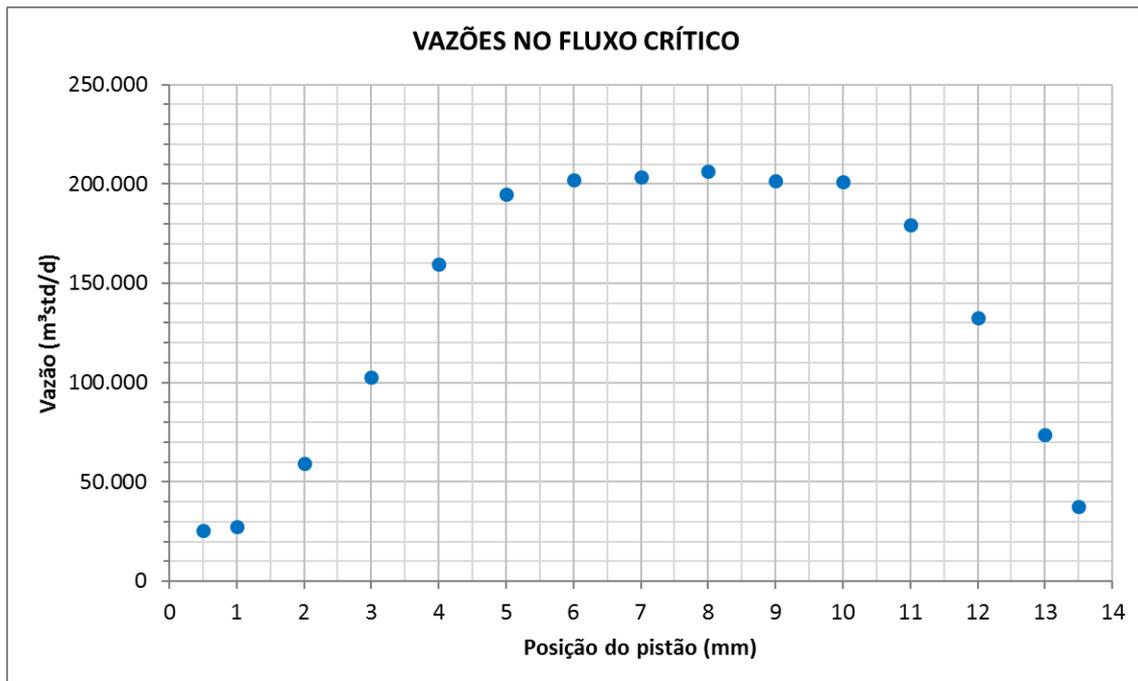
Figura 20 - Curvas da Válvula de *Gas Lift* do tipo piloto (vazão vs pressão de produção).



Fonte: do Autor.

Em seguida, com o intuito de verificar precisamente qual posição do pistão levava a uma máxima vazão no fluxo crítico, o pistão foi colocado em diversas posições distintas (0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 13,5 mm), a pressão de produção foi definida como 0 psi e a pressão de injeção continuou sendo 1500 psi. Com isso foi possível obter o gráfico mostrado na Figura 21.

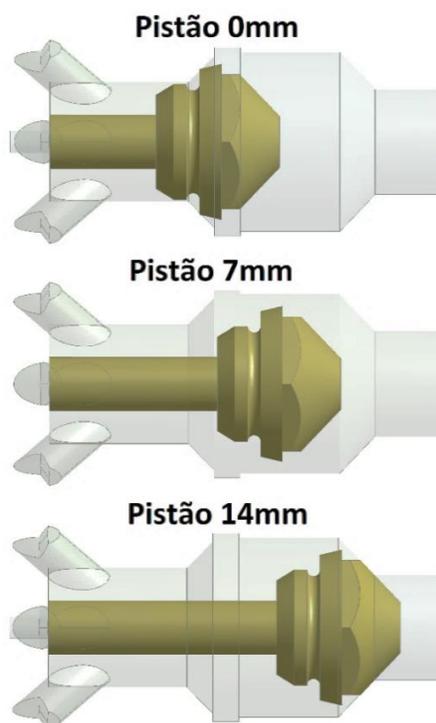
Figura 21 - Vazões obtidas no fluxo crítico para diferentes posições do pistão.



