



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DA VÁLVULA DE GÁS LIFT CONSIDERANDO O COMPORTAMENTO TEMPORAL DO RESERVATÓRIO

Lucas Leal Santos

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro apresentado como requisito necessário à aprovação da respectiva disciplina.

Orientadores:

Vinícius Ramos Rosa

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro

Setembro, 2017.

Santos, Lucas Leal.

Otimização da posição da válvula de gás lift considerando o comportamento temporal do reservatório./ Lucas Leal Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

VIII, 57 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Vinícius Ramos Rosa, Virgílio José Martins Ferreira Filho.

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia do Petróleo, 2017.

Referências Bibliográficas: p 79.

1. Elevação, 2. Elevação Natural, 3. Elevação Artificial, 4. Bombeio Centrífugo Submerso, 5. Gás *Lift*.

I. Ramos Rosa, Vinícius. II. José Martins Ferreira, Filho, Virgílio III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. IV. Otimização da Posição da Válvula de Gás Lift Considerando o Comportamento Temporal do Reservatório.

OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DA VÁLVULA DE GÁS LIFT CONSIDERANDO O
COMPORTAMENTO TEMPORAL DO RESERVATÓRIO

Lucas Leal Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO DE PETRÓLEO

Examinada por:

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho.

Prof. Vinícius Ramos Rosa.

Prof. Paulo Couto.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2017.

Dedicatória

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me ajudaram a chegar até aqui e conquistar essa vitória, consciente que sem a ajuda de cada um deles eu não teria conseguido.

À minha mãe e ao meu pai, responsáveis diretos pelo meu sucesso. Ao Clério e à Débora, que somaram a eles para me ajudar nessa caminhada. E aos meus avós, que com seu amor incondicional sempre me deram forças para continuar a batalha.

Dedico também a todos os professores da Engenharia de Petróleo da UFRJ, os quais abriram novos caminhos e me deram a base para construir todo o meu conhecimento. Em especial ao Vinícius e ao Virgílio, que foram fundamentais para eu conquistar os meus objetivos.

Agradecimentos

A minha mãe e ao meu pai, agradeço por sempre serem inspiração e exemplo de luta, ao Clério por sempre ser um ponto de referência, apoio e conhecimento e a Débora pelo carinho e paciência em me ajudar nos momentos cruciais. Aos meus pais, meus sinceros agradecimentos. Obrigado por serem o alicerce da minha criação.

A minha avó Edna, que através do seu amor incondicional me dava forças todas as vezes que eu pensava em desistir. Aos meus avós Áurea e Toninho, por serem exemplos de amor e companheirismo. A minha madrinha Patrícia, agradeço pela dedicação de uma mãe e ao avô Robson, que não está mais aqui para participar comigo dessa conquista, eu dedico toda essa caminhada. Com certeza seus olhos estarão voltados a mim nessa realização.

Quero fazer um agradecimento especial a todas as pessoas que fizeram a minha caminhada em uma nova cidade ser mais leve e mais feliz. Agradeço ao Pedro, que sempre me ajudou incondicionalmente. Ao Antônio e à Jaqueline que nunca mediram esforços para estarem presentes. E à Clara, ao Junior e à Bia, que deixaram essa cidade estranha um pouco mais confortável.

Agradeço também a todos os professores, em especial ao Vinícius e ao Virgílio que foram o alicerce dessa conquista. E à ANP, pelos recursos e incentivos à pesquisa.

E, por fim, agradeço aos meus irmãos. Tudo o que sou e o que quero ser, faço por vocês.

Resumo

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DA VÁLVULA DE GÁS LIFT CONSIDERANDO O COMPORTAMENTO TEMPORAL DO RESERVATÓRIO

Lucas Leal Santos

Setembro/2017

Orientador: Vinícius Ramos Rosa e Virgílio José Martins Ferreira Filho.

Curso: Engenharia de Petróleo

O gás *lift*, método de elevação artificial que consiste em utilizar a energia contida em um gás comprimido para elevar os fluidos até a superfície, é responsável por mais da metade da produção brasileira de petróleo.

Os principais fatores do dimensionamento de um projeto dessa natureza consistem na escolha da posição da válvula de gás lift (VGL) e no seu orifício, que muitas vezes são feitas de maneira que impedem o poço de produzir no seu ótimo econômico.

Para viabilizar a mudança na posição da válvula de um poço em produção, seria necessário a troca de toda a coluna, resultando em um custo relativamente alto. O objetivo desse trabalho começa em conseguir identificar quais seriam as posições ótimas para permitir que a coluna seja instalada de modo a receber a VGL em diferentes posições durante a vida produtivo do poço, sem ser necessário a troca de toda a coluna.

O objetivo principal consiste em permitir uma tomada de decisão baseada na análise financeira do projeto de quais serão as posição dessa válvula durante três tempos da

vida produtiva: início, meio e fim, assim como o tipo de válvula e os seus orifícios nesses momentos.

Uma vez identificado o ganho financeiro e na produção considerando esses 3 momentos, pode-se fazer uma análise de quantas seriam as posições e orifícios que resultariam na produção ótima, que é proposto como continuidade desse trabalho.

Abstract

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

POSITION OPTIMIZATION OF THE GAS LIFT VALVE CONSIDERING THE TEMPORARY BEHAVIOR OF THE RESERVOIR

Lucas Leal Santos

September/2017

Advisor: Vinícius Ramos Rosa and Virgílio José Martins Ferreira Filho.

Course: Petroleum Engineering

The Gas *Lift*, an artificial lift method that uses energy contained in a compressed gas to raise fluids to a surface, is responsible for more than a half of Brazilian oil production.

The main factors of the design of this project are the selection of the position of the gas lift valve (GLV) and its orifice, which are often made in a way that prevents the well from producing at its economical optimum.

In order to make possible to change the valve position of a production well, it would be necessary to change the entire column, resulting in a relatively high cost. The objective of this study is identifying the optimum positions to allow the column to be installed in order to receive the GLV in different positions during the productive life of the well without need to change the entire column.

The main objective is to allow a decision making based on the financial analysis of the project of what will be the positions of this valve during three times of the productive life of that well: beginning, middle and end, as well as the type of valve and its orifice in those moments.

Once the financial and production gain has been identified considering these three moments, an analysis of how many positions and orifices could be produced that would result in optimal production, which is proposed as continuity of this work.

Sumário

Dedicatória.....	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	v
Sumário.....	vii
1 Introdução	1
2 Contexto Teórico	3
2.1 Elevação	3
2.1.1 Elevação Natural.....	3
2.1.2 Elevação Artificial.....	4
2.1.3 Gás <i>Lift</i>	7
2.2 Tipos de Gás <i>Lift</i>	9
2.2.1 Gás <i>Lift</i> Intermitente.....	9
2.2.2 Gás <i>Lift</i> Contínuo	10
2.3 Gradiente de Pressão.....	12
2.4 Tipos de Escoamento	14
2.4.1 Fluxo Subsônico	16
2.4.2 Fluxo Sônico.....	17
2.5 Válvulas de Gás <i>Lift</i>	18
2.5.1 Válvula de Orifício	18
2.5.2 Condições de Produção das Válvulas de Orifício	25
2.5.3 Válvulas de Pressão	27
3 Dimensionamento de Gás lift	31

3.1	Seleção da Posição.....	31
3.2	Seleção do Orifício.	38
3.3	Determinação da Vazão.	46
4	O Problema de Otimização da Posição da Válvula de Gás Lift Considerando Comportamento Temporal do Reservatório.	50
4.1	Definição do Modelo.	50
4.1.1	Entrada de dados.....	50
4.1.2	Análise de pressão e vazão de injeção.....	51
4.1.3	Análise da produção e posição de injeção.	52
4.1.4	Escolha da profundidade de comparação.	54
4.1.5	Obter a vazão de comparação.....	55
4.1.6	Comparação com a nova proposta.....	55
4.1.7	Comparação entre os dois casos.	56
4.1.8	Análise de Viabilidade Econômica.	58
4.1.9	Escolha do tipo de válvula.....	60
4.1.10	Determinação do Orifício.	63
4.2	Procedimento de Escolha.....	65
4.3	Fluxograma.	75
5	Conclusão.....	78
6	Referências Bibliográficas.....	79
Anexo I.	A condição do Fluxo Sônico.	81
Anexo II.	Determinação da posição da válvula através das curvas de equilíbrio.	82
Anexo III.	Obtenção do fator de compressibilidade z.....	91
Anexo IV.	Código para Validação Inicial do Processo.	96
Anexo V.	Análise da Viabilidade Econômica.	99
Anexo VI.	Determinação do tipo de Válvula e Escolha do Orifício.	105

Anexo VII. VPL do Projeto.	114
Anexo VIII. Código de Simulação do Modelo.....	118

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Métodos de elevação aplicados em poços de petróleo em 2009. (Rizzo Filho, 2011).</i> _____	5
<i>Figura 2 - Divisão percentual dos métodos de elevação na produção total de 2009 da Petrobrás (Rizzo Filho, 2011).</i> _____	5
<i>Figura 3 - Vazão de líquido em função da injeção de gás. (Lopes, 2006).</i> _____	12
<i>Figura 4 - Comportamento dos gradientes de pressão em relação a vazão de líquido. (Rosa V. R., 2014).</i> _____	13
<i>Figura 5 - Tipos de escoamento na válvula de Orifício e Venturi (Almeida, 2015).</i> _____	15
<i>Figura 6 - Tipos de fluxo em uma válvula de orifício. (Ganzaroli, 2011).</i> _____	16
<i>Figura 7 - Componentes de uma válvula operadora. (Ganzaroli, 2011).</i> _____	19
<i>Figura 8 – Esquematização de uma válvula do tipo Face Plana (Ganzaroli, 2011)</i> _____	20
<i>Figura 9 - Tipos de escoamento em uma válvula de Orifício do tipo Face Plana. (Ganzaroli, 2011)</i> ____	21
<i>Figura 10 - Geometria da Válvula Venturi (Ganzaroli, 2011).</i> _____	22
<i>Figura 11 - Relação entre a pressão e a distância da garganta em uma válvula de orifício (Almeida, 2015).</i> _____	22
<i>Figura 12 – Tipos de escoamento em uma Válvula Venturi. (Ganzaroli, 2011).</i> _____	23
<i>Figura 13 – Comparativo entre os três tipos de válvulas citadas. (Adaptado: Almeida, 2014).</i> _____	24
<i>Figura 14 - Comparação entre as válvulas já apresentadas com a válvula Nozzle (Almeida, 2014).</i> ____	24
<i>Figura 15 - Diferença no comportamento entre as válvulas Venturi e de Orifício (Almeida, 2011).</i> _____	26
<i>Figura 16- Comparação entre uma válvula reguladora de pressão (esquerda) e uma válvula de Gás Lift (direita). (American Petroleum Institute, 1994).</i> _____	27
<i>Figura 17 - Comparação entre os componentes dos tipos básicos de válvula de Gás Lift. (American Petroleum Institute, 1994).</i> _____	28
<i>Figura 18 - Componentes de uma Válvula de Descarga. (Ganzaroli, 2011).</i> _____	29
<i>Figura 19 –Variação da Pressão em relação a profundidade. (Rosa V. R., 2014)</i> _____	32
<i>Figura 20 - Concatenação dos gráficos de pressão com a vazão e a profundidade. (Rosa V. R., 2014)</i> __	33
<i>Figura 21 - IPR no gráfico de pressão e vazão. (Rosa V. R., 2014)</i> _____	33
<i>Figura 22 - pressão de fundo do poço no gráfico da IPR. (Rosa V. R., 2014)</i> _____	34
<i>Figura 23 - Curva de pressão disponível (GLR) do reservatório. (Rosa V. R., 2014)</i> _____	34
<i>Figura 24 - Consideração da pressão disponível dada pelo gas lift para o cálculo da GLR. (Rosa V. R., 2014)</i> _____	35

<i>Figura 25 - Consideração da pressão de injeção de gás no cálculo da posição da VGL. (Rosa V. R., 2014)</i>	35
<i>Figura 26 - Determinação da posição da VGL. (Rosa V. R., 2014)</i>	36
<i>Figura 27 – Uso do Software para cálculo de posição da VGL.(Adaptado: PIPESIM)</i>	37
<i>Figura 28 - Curvas de taxa de fluxo em relação a pressão para as válvulas de Orifício e Venturi. (Almeida A. , "A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves", 2011).</i>	38
<i>Figura 29 - Perfil de pressão com a distância em relação a garganta ou orifício para os dois tipos de válvulas estudados. (Almeida A. , "A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves", 2011).</i>	45
<i>Figura 30 – Curvas de OPR e IPR com gargalo na IPR. (Barreto & Moraes, 2014)</i>	47
<i>Figura 31 – Curvas de IPR e POR com gargalo na OPR. (Barreto & Moraes, 2014).</i>	47
<i>Figura 32 - IPR e OPR de um poço não surgente. (Rosa V. R., 2014)</i>	49
<i>Figura 33 - IPR e OPR de um poço não surgente após a aplicação de Gás Lift. (Rosa V. R., 2014).</i>	49
<i>Figura 34 –Análise da Pressão e Vazão de Injeção em um Software de Simulação.</i>	52
<i>Figura 35 – Simulação do ponto mais profundo de injeção através de um Software de Simulação.</i>	53
<i>Figura 36 – Apresentação da profundidade máxima obtida no modelo de simulação.</i>	54
<i>Figura 37 – Vazão de produção em relação ao tempo.</i>	57
<i>Figura 38 – Produção real do poço simulado considerando toda a sua vida produtiva.</i>	58
<i>Figura 39 – Perfil de pressão no momento inicial da vida produtiva do poço.</i>	61
<i>Figura 40- Comportamento da Válvula de Orifício. (Ganzaroli, 2011)</i>	62
<i>Figura 41 – Comportamento da Válvula Venturi. (Ganzaroli, 2011)</i>	63
<i>Figura 42 – Exemplificação de um fluxo de caixa para cálculo do Valor Presente Líquido (VPL).</i>	74
<i>Figura 43 – Fluxograma representativo do modelo proposto</i>	77
<i>Figura 44 – Definição da IPR. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	82
<i>Figura 45 – Mudança de eixo no gráfico da IPR. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	83
<i>Figura 46 – Consideração da parte da IPR necessária para os cálculos. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	84
<i>Figura 47 – Curva de Pressão na Cabeça de Poço. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	84
<i>Figura 48 – Curvas de Pressão Requerida. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	85
<i>Figura 49 – Curvas de Pressão Disponível. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	86
<i>Figura 50 – Curva de Equilíbrio no gráfico de Pressão por Vazão. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	87
<i>Figura 51 – Curva de Equilíbrio considerando o gráfico de Pressão por Profundidade. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	88
<i>Figura 52 – Curva de Equilíbrio considerando a Pressão de Injeção de Gás. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	89
<i>Figura 53 – Determinação da Posição da Válvula de Gás Lift. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	90
<i>Figura 54 – Gráfico típico do fator de compressibilidade como uma função de pressão a temperatura constante. (Beggs H. D., 1985)</i>	92

Equações

<i>Equação 1 – Equação de dimensionamento da pressão para a instalação do gás Lift. (Rosa V. R., 2014).</i>	11
<i>Equação 2 - Razão crítica em relação as pressões de jusante e montante. (American Petroleum Institute, 1994).</i>	14
<i>Equação 3 – Equação do cálculo da razão crítica considerando os calores específicos. (American Petroleum Institute, 1994).</i>	14
<i>Equação 4 – Correlação para fluxo de gás no fluxo subsônico. (Guo, Lyons, & Ghalambor).</i>	17
<i>Equação 5 - Correlação para fluxo de gás no fluxo sônico. (Guo, Lyons, & Ghalambor).</i>	18
<i>Equação 6 - Q_v é a vazão de injeção de gás lift nas condições standard, dada em m^3/d (Almeida A. , "A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves", 2011)</i>	39
<i>Equação 7 - Razões entre as pressões e os calores específicos. (Almeida A. , "A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves", 2011)</i>	40
<i>Equação 8 -Valores dos parâmetros para um gás natural. (Almeida A. , "A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves", 2011)</i>	40
<i>Equação 9 -Equação da vazão de gás para gás natural em fluxo crítico.</i>	40
<i>Equação 10- Relação da área com o fluxo crítico</i>	41
<i>Equação 11- Fórmula da área de uma circunferência</i>	41
<i>Equação 12 – Diâmetro da VGL de orifício considerando os parâmetros de simulação.</i>	41
<i>Equação 13 – Modelo para injeção de gás em uma válvula de venturi segundo (Almeida A. , "A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves", 2011).</i>	42
<i>Equação 14 – Diâmetro para uma VGL Venturi no fluxo crítico.</i>	43
<i>Equação 15 – Vazão de Gás injetado para Válvula Venturi. (American Petroleum Institute, 1994)</i>	44
<i>Equação 16- Equação da Razão Crítica</i>	61
<i>Equação 17 – Cálculo do diâmetro para Válvula Venturi.</i>	63
<i>Equação 18 – Cálculo da Razão Crítica</i>	72
<i>Equação 19 – Cálculo do diâmetro de uma Válvula de Orifício.</i>	73
<i>Equação 20 – Cálculo do diâmetro de uma Válvula Venturi.</i>	73
<i>Equação 21 – Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto.</i>	74
<i>Equação 22 – Cálculo da Razão Crítica</i>	81

1 Introdução

A indústria de petróleo é responsável por grande impacto econômico, resultando em um montante cada vez maior de investimento para o aumento da produção e prospecção de novos poços.

Atualmente, o Gás *Lift* é responsável pela maior parte da produção da Petróbras, mesmo sendo aplicado em um número relativamente pequeno de poços. Isso mostra a importância da otimização nesse tipo de método, já que um pequeno incremento na performance do gás *lift* resulta em um aumento considerável na produção.

Como esse tipo de elevação tem uma aplicação abrangente, podendo inclusive ser usado para poços desviados, com produção de areia e possuindo menos limitações que outros métodos, é uma opção amplamente viável para aplicação no Pré-Sal. Tendo em vista a crescente importância da produção nessa região, a otimização do gás *lift* considerando a queda de pressão durante o tempo se faz cada vez mais necessária como forma de incrementar os ganhos, reduzir os custos e garantir uma maior vida produtiva do poço.

O objetivo do trabalho se baseia em garantir que o poço produza com a vazão ótima durante o maior tempo possível, o aumento da vida produtiva do poço e tentar impedir, ou pelo menos amenizar, processos que sejam prejudiciais para o sistema de produção, como grandes variações de vazão que prejudicam os equipamentos de superfície.

Na análise bibliográfica, percebe-se que mesmo com a inserção de novas tecnologias nessa indústria, muitas tomadas de decisão ainda são feitas baseadas em conceitos e estudos antigos.

Busca-se definir um procedimento pelo qual seja possível encontrar as posições e orifícios da válvula de gás *lift* que resultem na produção que irá gerar um maior valor presente líquido para o projeto. Mesmo que essa análise gere o mesmo resultado que o dimensionamento do poço usando outras abordagens, ela irá permitir a garantia que toda a decisão está baseada no que é financeiramente melhor para o projeto.

Para explicar o projeto de maneira clara e objetiva, a fim de chegar em seu objetivo, o projeto foi dividido em 5 capítulos. São eles:

Capítulo 1 – Introdução: Apresenta a motivação e os objetivos do projeto apresentado.

Capítulo 2 – Contexto Teórico: Contêm um resumo de todas as informações que são necessárias para o entendimento do processo de gás *lift*. Apresenta-se os principais tipos de elevação artificial, como forma de comparação com o Gás *Lift*, que é mostrado nas suas duas formas: intermitente e contínuo. São definidos os tipos de escoamento assim como os tipos de válvula que podem ser usados, que servem como embasamento teórico para os próximos capítulos.

Capítulo 3 – Dimensionamento de Gás Lift: Explica-se como é feita a determinação da posição da Válvula de Gás Lift (VGL) atualmente, considerando os gráficos de pressão em relação à vazão e à profundidade e como isso pode ser feito usando um software de simulação. Também são mostrados os processos de determinação do orifício e da vazão de gás lift.

Capítulo 4 – O Problema da Otimização da Posição da Válvula de Gás *Lift* Considerando o Comportamento Temporal do Poço: Define-se um modelo para escolha de quais serão as melhores posições para instalar a VGL considerando todo o comportamento temporal do poço. Faz-se a simulação de um caso exemplo a fim de criar um procedimento que possa ser replicado em qualquer estudo. Depois define-se um procedimento e um fluxograma para ilustrar o que foi feito e permitir replicar esse estudo.

Capítulo 5 – Conclusão: Apresenta-se o resultado obtido da análise de todo o processo, considerando tudo o que era esperado e todos os resultados obtivos. Também é apresentado os próximos passos que o trabalho poderia seguir.

2 Contexto Teórico

2.1 Elevação

Para que ocorra a produção de fluidos do reservatório para a superfície é necessário que a pressão seja suficiente para vencer todas as perdas de carga e chegar até à superfície com, no mínimo, a pressão do separador.

Segundo (Beggs H. , 2003), a queda de pressão está presente em todos os poços de petróleo e é dada pela diferença entre a pressão média do reservatório e a pressão com a qual o fluido chega no separador. Ela é o somatório de todas as quedas de pressão ao longo de todos os componentes do sistema. Além disso, a taxa de produção de um poço pode, frequentemente, depender de apenas um componente do sistema que chamamos de limitante ou “gargalo” da produção.

Para (Thomas, 2004), quando a pressão do reservatório é suficientemente elevada, os fluidos conseguem chegar à superfície livremente. Esses poços são denominados poços surgentes e esse tipo de elevação é chamado elevação natural. Se a pressão do reservatório for baixa, incapaz de vencer todas os componentes citados acima, o fluido não consegue chegar à superfície apenas com a pressão do reservatório, necessitando de algum meio de elevação auxiliar, a esse meio de elevação chamamos de elevação artificial.

2.1.1 Elevação Natural

(Thomas, 2004) afirma que para poços surgentes a energia necessária para elevar os fluidos do reservatório até as facilidades de produção provém unicamente do reservatório. Esse tipo de elevação normalmente ocorre no início da vida produtiva de um poço e, com o passar do tempo, a progressiva retirada de massa do sistema causa a queda de pressão, tornando-a insuficiente para deslocar os fluidos até a superfície numa vazão econômica ou desejada. Mesmo possuindo menos problemas operacionais devido à simplicidade dos equipamentos de superfície e subsuperfície, muitas vezes não se usa a elevação natural por limitar a produção.

Para (Thomas, 2004) fatores como danos a formação, índice de produtividade, mecanismos de produção, aplicação de técnicas de estimulação, vazão de produção além do estudo e acompanhamento da queda de pressão do reservatório são fatores que influenciam na produção acumulada a ser obtida por elevação natural.

2.1.2 Elevação Artificial

Elevação artificial é o uso de métodos, isolados ou em conjunto, que permitam ou otimizem a surgência de fluidos em um poço de produtor de petróleo .

(Thomas, 2004) ratifica que a elevação artificial não é usada apenas quando as forças de pressão são insuficientes para elevarem o fluido mas também pode ser utilizada para otimizar a produção de um poço surgente. Utilizando equipamentos específicos, reduz-se a pressão de fundo de poço, aumentando a vazão. Os métodos de elevação artificial mais comuns são:

- Gás Lift:
 - Contínuo (GLC);
 - Intermitente (GLI);
- Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)
- Bombeio Mecânico com Hastes (BM)
- Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP);

O método de elevação artificial a ser escolhido depende de vários fatores como o número de poços, diâmetro do revestimento, produção ou não de areia, razão gás-líquido, vazão, profundidade, se o poço é vertical ou horizontal, entre outros. A escolha se dará posteriormente analisando e ponderando vantagens e desvantagens para cada método.

A Figura 1 mostra uma divisão percentual dos métodos de elevação aplicados, em número de poços explorados pela Petrobrás no Brasil no ano de 2009:

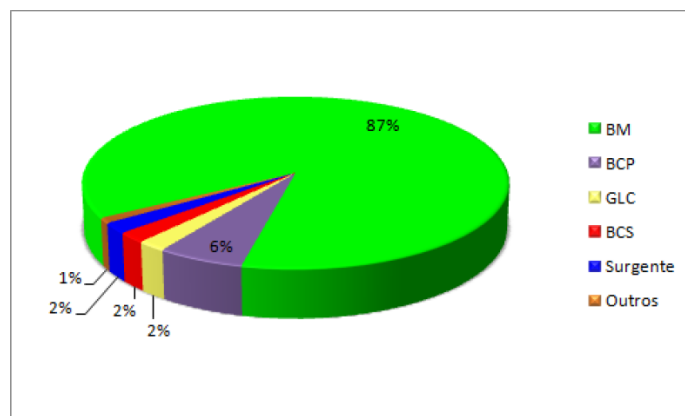


Figura 1 - Métodos de elevação aplicados em poços de petróleo em 2009. (Rizzo Filho, 2011).

Na Figura 1 é possível ver claramente que o método mais utilizado pela Petrobras é o Bombeio Mecânico (87%). Segundo (Rizzo Filho, 2011) esse é o método mais antigo e mais econômico, sendo utilizado apenas para poços em terra.

Porém a figura acima não fornece a dimensão real da importância de cada método, na Figura 2 compara-se a divisão percentual de cada um deles na produção da Petrobrás em 2011:

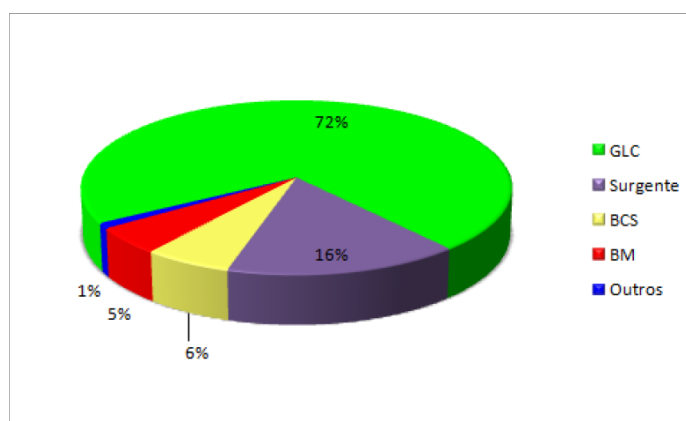


Figura 2 - Divisão percentual dos métodos de elevação na produção total de 2009 da Petrobrás (Rizzo Filho, 2011).

Comparando os gráficos, percebe-se que, mesmo o Bombeio Mecânico estando presente em 87% do número total de poços operados pela estatal, ele só foi responsável por 5% da produção total da empresa, enquanto o Gás *lift* Contínuo esteve presente em apenas 2% dos poços, mas foi responsável por 72% da produção. Isso mostra a eficiência de

cada método aplicado e a importância de se otimizar a aplicação do GLC, pois mesmo estando presente em uma porcentagem pequena dos poços, ele representa uma grande parcela da produção. Além disso o gás *lift* tem alta empregabilidade em poços *offshore*, mostrando assim sua importância no atual cenário de exploração e produção de petróleo brasileiro.

2.1.2.1 Bombeio Centrífugo Submerso

Em (Thomas, 2004) o BCS é apresentado como um método em expansão na elevação artificial pela crescente flexibilidade nos equipamentos disponíveis. Neste método, um cabo fornece energia elétrica a um motor de subsuperfície que a transforma em energia mecânica, que por sua vez é transmitida a uma bomba centrífuga. Essa bomba transmite energia para o fluido na forma de pressão, elevando-o. A bomba utilizada é do tipo centrífuga de múltiplos estágios, constituindo cada estágio de um impulsor (preso ao eixo, que gira a alta velocidade e, ao girar, transfere energia ao fluido sob forma de energia cinética, aumentando sua velocidade) e de um difusor (estacionário, redireciona o fluido do impulsor reduzindo a velocidade e transformando a energia cinética em pressão). Como cada estágio oferece um incremento de pressão, o número de estágios é determinado através da divisão da pressão necessária pelo incremento de pressão disponibilizado por cada estágio.

2.1.2.2 Bombeio Mecânico com Hastes

Método de elevação artificial mais utilizado no mundo (Thomas, 2004), sendo amplamente usado para elevar vazões médias de poços rasos, porém obtém baixas vazões em poços profundos. O movimento rotativo de um motor é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio localizada próxima a cabeça do poço, esse movimento é transmitido para o fundo do poço por uma coluna de hastes e aciona uma bomba que eleva os fluidos produzidos do reservatório até a superfície. Esse método é razoavelmente problemático em poços de areia, desviados e em poços onde parte do gás passa pela bomba.

2.1.2.3 Bombeio por Cavidades Progressivas

(Thomas, 2004) apresenta a bomba de cavidades progressivas como uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa, constituída de rotor e estator. O rotor ao girar no interior do estator origina um movimento axial das cavidades, progressivamente, no sentido da sucção para a descarga, realizando a ação do bombeio. Basicamente, a bomba é composta de uma camisa estacionária e um rotor de forma helicoidal. É um método simples e eficiente na produção de fluidos viscosos, devido a isso ele vem se difundindo rapidamente.

2.1.3 Gás *Lift*

Gás *Lift* é um método de elevação artificial que utiliza a energia contida em gás comprimido para elevar fluidos até a superfície, sendo o gás utilizado ou para gaseificar a coluna de fluido e com isso diminuindo a pressão hidrostática da mesma ou apenas para deslocá-lo até a superfície (Thomas, 2004). É um método muito versátil em termos de vazão e profundidade, é aplicável em poços com produção de areia, elevada razão gás-líquido e desviados. Tudo isso possuindo um investimento relativamente baixo, inclusive para poços profundos.

Os primeiros processos de elevação utilizando gás foram originados no século XVIII (Kirkpatrick, 1959), quando se injetava ar para retirar a água de minas inundadas. Por volta de 1865, aplicou-se pela primeira vez em um campo de petróleo na Pensilvânia usando ar atmosférico como gás *lift*. Esse método ganhou destaque com o tempo e passou a ser empregado em 1900 nos campos da Costa do Golfo do México, no Texas e Louisiana.

O uso de gás natural como gás *lift* só ocorreu 10 anos depois em campos da Califórnia devido à sua maior segurança, não apresentar efeitos corrosivos e explosivos como o ar atmosférico e estar frequentemente disponível no campo em volume e pressão necessários a aplicação.

2.1.3.1 Vantagens

O API Manual (American Petroleum Institute, 1994) apresenta algumas vantagens do gás *lift*, entre elas:

- O custo inicial dos equipamentos é geralmente mais baixo;
- É mais flexível que qualquer outro tipo de elevação;
- A taxa de produção pode ser controlada da superfície;
- A produção de areia não afeta os equipamentos;
- Pode ser usado em poços desviados;
- Maior vida útil dos equipamentos em relação aos outros tipos de elevação;
- Menor custo de operação;
- Equipamentos de fácil instalação, troca e manutenção;
- Linhas de gás podem ser usadas para injetar produtos químicos no poço.

2.1.3.2 Desvantagens

No mesmo API Manual cita-se as desvantagens desse processo:

- Necessidade de gás disponível. Gases como ar e nitrogênio também podem ser usados, mas geralmente são mais caros e mais difíceis de trabalhar;
- O gás corrosivo presente em um poço pode se espalhar para todos os outros poços quando for injetado;
- Necessidade de revestimento em bom estado;
- Elevado volume de gás manuseado a altas pressões, aumentando o risco operacional;
- Maior tempo para recolocar o poço em produção;
- Alta contrapressão sobre a formação no caso de Gás *Lift* Contínuo.

2.2 Tipos de Gás *Lift*

Existem dois tipos principais de injeção de gás *lift*, porém ambos com os mesmos componentes principais: a fonte de gás a alta pressão (compressores), o controlador de injeção de gás na superfície (*choke*), as válvulas de gás *lift* e os equipamentos para separação e armazenamento dos fluidos produzidos (Thomas, 2004). A diferença básica entre os tipos de gás *lift* é o período de injeção do gás na coluna. No gás *lift* contínuo o gás é injetado continuamente por uma válvula sempre aberta, já no gás *lift* intermitente o gás é injetado em períodos de tempo por uma válvula que se mantém fechada e só se abre no momento de injeção do gás.