Fonte: do Autor.

Por meio da Figura 21 é possível perceber que nas posições iniciais entre 0-6 mm a vazão aumenta. Em seguida, nas posições intermediárias entre 6-10 mm, a vazão se mantém praticamente constante (≈ 200 mil m³std/dia), e logo após, entre 10-14 mm, ela declina. Esse comportamento pode ser mais bem compreendido por meio da Figura 22, que ilustra como o pistão se desloca no interior da válvula do tipo piloto.

Figura 22 - Pistão posicionado a 0 mm, 7 mm e 14 mm.

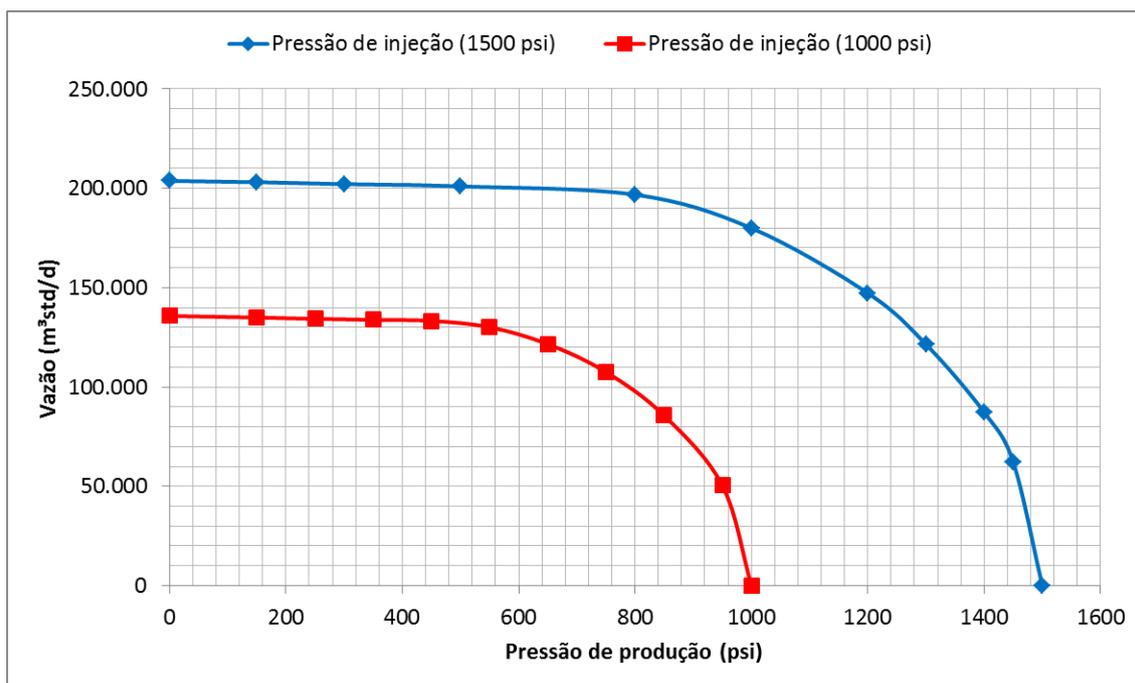


Fonte: do Autor.

Na Figura 22, nota-se que as posições 0 mm e 14 mm impedem que haja o fluxo de gás, visto que nelas o pistão fecha completamente a válvula. Por isso as vazões alcançadas quando pistão está próximo dessas posições é baixa. Por outro lado, quando o pistão se encontra em posições intermediárias, como, por exemplo, a 7 mm, existe uma maior abertura para que o gás escoe através válvula. Por isso, as posições intermediárias mostradas na Figura 21 proporcionam os valores mais altos de vazão.

Posteriormente, a pressão de injeção foi modificada para 1000 psi e uma nova curva de vazão vs pressão de produção foi traçada. Essas curvas podem ser vistas na Figura 23, que foram feitas com o pistão na posição 7 mm (visto que essa é uma das posições em que se obtém vazões mais elevadas). Essa modificação foi feita com o objetivo de testar a robustez do modelo computacional verificando a diferença na vazão para as duas pressões diferentes.

Figura 23 - Comparação das curvas da válvula para diferentes pressões de injeção.

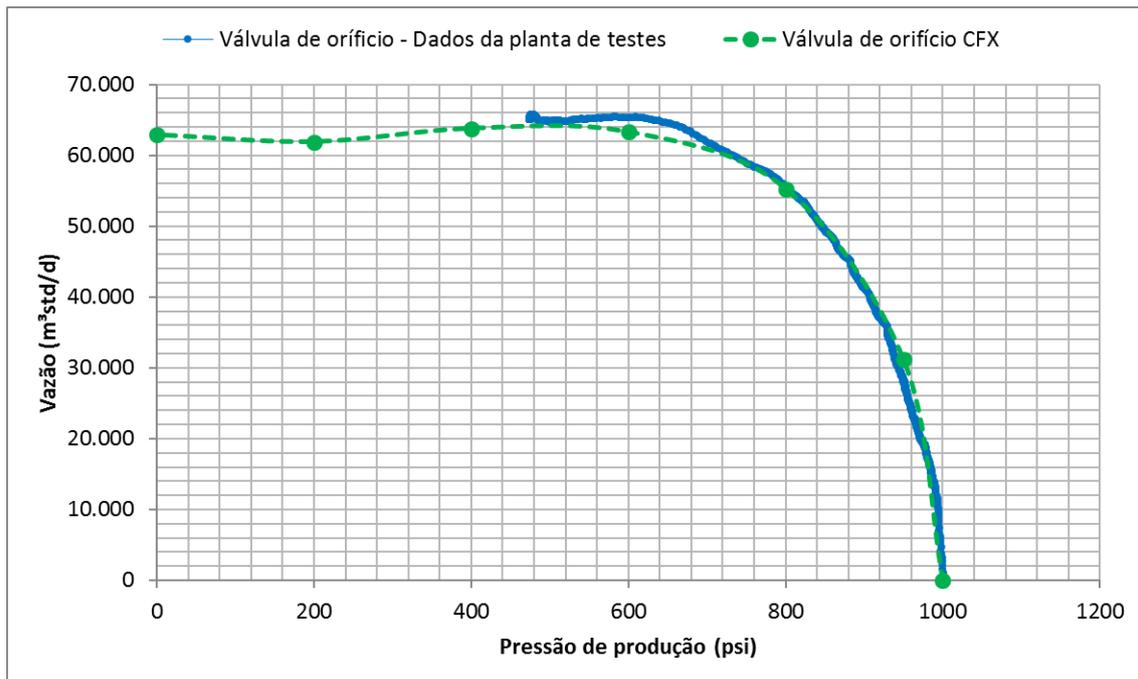


Fonte: do Autor.

Analisando a Figura 23 pode-se perceber que a pressão de injeção de 1000 psi resultou em valores mais baixos de vazão quando comparado a pressão de injeção de 1500 psi. Nesse caso a vazão no fluxo crítico foi de aproximadamente 140 mil m³std/dia, que ocorreu em uma pressão de produção aproximada de 520 psi, ou seja, 52% da pressão de injeção (porcentagem semelhante ao obtido quando a pressão de injeção era 1500 psi). Resultado compatível com a expectativa, pois uma pressão de injeção menor deve retornar um valor de vazão menor.