2.2.1 Gás *Lift* Intermitente

O Gás *Lift* Intermitente (GLI) baseia-se no deslocamento de golfadas de fluido através da injeção de gás a alta pressão na base das golfadas (Thomas, 2004). Ela é feita em tempos controlados e bem definidos, na superfície. Geralmente é usado em poços com baixa pressão de fundo (alto ou baixo IP), e em poços com alta pressão de fundo, mas baixo IP, sendo um método aplicável para poços de baixas vazões. O GLI requer uma elevada vazão periódica de gás para imprimir grande velocidade ascendente à golfada, para isso precisa de válvulas com maior orifício e abertura rápida. O gás penetra na coluna de produção por essas válvulas, localizadas próximas ao fundo do poço, elevando todo o líquido acumulado acima desta. O ciclo de intermitência são as fases ocorridas para elevação de uma golfada de fluido até a superfície e o tempo de ciclo é o tempo entre duas aberturas consecutivas da válvula operadora, podendo variar desde alguns minutos até algumas horas. O tempo de ciclo é dividido em três períodos:

1. Período de Alimentação: o controlador de injeção de gás (intermitor de ciclo) e a válvula estão fechados, o fluido que está chegando do reservatório se acumula na coluna de produção acima da válvula operadora.
2. Período de Injeção: o intermitor de ciclo e a válvula operadora estão abertos, o gás injetado entra na coluna de produção através da válvula operadora e desloca todo o fluxo que havia se acumulado acima dessa em forma de golfada de líquido.

3. Período de Redução de Pressão: o intermitor de ciclo fecha, cessando a injeção de gás para o anular do poço enquanto a válvula operadora permanece aberta até que a redução da pressão no anular ocasione o seu fechamento. O gás injetado para produzir a golfada anterior está sendo produzido no separador, diminuindo assim a pressão no interior da coluna e tornando possível o acúmulo de uma nova golfada.

(Thomas, 2004) conclui dizendo que durante a elevação por golfada a perda de carga por escorregamento (parcela de líquido que está acima da válvula operadora no instante de sua abertura e que não é produzida durante o ciclo) e a penetração do gás na golfada (o gás injetado ocasiona escorregamento do líquido pelas paredes, podendo ser reduzido na presença de uma interface entre o gás e o líquido) são os dois fenômenos que diminuem a eficiência desse tipo de elevação. Ainda afirma que, para uma elevação eficiente usando GLI a injeção de gás é geralmente superior ao de uma operação de GLC eficiente, pois no GLC a expansão do gás e a gaseificação do fluido ocorrem desde a profundidade de injeção até a superfície, porém no GLI a pressão de injeção dada ao fluido em forma de golfada se perde, no instante em que ela chega à superfície, na linha de produção. Além disso, no GLI a energia que vem do reservatório é totalmente perdida. Mesmo com esses fatores, o GLI é preferível para poços com baixa pressão de fundo e/ou poços com baixos índices de produtividade pois, nesses casos, o GLC resulta em uma vazão de óleo menor que o GLI.

2.2.2 Gás *Lift* Contínuo

(Thomas, 2004) compara o GLC à elevação natural. Esse método de elevação artificial se baseia na injeção contínua de gás a alta pressão na coluna, o gás injetado se mistura ao fluido produzido, gaseificando-o e reduzindo sua pressão hidrostática desde o ponto de injeção até a superfície. O aumento do gás dentro da coluna de produção diminui o gradiente médio de pressão e conseqüentemente diminui a pressão de fundo e aumenta a vazão, porém só até um certo limite. Depois de uma certa vazão de gás, a diminuição da pressão devido à redução da componente hidrostática dá lugar ao aumento da pressão devido ao aumento da componente de fricção. O gás é injetado de forma controlada e contínua e o *choke* é o responsável por fazer o controle da injeção de gás na superfície. Geralmente é usado em poços com IP acima de $1,0 \text{ m}^3/\text{dia}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ e pressão estática

suficiente para suportar uma coluna de fluido entre 40% e 70% da profundidade total do poço. Por requerer injeção contínua de gás na coluna de produção, proporcional à vazão de líquidos que vem do reservatório, o GLC necessita de uma válvula com orifício relativamente pequeno.

A equação abaixo, apresentada por (Thomas, 2004), é a base para o projeto de dimensionamento e instalação do gás *lift* contínuo:

$$P_w = P_{wh} + G_{fa}L_{vo} + G_{fb}(D - L_{vo})$$

Equação 1 – Equação de dimensionamento da pressão para a instalação do gás Lift. (Rosa V. R., 2014).

Onde:

- P_w = Pressão de fluxo no fundo do poço;
- P_{wh} = Pressão de fluxo na cabeça do poço;
- G_{fa} = Gradiente dinâmico médio acima do ponto de injeção;
- G_{fb} = Gradiente dinâmico médio abaixo do ponto de injeção;
- L_{vo} = Profundidade da válvula operado;
- D = Profundidade dos canhoneados.

A partir dessa equação é possível perceber que para um determinado poço, quanto mais profundo for o ponto de injeção, menor será o volume de gás a ser injetado, porém um ponto de injeção muito profundo exigiria uma pressão no compressor muito elevada, que nem sempre é possível. Outro aspecto observável na equação é que, mesmo poços com mesmas características porém com índices de produtividade diferentes, terão diferentes vazões de gás injetado em diferentes profundidades. A quantidade de gás a ser injetada depende da relação econômica entre o custo de injeção e o volume de óleo recuperado. A Figura 3 mostra essa relação:

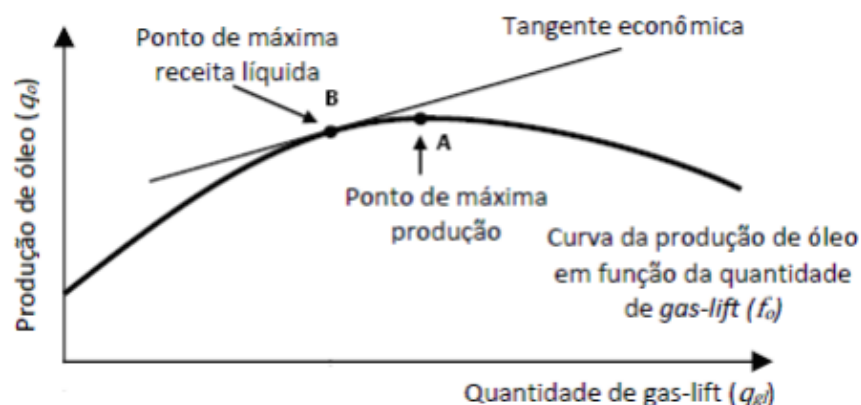


Figura 3 - Vazão de líquido em função da injeção de gás. (Lopes, 2006).

Para um acréscimo de produção é necessário um acréscimo de injeção e o princípio básico é que o incremento na produção resulte em uma receita maior, ou pelo menos igual, ao acréscimo nos custos de injeção. O ponto mostrado no gráfico como a tangente econômica é o ponto que aufer o maior lucro acumulado, sendo o ponto que maximiza a receita citada anteriormente.

2.3 Gradiente de Pressão

Para haver o fluxo do fundo do poço até o separador é necessário que a pressão no fundo do poço seja suficiente para vencer as perdas de carga que ocorrem durante o escoamento. Em um fluxo bifásico de óleo e gás, o gradiente de pressão na coluna é resultante da soma dos gradientes de elevação, fricção e aceleração, sendo o gradiente de aceleração comumente desprezado por ser de ordem de grandeza insignificante comparado a dos demais. A Figura 4 ilustra o comportamento dos gradientes mais significativos, separadamente, e do gradiente total em relação à vazão de líquido:

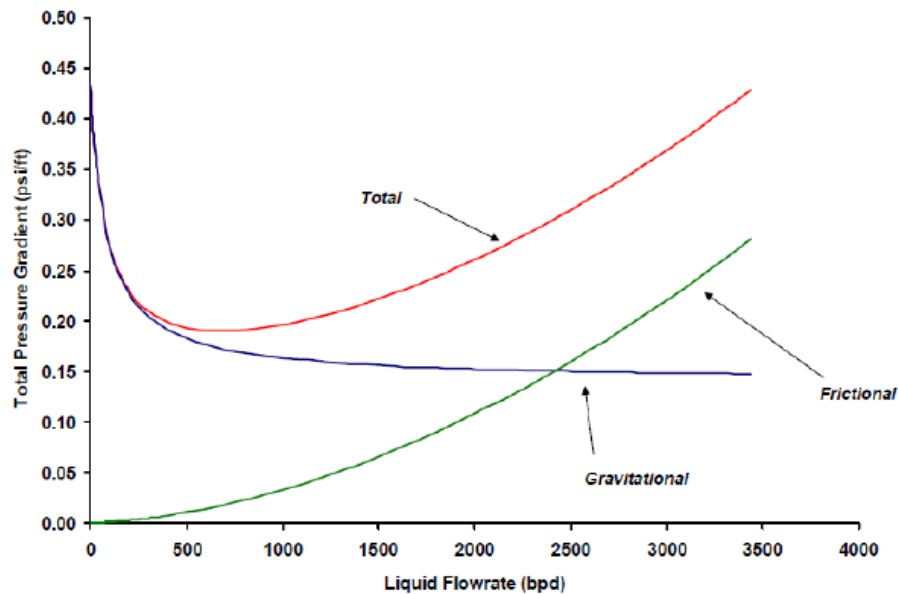


Figura 4 - Comportamento dos gradientes de pressão em relação a vazão de líquido. (Rosa V. R., 2014).

Nessa figura temos o gradiente de pressão em relação a vazão de líquido. Percebe-se que enquanto a parcela gravitacional tem uma queda considerável em altas pressões e baixas vazões e se estabiliza em altas vazões, a parcela friccional aumenta em relação direta com o incremento da vazão, passando a ser a parcela dominante no gradiente total a partir de aproximadamente 2500 bpd.

Dessa forma o gradiente total diminui até certo ponto, enquanto a componente gravitacional é o fator limitante da produção, então o sistema chega no ponto de inflexão que representa o menor valor do gradiente total e depois começa a aumentar, sendo a componente friccional a componente determinante nesse processo.

Essa curva mostra a importância do cálculo correto da vazão de gás a ser injetada pois a injeção de gás aumenta a quantidade de gás no fluido produzido, podendo tornar a fase gasosa predominante.

Intuitivamente pode parecer vantajoso injetar a maior quantidade de gás possível, mas a Figura 4 mostra que há um limite para o incremento de produção pois será necessário um gradiente de pressão muito grande. Ainda que a componente gravitacional se reduza, o aumento na componente friccional passa a ser maior que a redução na componente hidrostática, determinando o comportamento do gradiente total.

Além disso, ao aumentar a quantidade de gás, aumenta-se o escorregamento entre as fases e, em situações extremas, pode haver apenas produção de gás, deixando de produzir óleo já que o gás é a fase com maior mobilidade.

2.4 Tipos de Escoamento

A pressão à montante e à jusante do *choke* de injeção determinam a condição de fluxo no mesmo (Guo, Lyons, & Ghalambor). O fluxo de escoamento pode ser sônico ou subsônico e é determinado a partir da razão crítica, que é a razão entre a pressão de jusante, que a pressão no interior da coluna de produção, determinada apenas pelas condições de reservatório, e a pressão de montante, que é a pressão do anular e pode ser controlada pelo método de injeção. Essa razão pode ser expressa por:

$$R_c = \frac{P_{jusante}}{P_{montante}}$$

Equação 2 - Razão crítica em relação as pressões de jusante e montante. (American Petroleum Institute, 1994).

Outra correlação que pode ser usada é a razão entre os calores específicos do gás a pressão e a volume constante, que chamamos de k :

$$R_c = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Equação 3 – Equação do cálculo da razão crítica considerando os calores específicos. (American Petroleum Institute, 1994).

(Guo, Lyons, & Ghalambor) apresentam essa fórmula e dizem que o termo k é a razão entre os calores específicos do gás a pressão constante e a volume constante.

A Figura 5 mostra o comportamento do fluxo antes e depois da razão crítica, para as válvulas de Orifício do tipo Face Plana e do tipo Venturi. Os dois tipos de escoamento presentes em cada uma das válvulas são o fluxo sônico (trecho em que a vazão de injeção de gás é constante) e o fluxo subsônico (trecho onde a injeção de gás varia em relação à pressão). A razão crítica é exatamente o ponto de alteração entre esses dois comportamentos.

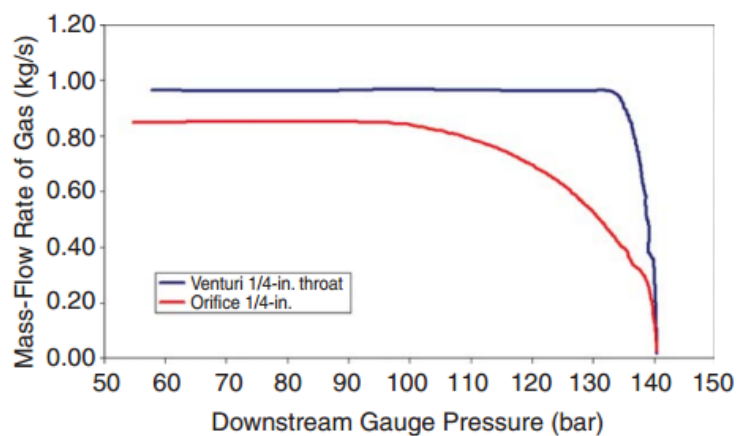


Figura 5 - Tipos de Escoamento na válvula de Orifício e Venturi (Almeida, 2015).

(Almeida, 2011) explica que, para a obtenção desse gráfico, experimentalmente se reduz continuamente a pressão na restrição enquanto a pressão a montante é mantida constante.

Na Figura 5, a pressão a montante (no anular do poço) foi de 140 bar e a pressão a jusante (pressão na coluna de produção) foi reduzida a fim de obter as duas curvas. Para uma pressão da coluna igual a pressão do anular, nenhum gás consegue ser injetado, logo a taxa de injeção é zero.

A medida que a pressão da coluna é reduzida, a quantidade de gás injetado aumenta até certo limite. Como pode ser observado, existe uma região (onde as curvas são horizontais) na qual a redução da pressão não altera a vazão de gás. Essa é a região de escoamento crítico e a transição entre as duas regiões é dado pela razão crítica.

Pode-se explicar essa alteração no comportamento pois, quando diminui-se a pressão, essa informação é transmitida a uma certa velocidade que aumenta a medida que reduz-se a pressão.

Porém há um limite em que a transmissão de informação atinge a velocidade do som e não é possível que tal transmissão se propague mais rapidamente. Então, a velocidade do som é a velocidade limitante do sistema e, para qualquer redução de pressão a partir desse ponto, a informação continuará a ser propagada com velocidade constante.

Para a válvula de Orifício do tipo Face Plana, os dois tipos de fluxo são mostrados na Figura 6:

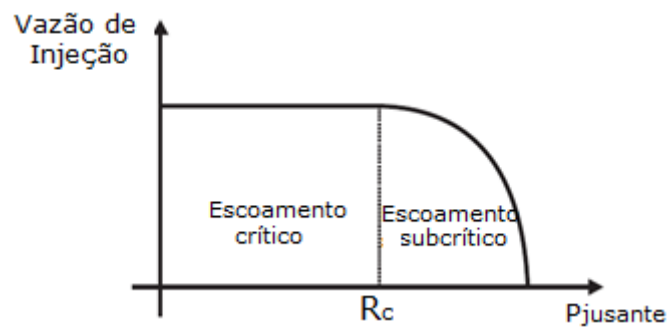


Figura 6 - Tipos de fluxo em uma válvula de orifício. (Ganzaroli, 2011).

2.4.1 Fluxo Subsônico

Podemos perceber na Figura 6 que no fluxo subsônico, também chamada de escoamento subcrítico, há uma variação da taxa de injeção de gás. A variação na pressão representa uma variação na quantidade de gás injetado. Para calcular o fluxo de gás nessa região, (Guo, Lyons, & Ghalambor) apresentam a seguinte equação:

$$q_{gM} = 1,248 C_c A p_{up} \times \sqrt{\frac{k}{(k-1) \gamma_g T_{up}} \left[\left(\frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

Equação 4 – Correlação para fluxo de gás no fluxo subsônico. (Guo, Lyons, & Ghalambor).

Essa equação determina a passagem de gás através do orifício de uma válvula de área A (em in²), o valor 1,248 multiplicando a equação se deve as unidades usadas para as incógnitas, ele poderia ser substituído por uma constante referente às unidades adotadas. O termo C_c é o coeficiente de fluxo do *choke*, q_{gM} é a taxa de fluxo de gás (em Mscf/dia), P_{up} é a pressão a justante do *choke* (psia), T_{up} é a temperatura a jusante (R), γ_g é a densidade relativa do gás em relação ao ar, P_{dn} é a pressão a montante para fluxo subsônico (psia) e k é a razão dos calores específicos já citada acima.

2.4.2 Fluxo Sônico

Também chamado de fluxo ou escoamento crítico, ocorre quando a velocidade do escoamento do fluido é maior ou igual à velocidade do som.

Nessa região, segundo a Figura 6 figura acima, é possível perceber que a taxa de passagem de gás atinge o seu valor máximo e se mantêm nesse valor independente da pressão de justante.

Na razão crítica, temos que o fluxo é máximo, e esse fluxo se mantêm constante para todo o escoamento crítico. Para achar o valor da vazão nesse ponto, basta derivar a Equação 4 em relação à razão das pressões e igualar esse valor a zero, assim obtendo a vazão máxima obtida a partir dessa equação. O resultado é a seguinte fórmula para o fluxo sônico, apresentada em (Guo, Lyons, & Ghalambor):

$$q_{gM} = 879C_c A p_{up} \sqrt{\left(\frac{k}{\gamma_g T_{up}}\right) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

Equação 5 - Correlação para fluxo de gás no fluxo sônico. (Guo, Lyons, & Ghalambor).

Observa-se que, para essa equação, a taxa de fluxo de gás independe da pressão à montante, sendo dependente apenas da pressão de jusante do gás. Assim não importa em qual vazão estamos injetando, a vazão de gás através da válvula sempre será a mesma, podendo variar apenas através da alteração da pressão na coluna.

2.5 Válvulas de Gás *Lift*

O Manual API considera a válvula de gás *Lift* como o coração de qualquer sistema desse tipo, e descreve que as válvulas são basicamente reguladores da pressão do fundo do poço.

Segundo (Almeida, 2011), há dois tipos de válvulas existentes para a injeção de gás *Lift* na coluna de produção. O primeiro tipo é uma válvula sempre aberta (na direção do anular para a coluna), que precisa de um *choke* para restringir a taxa de fluxo e uma válvula de retenção (*check valve*) para evitar o fluxo reverso da coluna para o anular. Em geral, esse tipo de válvula são válvulas de operação e podem ser de vários tipos, sendo os dois principais: um *choke* sendo uma placa cilíndrica com um orifício de borda quadrada, chamado de Válvula de Orifício; ou um *choke* com geometria Venturi, chamado de Válvula Venturi. O segundo tipo são válvulas com mecanismos de abrir e fechar de acordo com a temperatura e/ou pressão no poço, sendo a válvula com fole carregado o tipo mais comum. São geralmente usadas como válvulas de descarga.

2.5.1 Válvula de Orifício

Todas as válvulas de gás *Lift* são basicamente reguladoras de pressão e ficam localizadas próximas ao fundo da coluna de produção, no interior do mandril de gás *lift*, o qual permite a sua recuperação. Devido a esse tipo de mandril, que possui cavidade lateral, pode-se utilizar a válvula operadora do tipo insertável. Isso permite que essa

possa ser retirada e reinstalada sem a necessidade de remoção da coluna de produção (Ganzaroli, 2011).

Essa recuperação da válvula é importante pois ela tem uma vida útil de aproximadamente 7 anos e, após esse tempo, ela deve ser trocada. Além disso, para o presente trabalho, se faz extremamente necessário que haja a troca da válvula em determinados períodos de tempo, a fim de permitir, além da mudança de posição, a mudança de orifício das mesmas.

Ainda segundo (Ganzaroli, 2011), a válvula operadora tem a função de permitir que o fluido no interior do anular passe para o tubo de produção, além de também poder atuar na descarga do poço. Ela é a única válvula que permanece em operação durante o processo de produção. Conforme dito acima, ela está equipada com um dispositivo de retenção, garantindo o fluxo unidirecional do anular para o tubo de produção, que abre quando a pressão do anular é maior que a pressão no tubo e fecha na situação inversa. Abaixo mostraremos o esquema desse tipo de válvula e falaremos dos seus principais componentes.

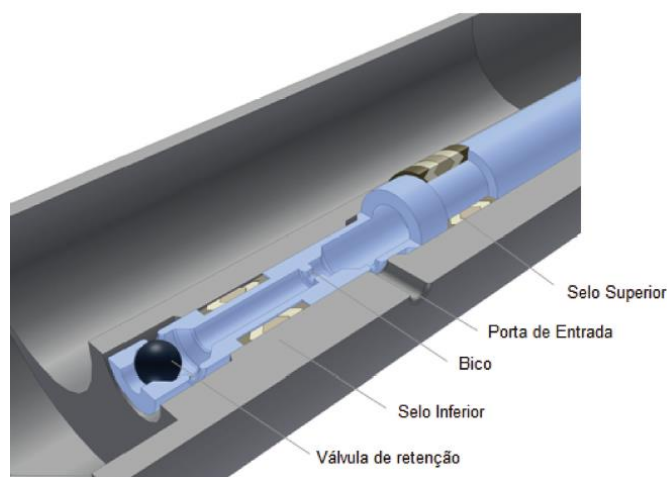


Figura 7 - Componentes de uma válvula operadora. (Ganzaroli, 2011).

Segundo (Ganzaroli, 2011) além da válvula de retenção, a válvula operadora ainda conta com uma trava que serve para fazer a retirada e colocação através das unidades de cabo. Os selos superior e inferior garantem que o gás flua somente através da válvula e não pelas laterais da mesma e, quando está fechada, garante que o fluido do tubo de

produção não escape para o anular através das laterais. O bico é o componente que efetivamente permite a passagem do fluido através da válvula. A diferença entre a pressão existente entre o anular e o tubo de produção caracteriza a taxa de injeção com que o gás é transportado para o interior da coluna. Como falado acima, existem dois tipos principais de orifício para as válvulas operadoras.

2.5.1.1 Orifício tipo face plana

(Ganzaroli, 2011) compara o orifício tipo face plana a uma placa de orifício, sendo a região de passagem do gás simplesmente um furo. Essa válvula pode ser representada como mostrado abaixo:

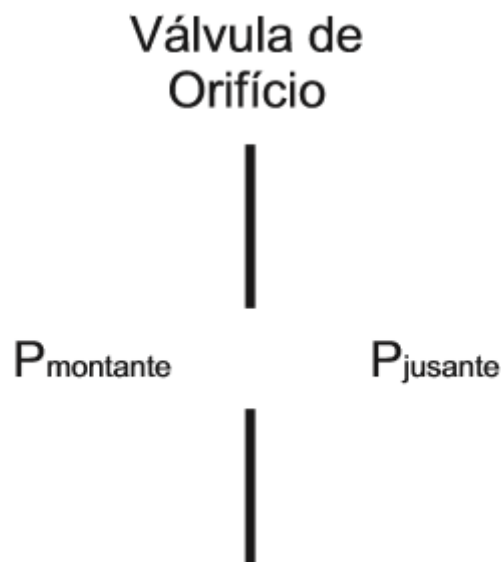


Figura 8 – Esquematização de uma válvula do tipo Face Plana (Ganzaroli, 2011)

Sendo o raio crítico dado pela equação 2, a constante para o gás natural através de um orifício pode ser aproximada por 1,28. Com essa equação temos que o raio crítico para esse tipo de válvula é 0,55. Essa equação é baseada em um processo isoentrópico, adiabático (pois não há tempo de haver transferência de calor) e reversível (perda por fricção é negligenciável no *choke*).

E a relação entre a pressão de injeção e a razão crítica é mostrada abaixo:

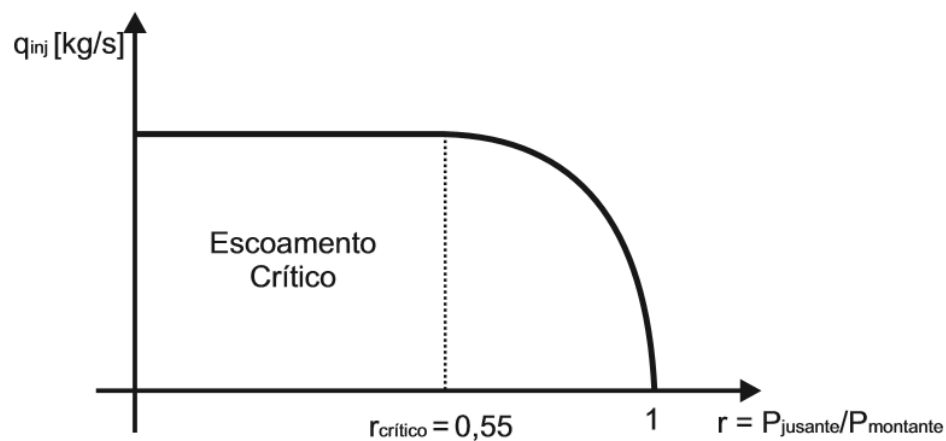


Figura 9 - Tipos de escoamento em uma válvula de Orifício do tipo Face Plana. (Ganzaroli, 2011)

(Ganzaroli, 2011) mostra, através da figura, que o diferencial de pressão existente entre a jusante e a montante da válvula para atingir o escoamento crítico é relativamente alto. Para o gás natural, a razão crítica é aproximadamente 0,55, como mostrado na figura, sendo necessário que a pressão a montante (anular) seja o dobro da pressão a jusante (tubo de produção) para trabalharmos no escoamento crítico. Altos valores de pressão refletem em custos elevados já que seria necessário maior gasto de energia para atingir a compressão necessária, além de equipamentos mais resistentes à altas pressões que também possuem maior custo.

2.5.1.2 Orifício tipo Venturi

(Ganzaroli, 2011) também apresenta a válvula do tipo Venturi, que tem sua geometria mostrada abaixo:

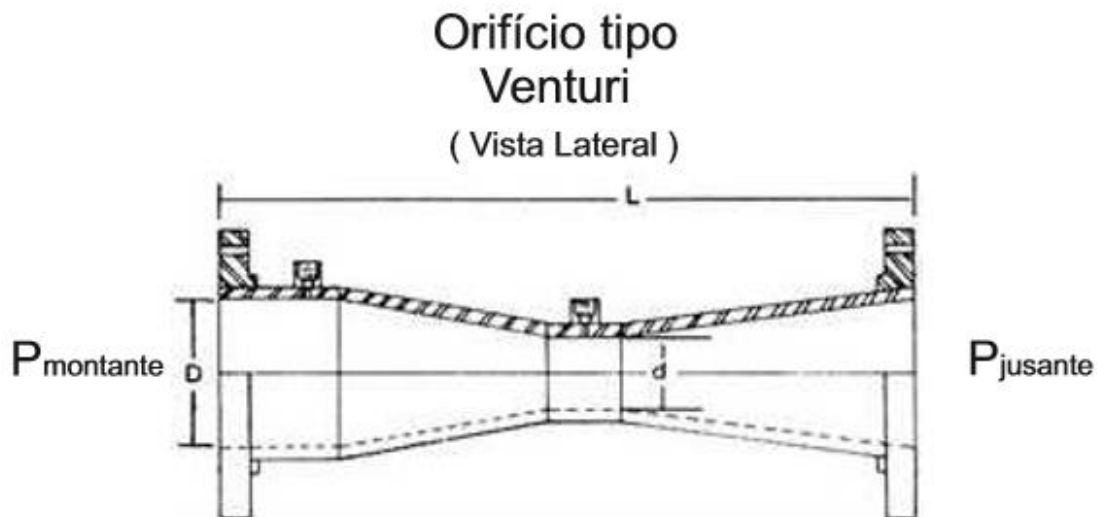


Figura 10 - Geometria da Válvula Venturi (Ganzaroli, 2011).

Devido a essa geometria, existe uma recuperação de pressão após a passagem pela garganta, diferente da válvula de orifício. A relação entre a pressão e a distância da garganta é mostrada abaixo para os dois tipos de válvula, onde o índice O se refere a válvula de orifício e o índice V a válvula Venturi.

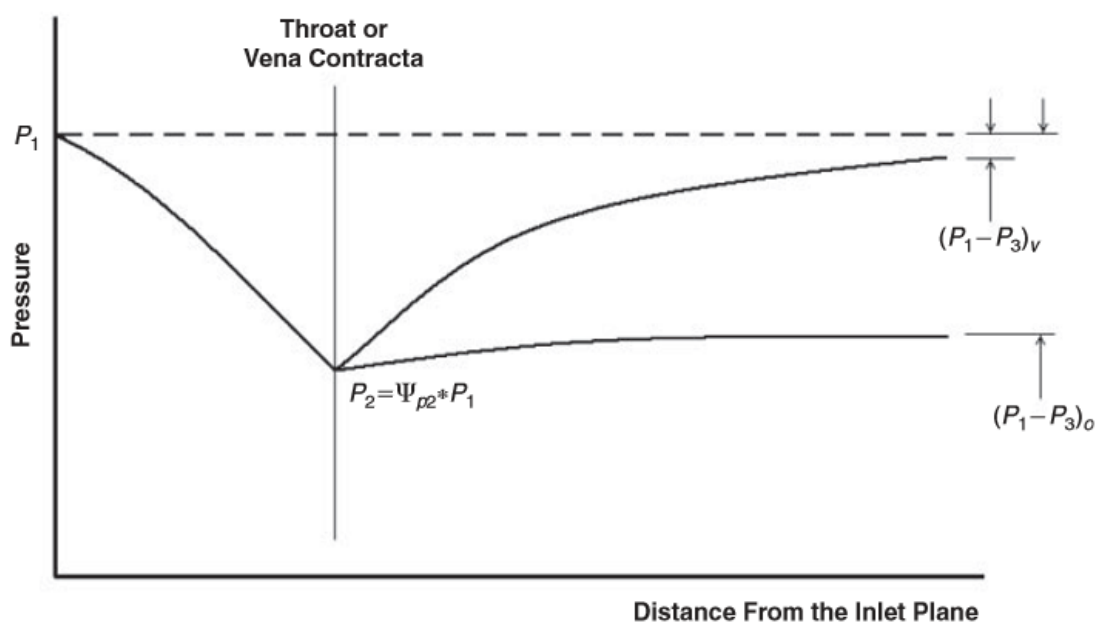


Figura 11 - Relação entre a pressão e a distância da garganta em uma válvula de orifício (Almeida, 2015).

Para a válvula de orifício, a recuperação de pressão é praticamente zero já que a geometria desse tipo de válvula não permite nenhuma influência no gás após a passagem pelo estrangulamento. Por outro lado, a geometria da Venturi é feita especialmente para isso, dessa forma ela consegue ter uma razão crítica maior, que experimentalmente mostra um valor de $r_c = 0,9$ aproximadamente.

O gráfico desse tipo de Válvula é mostrado abaixo e mostra uma maior região de fluxo crítico:

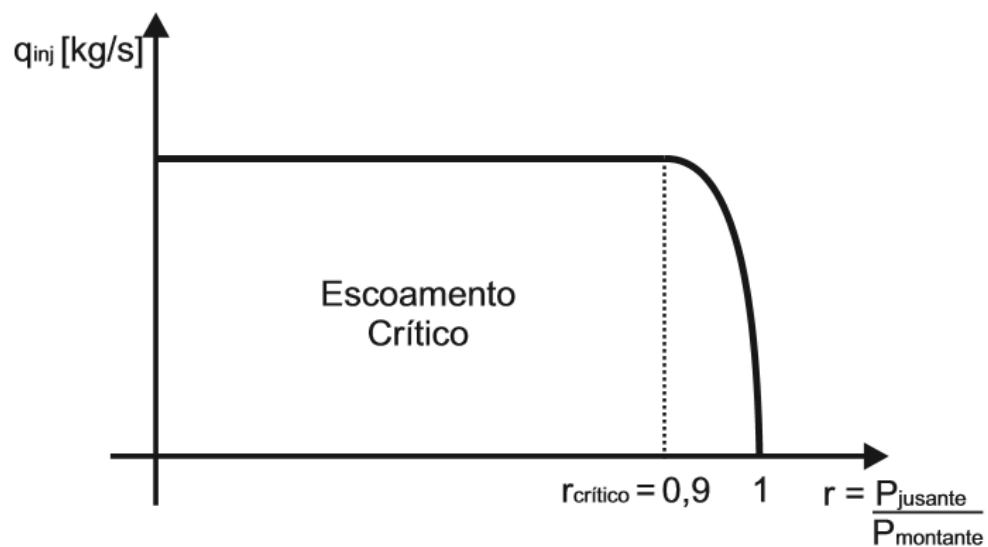


Figura 12 – Tipos de escoamento em uma Válvula Venturi. (Ganzaroli, 2011).