Em seguida, foi feita a comparação dos resultados simulados com os dados obtidos em experimento para a válvula de orifício. Essa comparação foi feita para que fosse possível uma validação da estratégia que foi utilizada no CFX para ambas as válvulas. O resultado da simulação da válvula de orifício foi muito próximo ao resultado da planta de testes, como podemos ver na Figura 24.

Figura 24 - Curvas da válvula de orifício simulada e da planta de testes.



Fonte: do Autor.

Por meio da Figura 24 pode-se perceber o potencial da ferramenta CFX para prever o comportamento dinâmico de fluidos através de regiões de interesse, como válvulas, bombas, etc. Outro aspecto que deve ser observado é a importância na definição de parâmetros e condições de contorno, assim como o detalhamento do modelo como um todo.

Capítulo 5

Conclusão

5. Conclusão

Nesse trabalho foram apresentadas as atividades realizadas na modelagem da válvula de *Gas Lift* do tipo piloto.

Dos objetivos traçados inicialmente para esse trabalho, a modelagem da válvula de *Gas Lift* do tipo piloto foi modelada no CAD com êxito. Ao longo do projeto várias simulações foram realizadas, devido a dificuldade em conseguir contornar inconsistências encontradas, até chegar a um modelo computacional considerado consistente e robusto. Dentro desses resultados, constatou-se que quando a válvula do tipo piloto modelada no CFX foi submetida a uma pressão de injeção de 1500 psi, as vazões máximas obtidas no fluxo crítico foram aproximadamente 200 mil m³std/dia (limite da planta de testes). Essas vazões foram alcançadas para posições do pistão entre 6 mm e 10 mm (Figura 20). Quando operada em uma pressão de injeção de 1000 psi a máxima vazão alcançada foi de aproximadamente 140 mil m³std/dia. Com os resultados obtidos foram geradas curvas de desempenho da válvula em forma gráfico.

Na impossibilidade de realização do teste experimental para a válvula de *Gas Lift* do tipo piloto a comparação dos resultados computacionais com os experimentais não foi realizada. A comparação de resultados é uma etapa fundamental para a validação do modelo desenvolvido no CFX. Tendo disponível um relatório de ensaio com especificações e resultados de uma válvula de orifício, decidiu-se reproduzir esse modelo de válvula de orifício no CFX para fazer tal comparação. Utilizando a mesma estratégia de simulação da válvula de *Gas Lift* do tipo piloto para a válvula de orifício, os resultados obtidos computacionalmente para a válvula de orifício foram muito bons, pois sua curva de desempenho foi compatível à curva de desempenho do teste experimental.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

ANSYS CFX - SOLVER THEORY GUIDE, Ansys CFX Release 11.0. Ansys, Inc. december, (Manual). USA, (2006);

COSTA, R. O. Curso de Bombeio Mecânico. Petrobras, (2008);

MAITELLI, C. W. S. de P., Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional. Dissertação de Doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. (2010);

MARTINS, R. A., Simulação Numérica em Elementos de Vazão por Pressão Diferencial: Análise de Tubos Venturi e Condicionadores de Escoamento para Aplicações com Gases e com Líquidos. Dissertação de Mestrado da Universidade de Brasília. (2004);

SILVA, R. S., Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para dimensionamento e projeto de sistemas operando por gás lift. (2014);

TAKÁCS, G. Sucker-rod pumping manual. Tulsa: PennWell Corporation. (2003);

TAKÁCS, G. Gas Lift Manual. PennWell Corporation. Oklahoma, Tulsa. (2005);

TURZO, Zoltan; TAKÁCS, Gabor. Special Report: CFD techniques determine gas-lift valve behavior. (2009);

VALADARES, Enaldo Cezar Santana, Estudo do comportamento dinâmico de válvula de gas-lift de fole carregado e operada por pressão utilizando a fluidodinâmica computacional. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Sergipe, Aracaju. (2010);

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method. Longman Group Ltd., London. (1995).