(Ganzaroli, 2011) afirma que para a válvula Venturi, em comparação com a de Orifício, uma pequena variação na pressão, quando na região subcrítica, gera uma variação muito grande na vazão. Conforme mostrado na Figura 12, esse tipo de válvula permite estabelecer escoamento crítico com diferencial de pressão da ordem de 10% da pressão a montante.

2.5.1.3 Válvula *Nozzle*

Além das válvulas Venturi e Orifício apresentadas até agora, (Almeida, 2014) apresenta em seu artigo um novo modelo de válvula denominado *Válvula Nozzle*.

Na Figura 13, mostra-se a geometria desse tipo de válvula em comparação as outras duas citadas anteriormente:

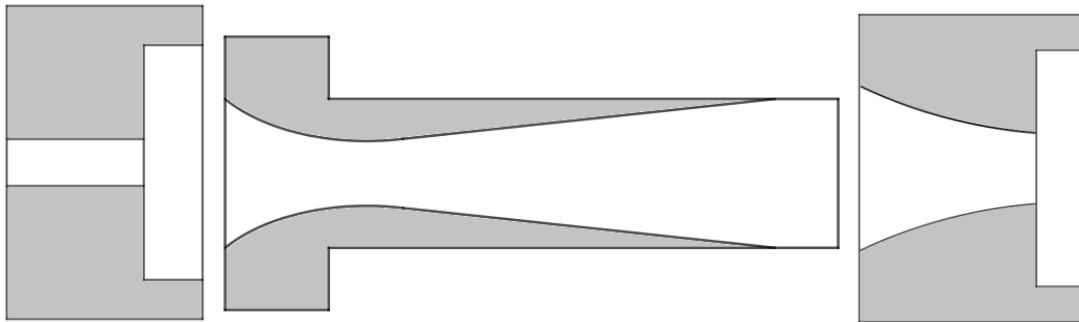


Figura 13 – Comparativo entre os três tipos de válvulas citadas. (Adaptado: Almeida, 2014).

Abaixo, na Figura 14 mostramos um relação entre o comportamento das duas válvulas já estudadas e o dessa nova proposta de válvula:

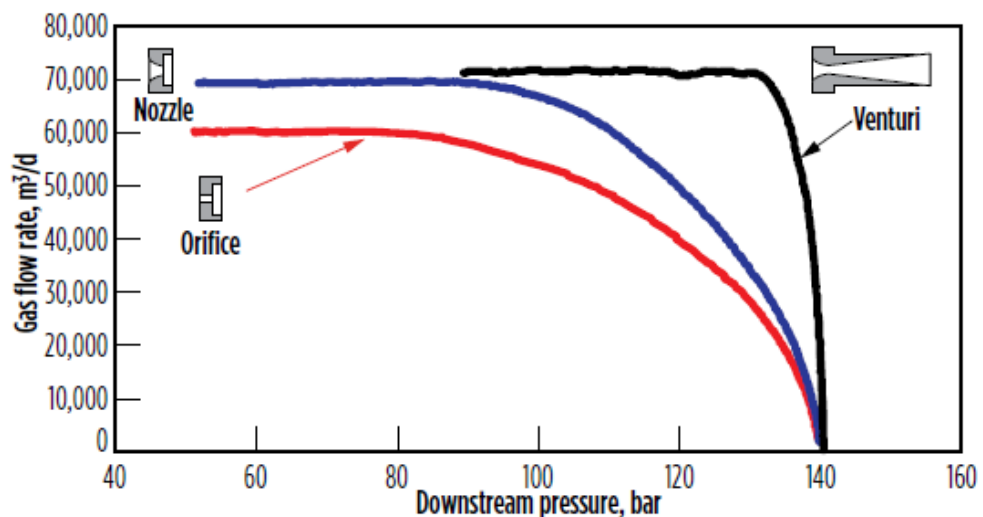


Figura 14 - Comparação entre as válvulas já apresentadas com a válvula *Nozzle* (Almeida, 2014).

Pela Figura 14 é possível perceber que essa válvula apresenta um comportamento intermediário entre Orifício e Venturi.

Segundo (Almeida, 2014), ela é similar à válvula de orifício em termos de razão crítica de pressão, porém apresenta a vantagem de permitir um modelo mais acurado, visto que o fluxo de gás se aproxima do ideal isoentrópico e, além disso, não apresenta o fenômeno de *vena contracta*. Em relação a Venturi ela apresenta similaridade em termos de coeficiente de descarga e a vantagem de permitir operar em fluxo subcrítico, que significa um aumento da sensibilidade com a pressão de injeção. Esse novo modelo combina elementos chave das duas válvulas, somado a isso, apresenta uma menor tendência à erosão e quebras, que são comuns nas placas de orifício com bordas afiadas e que causariam problemas irreversíveis na mudança do comportamento dinâmico, entre outros problemas. Ele conclui que a válvula *Nozzle* aparece como um substituto ideal, pois exibe a sensibilidade da pressão de injeção desejada em certas aplicações, além de uma suave geometria convergente, aliada a um modelo mais acurado.

2.5.1.4 Outros modelos de válvulas

Existem ainda outros modelos de válvulas de gás *lift* como as válvulas de orifício variáveis, nas quais é permitida a alteração do orifício sem a necessidade de troca.

Como hoje a indústria se concentra basicamente na Válvula de Orifício e Venturi, o trabalho focará nesses dois modelos pois o principal a ser descoberto é a posição ótima e a análise do orifício irá servir apenas para conclusão do projeto.

2.5.2 Condições de Produção das Válvulas de Orifício

Colocando o comportamento das duas válvulas (Orifício do tipo Face Plana e do Tipo Venturi) em um mesmo gráfico, temos a imagem dada por (Almeida, 2011):

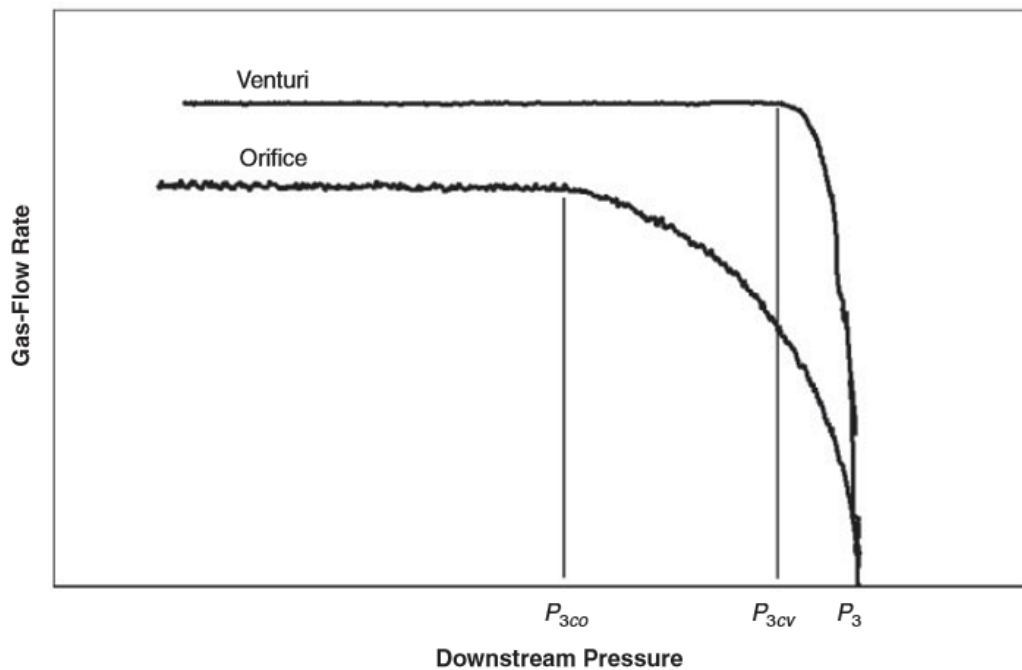


Figura 15 - Diferença no comportamento entre as válvulas Venturi e de Orifício (Almeida, 2011).

Pela Figura 15 percebe-se as vantagens e desvantagens de cada uma dessas válvulas. Sendo a pressão dada no eixo horizontal e a vazão no vertical, observe que para a válvula Venturi, em um ponto entre P_{3cv} e P_3 , uma pequena variação na pressão resulta em uma grande variação na vazão já que a região de fluxo subcrítico para esse tipo de válvula está próxima a uma reta vertical. Como visto no item □, o aumento descontrolado da vazão pode resultar em uma queda de produção devido ao escorregamento do gás e pode fazer, inclusive, com que apenas o gás seja produzido no lugar do óleo. Então, para essa região é preferível trabalhar com a válvula de Orifício pois a sensibilidade da vazão com a pressão é menor, então uma variação na pressão gera uma menor variação na produção.

Em todos os casos, o ideal é sempre trabalhar no fluxo crítico para garantir que a vazão de gás seja constante e o controle seja maior, conseguindo assim produzir a vazão ótima de óleo. Não é recomendado trabalhar no fluxo subcrítico pois teríamos instabilidade de vazão devido ao cabeceio de anular (*casing heading*).

Para garantir que o sistema sempre irá operar em fluxo crítico, nas regiões de pressão menor que P_{3co} pode-se trabalhar com qualquer tipo de válvula, pois para qualquer um dos modelos obtêm-se fluxo crítico. Já para regiões entre P_{3co} e P_{3cv} deve-se trabalhar

com a válvula Venturi já que a Válvula de Orifício está em fluxo subcrítico nessa região e a Venturi em fluxo crítico.

Se tivermos a pressão na região após a P_{3CV} , o ideal é alterarmos os parâmetros do sistema para conseguirmos alterar a região que iremos trabalhar a fim de evitar o fluxo subcrítico, se isso não for possível, como já dito, a melhor opção é trabalhar com a válvula de Orifício.

2.5.3 Válvulas de Pressão

Na Figura 16 abaixo, extraída do (American Petroleum Institute, 1994), mostramos uma comparação entre os componentes da Válvula de Gás Lift e uma válvula reguladora de pressão:

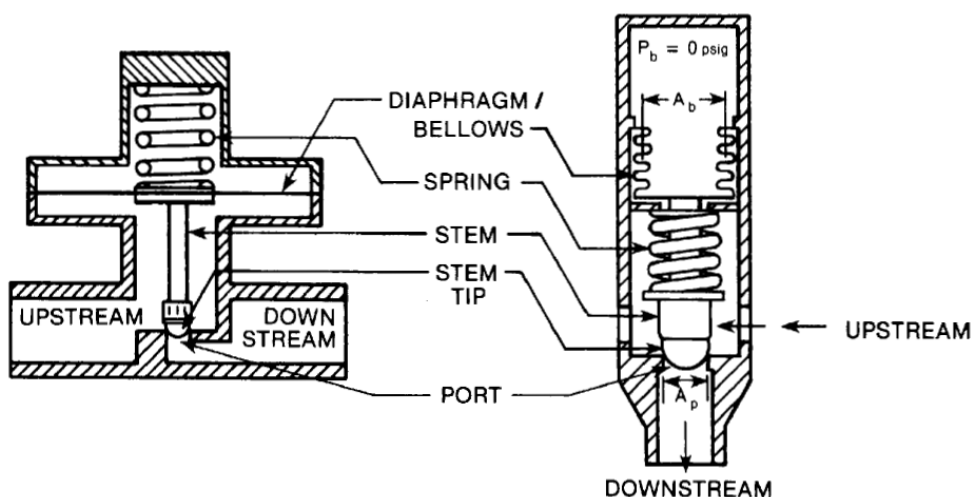


Figura 16- Comparação entre uma válvula reguladora de pressão (esquerda) e uma válvula de Gás Lift (direita).
(American Petroleum Institute, 1994).

Na Figura 16, mostra-se os principais componentes de uma Válvula de Gás Lift. Esses componentes básicos estão presentes em praticamente todos os tipos de válvula, mudando apenas o seu arranjo. Os componentes básicos de uma válvula de gás lift incluem: fole (*bellows*), uma câmara, também chamada de domo (*dome*) formada por uma extremidade do fole, a parede e a extremidade da válvula, e um orifício (*port*) que é

aberto ou fechado por uma ponta de haste (*stem tip*), sendo esse maior que o tamanho do orifício e ligado ao fole através da haste (*stem*).

(American Petroleum Institute, 1994) ainda faz uma comparação entre os três tipos de válvula com os mesmos componentes básicos citados acima. Na Figura 17, na válvula da esquerda, o pistão não tem selo, deixando o domo sem isolamento. Na figura central o pistão tem um selo em anel que faz o isolamento do domo, essa válvula não é usualmente empregada por causar pequenos vazamentos e gerar fricção devido ao anel. Na figura à direita, o fole de metal forma um selo, a extremidade inferior do fole é soldada em um plugue sólido e a extremidade superior é soldada na válvula. Esta última é a mais utilizada em VGL que dispõem de fole.

A pressão dentro do espaço do domo, P_b , é a pressão de gás previamente dimensionada. Essa pressão é calculada de acordo com as condições de operação da válvula e precisa se manter constante pois, caso contrário, a válvula perderá as características iniciais para a qual foi projetada. Devido a isso, o selamento por fole do pistão é usado na maioria das válvulas de gás *lift*, esse tipo de selamento apresentado na terceira figura impede as perdas de pressão devido à ausência de fole como na primeira figura ou pelos vazamentos e fricção devido ao selo em anel como na segunda figura.

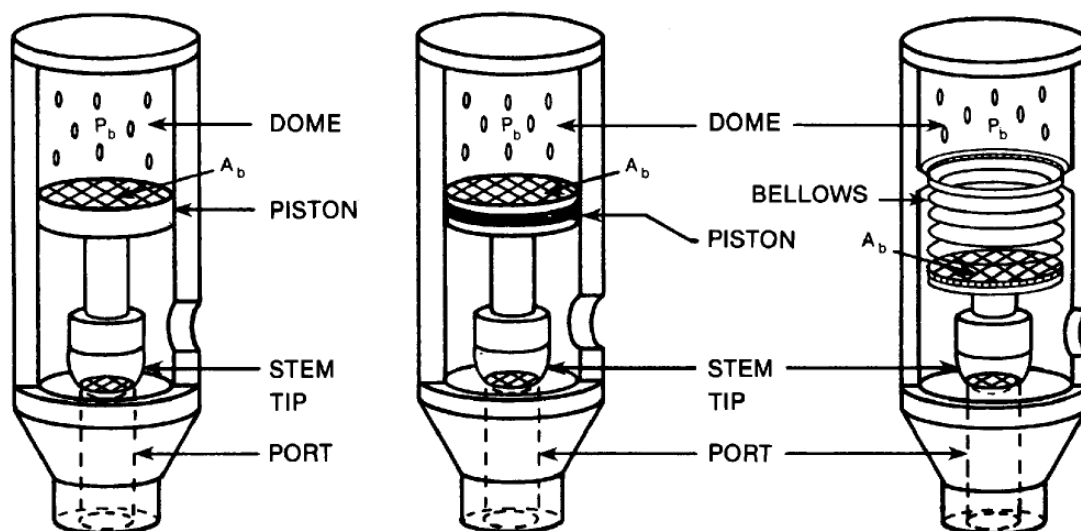


Figura 17 - Comparação entre os componentes dos tipos básicos de válvula de Gás Lift. (American Petroleum Institute, 1994).

O Manual API (American Petroleum Institute, 1994), descreve que o mecanismo de funcionamento da válvula de gás *lift* se dá da seguinte maneira:

A câmara é carregada com uma pressão previamente selecionada, como citamos acima, chamada de P_b . Essa pressão pode ser devido ao nitrogênio, a uma mola ou ambos.

Abaixo do domo há o fole que permite a expansão ou contração do volume de nitrogênio ou da mola, transmitindo esse movimento a haste. Essa, por sua vez, tem em sua extremidade inferior uma ponta, que pode ser uma sede. Ao ser pressionada na direção do orifício, a haste restringe o fluxo, isso ocorre no caso em que a pressão externa é menor que a pressão P_b definida acima. No caso em que essa pressão externa se iguala a P_b , há a iminência de abertura do orifício e quando essa pressão de gás excede a do domo, a ponta de haste é deslocada para cima permitindo um fluxo de gás de dentro da válvula de gás *lift* para o sistema.

(Ganzaroli, 2011) diz que as válvulas de pressão são basicamente usadas como válvulas de descarga e têm como principal objetivo realizar o processo de descarga no poço, ou seja, retirar o fluido de amortecimento existente na coluna de produção para possibilitar o início do processo de produção. O funcionamento dessas válvulas está relacionado ao diferencial de pressão existente entre o anular e o tubo de produção que permitirá a abertura da válvula com base na calibração do domo carregado com nitrogênio. A Figura 18 mostra os principais componentes desse tipo de válvula:

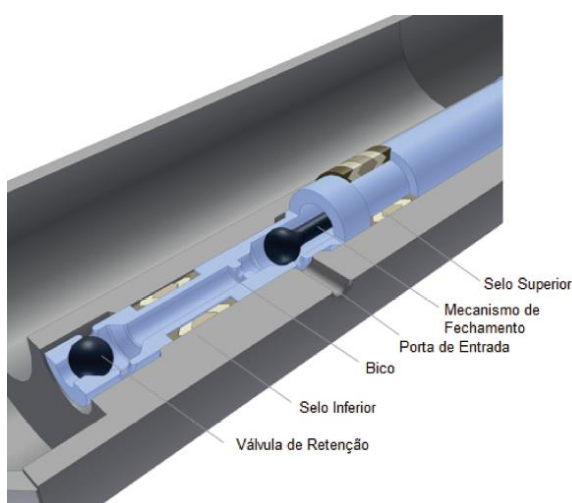


Figura 18 - Componentes de uma Válvula de Descarga. (Ganzaroli, 2011).

(Ganzaroli, 2011) afirma que a constituição da válvula de descarga é basicamente a mesma que da válvula operadora, com a diferença que há nesta um mecanismo de fechamento. Esse mecanismo é constituído por um pistão ligado a uma câmara (domo) com nitrogênio. A válvula abre quando a pressão do anular é maior que a pressão da câmara de nitrogênio e fecha quando a pressão do anular se torna menor que a pressão da câmara.

3 Dimensionamento de Gás lift

3.1 Seleção da Posição

Tanto o orifício da válvula de gás *lift* quanto a sua posição, são fatores extramente importantes para a otimização da produção de um poço. Enquanto o orifício pode variar ao longo do tempo, a posição geralmente é escolhida no início da vida produtiva e se mantém inalterada durante todo o tempo de produção desse sistema. Por isso, a posição da válvula é o fator inicial e mais importante a ser analisado no design desse método de elevação artificial. É possível alterar a válvula de gás *lift*, trocando-a após o esgotamento sua vida útil ou até mesmo antes, se for economicamente viável. Além disso, já existem válvulas de orifício variável e até válvulas de operação inteligente.

O (American Petroleum Institute, 1994), define que, visto que a pressão de injeção de gás é normalmente muito maior que a pressão estática do reservatório, as válvulas de gás *lift* são instaladas na coluna de forma que permita o poço ser progressivamente produzido, logo estabelecendo que a profundidade de injeção deva ser tão profunda quanto possível.

Dessa forma a maioria dos projetos consideram que a válvula seja instalada no ponto mais profundo apresentado pela simulação e, após instalada, essa será a posição até o final da vida produtiva do poço.

O processo de determinação da posição da válvula se dá através das curvas de equilíbrio e as determinações dessas curvas são detalhadas no Artificial *Lift* Manual Part 2ª e são mostradas no anexo deste.

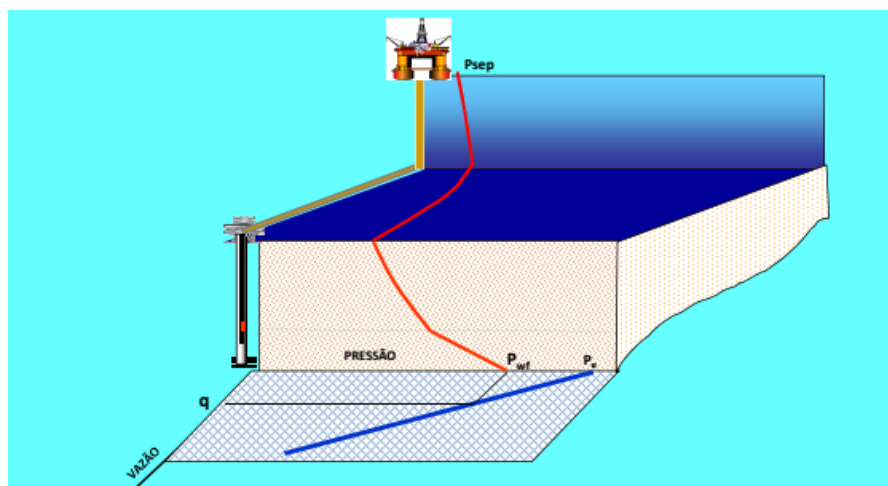


Figura 19 –Variação da Pressão em relação a profundidade. (Rosa V. R., 2014).

Pela Figura 19 é possível ver o comportamento da pressão ao longo da profundidade em um poço de petróleo. A posição da válvula deve ser escolhida de modo que a pressão de injeção do gás seja suficiente para vencer toda a perda de carga e chegar até a superfície com, pelo menos, a pressão do separador. Também deve haver um delta de pressão de segurança pois os valores usados são valores de simulação e nem sempre correspondem à realidade.

Uma simplificação do processo de determinação dessa posição é mostrado na sequência abaixo. Onde primeiro considera-se dois gráficos, sendo o eixo da pressão comum a elas: o primeiro gráfico é o de pressão em relação a vazão e o segundo gráfico de pressão em relação a profundidade. Em ambos a pressão é dada no eixo horizontal e a outra variável no eixo vertical.

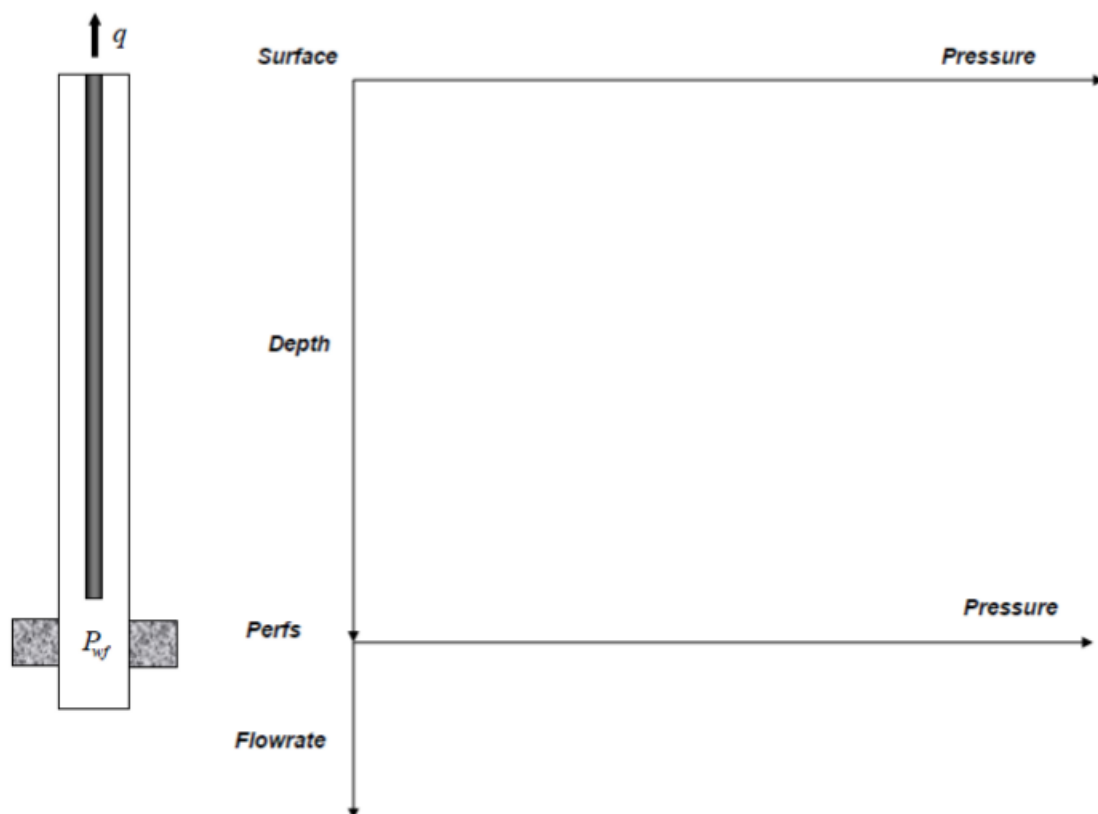


Figura 20 - Concatenação dos gráficos de pressão com a vazão e a profundidade. (Rosa V. R., 2014).

Depois disso traça-se a IPR:

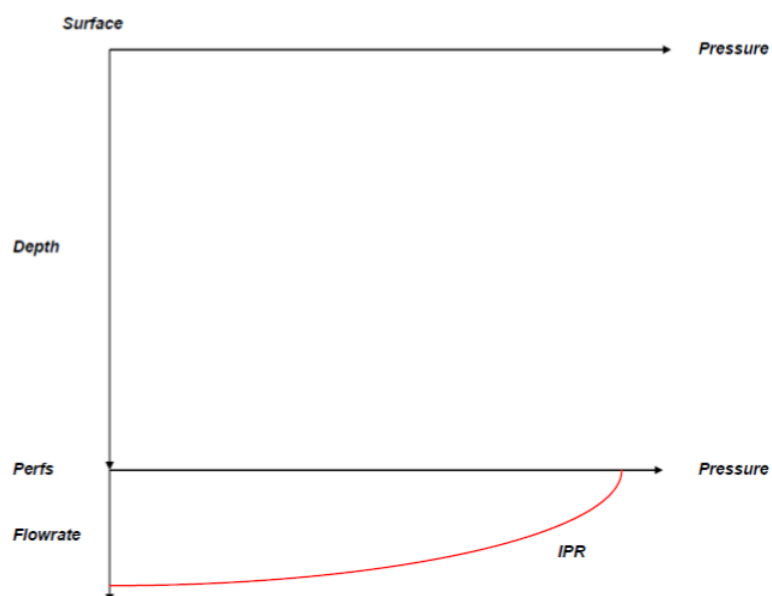


Figura 21 - IPR no gráfico de pressão e vazão. (Rosa V. R., 2014).

E considerando a pressão de fundo do poço:

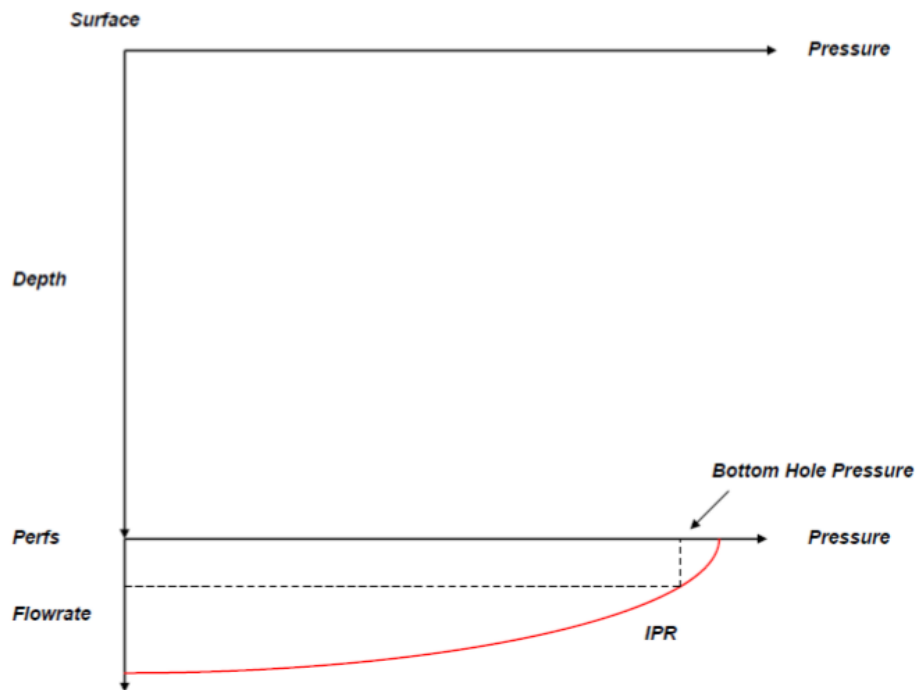


Figura 22 - pressão de fundo do poço no gráfico da IPR. (Rosa V. R., 2014).

Traça-se a curva de GLR do reservatório:

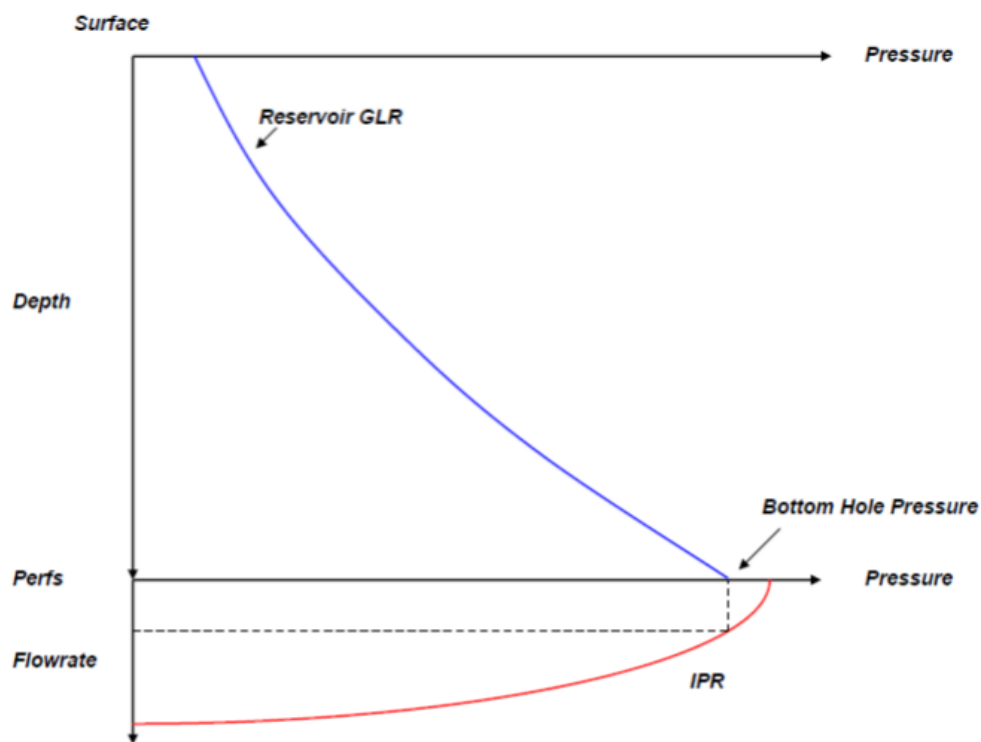


Figura 23 - Curva de pressão disponível (GLR) do reservatório. (Rosa V. R., 2014).

Marca-se então, considerando que há injeção de gás *lift*, a curva de GLR dada pela pressão disponível do reservatório mais a pressão disponível advinda do gás lift:

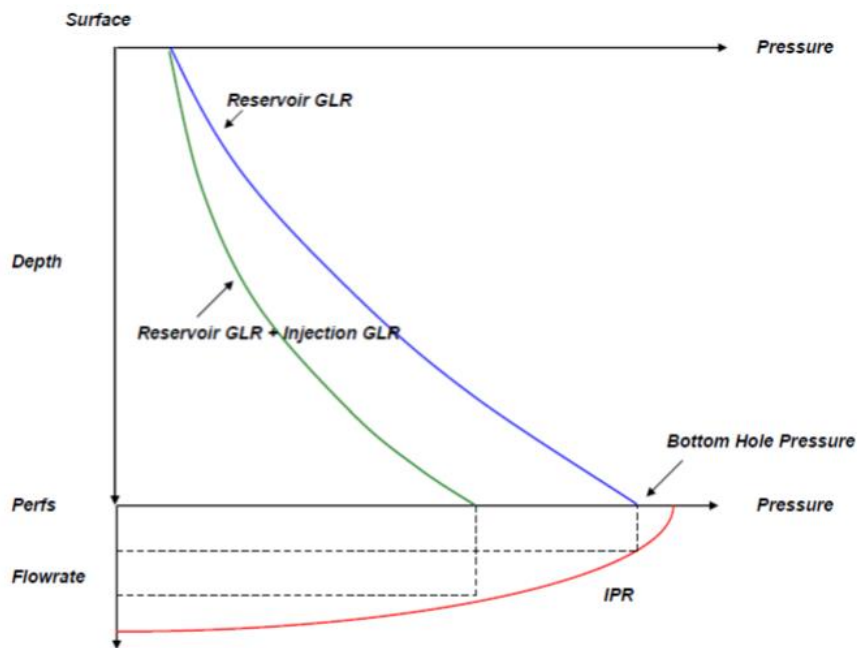


Figura 24 - Consideração da pressão disponível dada pelo gas lift para o cálculo da GLR. (Rosa V. R., 2014).

Depois adiciona-se, pela curva mostrada em rosa, a pressão de injeção de gás a essa plotagem:

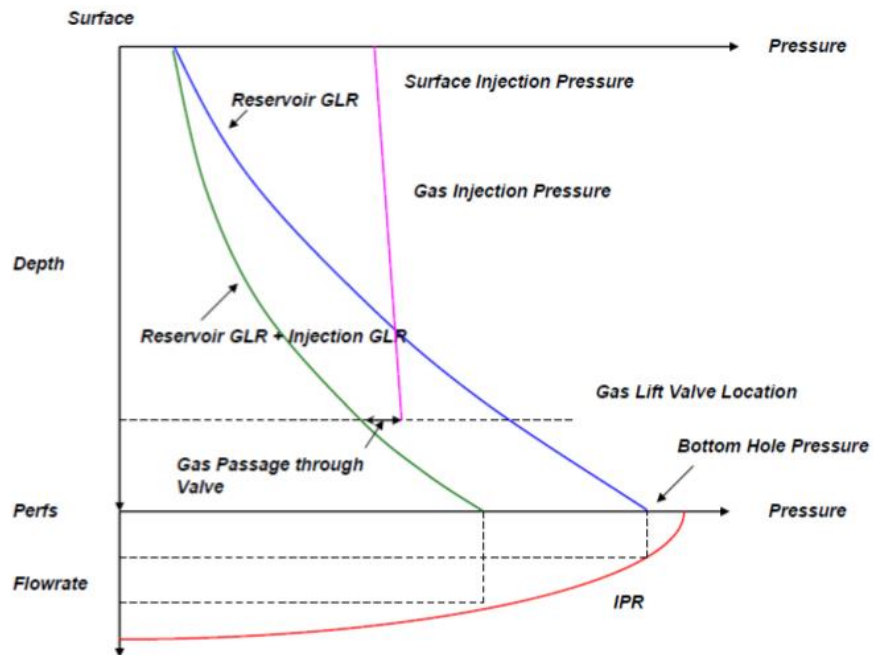


Figura 25 - Consideração da pressão de injeção de gás no cálculo da posição da VGL. (Rosa V. R., 2014)

E a posição será dada em qualquer ponto que o delta de pressão dado pela passagem do gás através da válvula seja maior que a diferença entre a curva de pressão de injeção de gás e a curva de GLR considerando o reservatório e a injeção.

Um resumo desse processo é apresentado na Figura 26 abaixo:

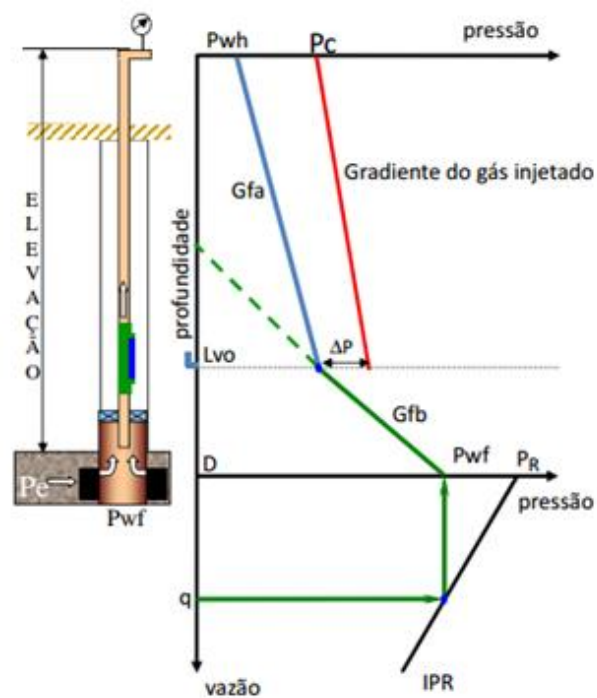


Figura 26 - Determinação da posição da VGL. (Rosa V. R., 2014)

O uso de curvas feitas manualmente geraria uma imprecisão muito grande. Para que isso não ocorra, todo esse cálculo é feito no PIPESIM. Esse *software* permite que tracemos a curva e encontremos diretamente qual a posição a VGL deve estar e qual a produção gerada a partir dessa posição. Isso é mostrado na Figura 27.

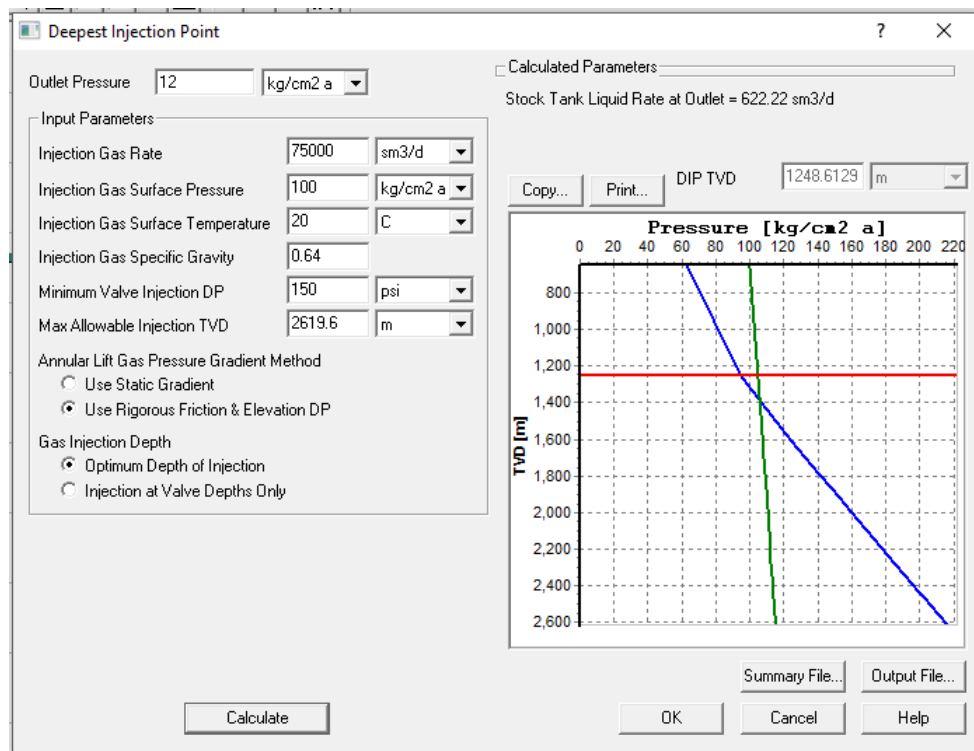


Figura 27 – Uso do Software para cálculo de posição da VGL.(Adaptado: PIPESIM).

Pela figura acima, o ponto de injeção deve ocorrer em 1248,61 metros e a vazão de líquido na superfície, para esse ponto de injeção, é de 622,22 sm³/d.

Um dos grandes problemas atualmente é a determinação de qual momento da vida produtiva do poço escolher para fazer esses cálculos.

O comportamento do poço ao longo do tempo muda, alterando todas as curvas mostradas acima e a posição ideal para a VGL, isso deve ser levado em consideração durante a escolha desse posicionamento. A maioria das referências defendem que a VGL deve ser colocada na posição mais profunda permitida pelo equipamento de bombeio, conforme citado anteriormente, mas sabemos que isso geraria uma produção ótima no início que iria decair com o tempo, podendo levar a problemas no poço.

A análise a seguir busca analisar a viabilidade de fazer alterações na posição da VGL com o passar do tempo de vida produtiva do poço.

3.2 Seleção do Orifício

O API Manual (American Petroleum Institute, 1994) afirma que o fluxo através da válvula de orifício é um item crítico, e que para campos de óleo com altas vazões de produção, as características da injeção de gás são importantes para o sucesso das operações no campo.

Em termos experimentais, as curvas de taxa de fluxo com um gás de referência são obtidas para cada válvula em função da pressão de produção, mantendo a pressão do anular constante. Essas curvas são experimentais e, para uma vazão de injeção escolhida, varia-se a vazão de produção para determinar o comportamento do fluxo. A Figura 28 ilustra essas variações.

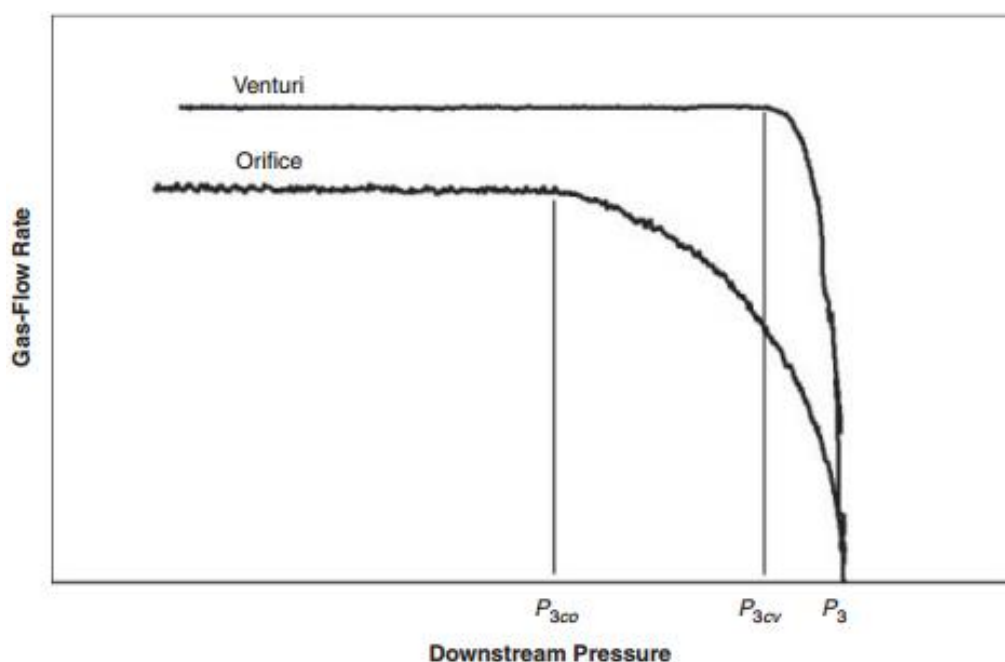


Figura 28 - Curvas de taxa de fluxo em relação a pressão para as válvulas de Orifício e Venturi (Almeida, 2011).

Vale também observar que dada uma pressão de produção, a válvula Venturi estabelece um fluxo crítico a uma pressão de injeção bem maior que a válvula de Orifício.

Analisando o comportamento das duas curvas no regime subcrítico, se pegarmos uma pressão entre P_{3cv} e P_3 teríamos uma determinada vazão para a válvula de orifício e outra para a válvula Venturi. Variando um pouco essa pressão, a variação da vazão observada na válvula de orifício é pequena, aceitável em relação à capacidade dos

equipamentos. Essa mesma variação produz uma grande variação na vazão de injeção para a válvula Venturi e, em geral, os equipamentos não são dimensionados para trabalhar com grandes variações de vazão.

Segundo (Almeida, 2015), a performance da VGL é calculada levando em conta alguns parâmetros como: tipo de válvula, pressão a jusante e a montante, temperatura de injeção, composição do gás e características da válvula como geometria interna, material e acabamento.

Ainda segundo ele, a abordagem tradicional para calcular o fluxo através de qualquer restrição é dada pela equação de Thornhill-Craver, que descreve um fluxo de um gás ideal.

Para a válvula de orifício essa equação descreve bem o comportamento desde que seja adicionado um fator de correção, que é chamado de coeficiente de descarga e serve para considerar os desvios da situação hipotética para os casos reais.

Essa equação é dada por:

$$Q_v = 423,6 \cdot C_d \cdot A \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{\zeta}{\zeta - 1} \left(\psi_{p_2}^{\frac{2}{\zeta}} - \psi_{p_2}^{\frac{\zeta+1}{\zeta}} \right)}{d_g \theta_1}}$$

Equação 6 - Q_v é a vazão de injeção de gás lift nas condições standard, dada em m³/d (Almeida, 2011).

Onde:

- C_d é o coeficiente de fluxo no choke
- A é a área do orifício da válvula, em mm²
- P_1 a pressão (absoluta) a montante do choke, é dada em bar
- θ_1 é a temperatura a montante do choke, em Kelvin
- d_g é a densidade relativa do gás em relação ao ar
- $\psi_{p_2} = \frac{P_2}{P_1}$ é a razão entre as pressões, ambas em bar

- $\zeta = \frac{c_p}{c_v}$ é a razão entre os calores específicos a pressão constante e a temperatura constante.
- O valor 423,6 que está multiplicando a equação é a constante referente às unidades adotadas para os parâmetros acima.

Nesse caso (Almeida, 2011) diz que o coeficiente de descarga dá a correção necessária das prerrogativas assumidas em relação ao caso real. Ele é obtido através de dados experimentais e depende do tipo de gás e das condições de pressão e temperatura.

Sendo:

$$\psi_{p2} = \frac{P_2}{P_1} \text{ e } \zeta = \frac{C_p}{C_v}$$

Equação 7 - Razões entre as pressões e os calores específico (Almeida, 2011).

Para o gás natural no fluxo crítico, têm-se que:

$$\zeta = 1,3 \text{ e } \psi_{p2,c} = 0,54$$

Equação 8 -Valores dos parâmetros para um gás natural (Almeida, 2011).

Então a equação acima se reduz a:

$$Q_v = 282,6 \cdot C_d \cdot A \cdot P_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{d_g \theta_1}}$$

Equação 9 -Equação da vazão de gás para gás natural em fluxo crítico (Almeida, 2011).

Para encontrar o valor do diâmetro, considerando o fluxo crítico, pode-se isolar a área nessa equação:

$$\frac{Q_v \cdot \sqrt{d_g \theta_1}}{282,6 \cdot C_d \cdot P_1} = A$$

Equação 10- Relação da área com o fluxo crítico

Sendo a área dada por:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Equação 11- Fórmula da área de uma circunferência

Substituindo:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{Q_v \cdot \sqrt{d_g \theta_1}}{282,6 \cdot C_d \cdot P_1}$$

$$d^2 = \frac{4 \cdot Q_v \cdot \sqrt{d_g \theta_1}}{\pi \cdot 282,6 \cdot C_d \cdot P_1}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v \cdot \sqrt{d_g \theta_1}}{\pi \cdot 282,6 \cdot C_d \cdot P_1}}$$

Equação 12 – Diâmetro da VGL de orifício considerando os parâmetros de simulação.

Já para a Válvula Venturi, segundo (Almeida, 2011), o modelo que melhor representa o seu comportamento é dado por:

$$Q_v = i_2 \cdot A \cdot \left(\frac{P_2}{P_{std}} \cdot \frac{z_{g,std}}{z_{g,2}} \cdot \frac{\theta_{std}}{\theta_2} \right)$$

Equação 13 – Modelo para injeção de gás em uma válvula de venturi segundo (Almeida, 2011).

Essas equações são feitas para gases ideais, e a inserção do fator de compressibilidade z serve para corrigir para a modelagem do gás natural. Para o fluxo crítico, i_2 será igual a velocidade do som nas condições de pressão e temperatura.

Analogamente, no fluxo crítico o diâmetro será dado por:

$$\frac{Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2} = A$$

$$A = \frac{Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2}$$

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2}$$

$$d^2 = \frac{4 \cdot Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{\pi \cdot P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{\pi \cdot P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2}}$$

Equação 14 – Diâmetro para uma VGL Venturi no fluxo crítico.

Onde:

- d é o diâmetro da válvula de gás lift, em mm
- Q_v é a vazão de injeção de gás lift em condições standar, em Mm³/dia
- P_{std} é a pressão nas condições standard, em bar
- $z_{g,2}$ é o fator de compressibilidade do gás a jusante da válvula
- θ_2 é a temperatura a jusante do choke, em Kelvin.
- P_2 é a pressão a jusante do choke, dada em bar
- $z_{g,std}$ é o fator de compressibilidade do gás standard
- θ_{std} é a temperatura standard, em Kelvin.
- i_2 é a velocidade do som no gás, em m/s

Segundo (Almeida, 2011), pode-se adotar $\zeta=1,3$ para gás natural e $d_g = 1$ para o ar. Analisa-se o termo Ψ_{p2} dizendo que se ele é reduzido continuamente, a taxa de fluxo aumenta até Ψ_{p2} alcançar a razão crítica, para o qual a velocidade na restrição é sônica (passa para a região crítica) e nenhuma redução adicional em Ψ_{p2} causa uma mudança na taxa de fluxo. Então se $\Psi_{p2} < \Psi_{p2c}$ (Ψ_{p2} crítico), substitui-se Ψ_{p2} por Ψ_{p2c} e nesse ponto o fluxo é máximo, conforme já mostramos acima, derivando a equação da taxa de fluxo em relação a Ψ_{p2c} e igualando essa derivada a zero, Ψ_{p2} será dado por:

$$\Psi_{p2c} = \left(\frac{2}{\zeta + 1} \right)^{\frac{\zeta}{\zeta - 1}}$$

$$q_{gM} = 879 C_c A p_{up} \sqrt{\left(\frac{k}{\gamma_g T_{up}} \right) \left(\frac{2}{k + 1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

Equação 15 – Vazão de Gás injetado para Válvula Venturi. (American Petroleum Institute, 1994).

(Almeida, 2011) ainda diz que, na válvula de orifício, a contração no fluxo do gás após o orifício, provoca o fenômeno chamado *vena contracta*. Então a menor área do fluxo não é o orifício e sim a área da *vena contracta*. A geometria suave no bico, no caso da válvula Venturi, promove um fluxo perto do ideal e previne a formação da mesma.

(Almeida, 2011) assume que, para aplicar essas equações para a válvula de orifício, deve-se assumir a hipótese adicional que não há recuperação de pressão na restrição. Isso é mostrado na Figura 29:

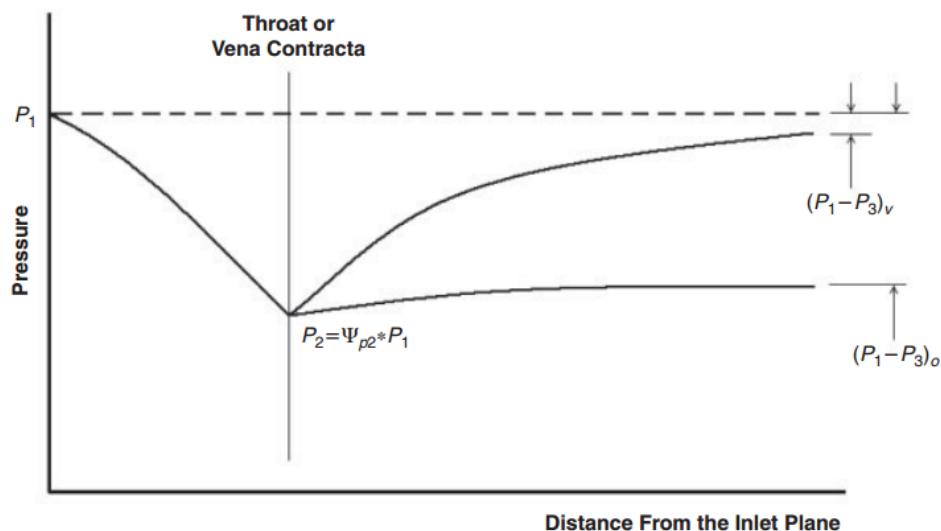


Figura 29 - Perfil de pressão com a distância em relação a garganta ou orifício para os dois tipos de válvulas estudados (Almeida, 2011).

A Equação 7, mostrada nessa seção se refere à evolução da pressão entre P_1 e P_2 , porém apenas P_1 e P_3 são conhecidos.

Almeida diz que P_1 é a pressão de injeção no anular (negligenciando as perdas de carga nos equipamentos) e P_3 é a pressão de produção na tubulação (também negligenciando essas perdas de carga). Então necessita-se de um meio para estimar P_2 a partir de P_1 e P_3 (para $P_3 > P_{3c}$, pois para $P_3 < P_{3c}$: $P_2 = P_{2c}$)

O autor diz que para orifício pode assumir que $P_2 = P_3$ (ausência total de recuperação de pressão na *vena contracta*) e aplicar a equação diretamente. Isso introduz um erro que a magnitude depende da geometria exata da válvula e de outros fatores. Outra hipótese a ser assumida é que a área da *vena contracta* é igual à área do orifício, mesmo que, em geral, fluxos reais através de placas de orifício apresentam uma *vena contracta* com área menor, e essa é a razão principal que válvulas de orifício apresentam menor taxa de gás crítica que uma válvula Venturi de mesmo diâmetro de garganta. (Almeida, 2011) afirma que para a válvula Venturi, P_2 em geral é menor que P_3 . Porém isso não é importante para esse tipo de válvula, pois a única região de interesse é a região crítica, e para essa região o P_2 será o mesmo que P_{2c} .

3.3 Determinação da Vazão

Segundo (Barreto & Moraes, 2014), a alteração na vazão em qualquer componente altera a perda de carga. Ao gerar um *gráfico* da pressão *versus* vazão obtêm-se duas curvas, a IPR (do inglês *Inflow Performance Relationship*) e a TPR ou OPR (também do inglês *Outflow Performance Relationship*). A curva de IPR representa a pressão disponível no sistema para produzir determinada vazão, a curva de OPR representa a pressão requerida para produzir essa vazão. Quando a pressão requerida é igual a pressão disponível, temos a produção efetiva do poço, que irá produzir com a vazão encontrada na interseção entre as duas curvas

A IPR e a OPR estão diretamente ligadas às condições do sistema de produção, enquanto a IPR está diretamente ligada às condições do reservatório a TPR se relaciona às condições do sistema de escoamento.

(Barreto & Moraes, 2014) ainda apresentam o exemplo de duas situações ilustradas nas Figura 30 e Figura 31 em sistemas onde há um gargalo na produção.A

Figura 30 é um exemplo da queda de pressão que geralmente ocorre durante a produção de um reservatório, chamado de depleção, o que diminui a pressão média do reservatório e faria da IPR o fator limitante da vazão. A Figura 31 é uma mudança nas condições de separação como, por exemplo, a alteração na pressão do separador, restringindo a vazão pela OPR.

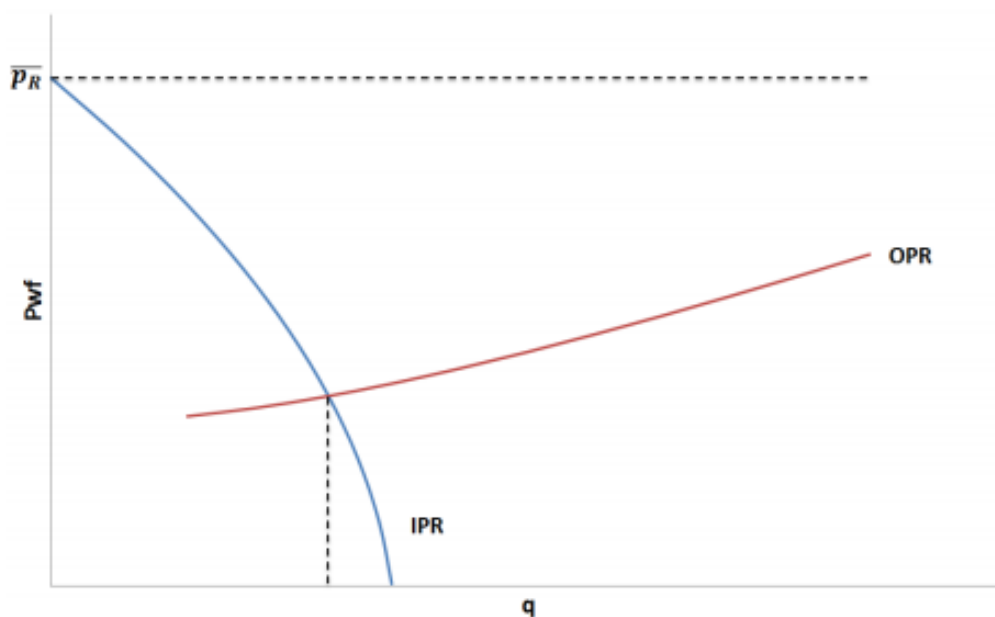


Figura 30 – Curvas de OPR e IPR com gargalo na IPR. (Barreto & Moraes, 2014).

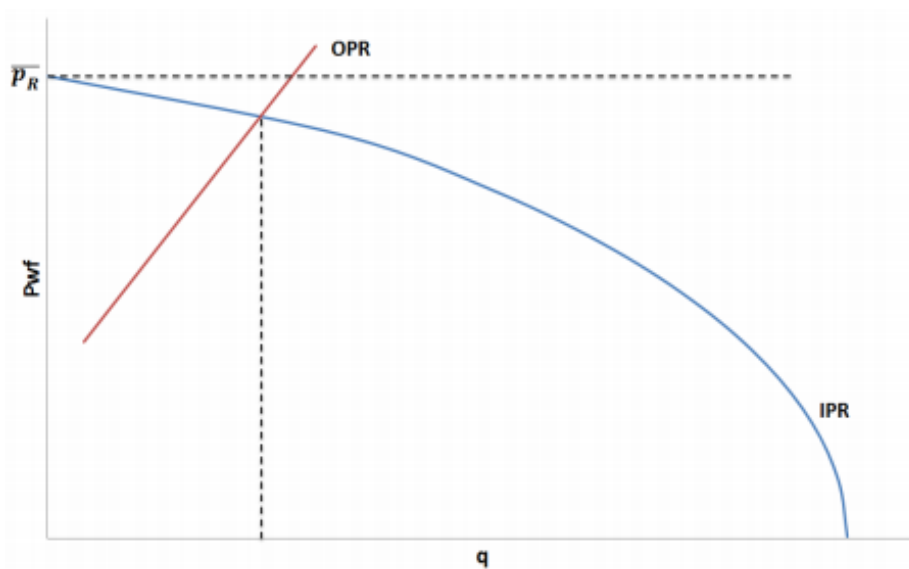


Figura 31 – Curvas de IPR e OPR com gargalo na OPR. (Barreto & Moraes, 2014).

Com o objetivo de aumentar a vazão de produção, pode-se deslocar a OPR através do uso do método de gás *lift* já citado. No entanto, é possível que o desempenho do poço seja limitado pela IPR, como a primeira figura comparativa acima, onde a perda de carga excessiva no reservatório poderia ter sido causada por dano à formação ou até

mesmo por canhoneio inadequado. Desta forma, seria inútil melhorar o desempenho por métodos de elevação artificial, a menos que a IPR também fosse melhorada.

Nos casos em que não há essa interseção, o poço é não surgente, como na imagem mostrada abaixo e, caso não seja aplicado algum método de elevação artificial, o poço não irá começar a produzir. Na imagem da direita há o poço após a aplicação do método de gás *lift*, onde a TPR é deslocada para baixo permitindo o *kickoff* do poço, ou seja, colocar o poço para produzir. A partir do momento que o poço é colocado para produzir, a vazão de produção será determinada novamente pela interseção das duas curvas, mostrado pelo ponto q_1 abaixo.

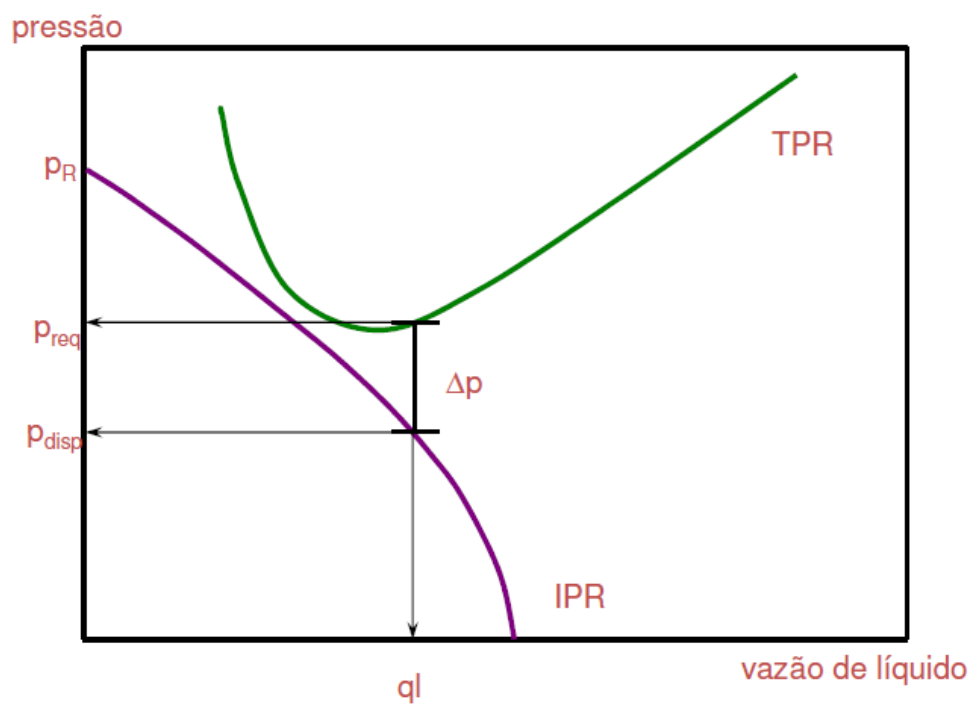


Figura 32 - IPR e OPR de um poço não surgente. (Rosa V. R., 2014).

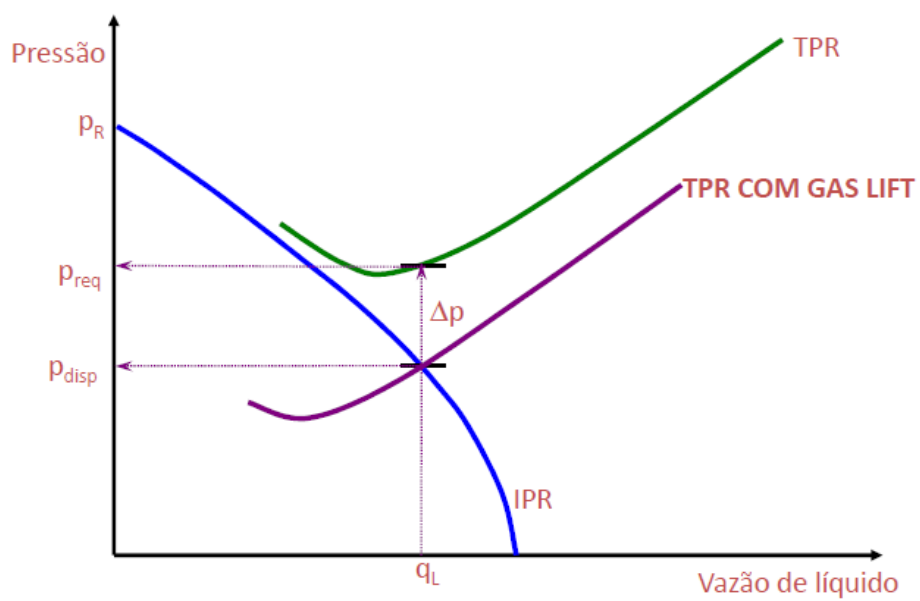


Figura 33 - IPR e OPR de um poço não surgente após a aplicação de Gás Lift. (Rosa V. R., 2014).

4 O Problema de Otimização da Posição da Válvula de Gás Lift Considerando Comportamento Temporal do Reservatório

4.1 Definição do Modelo

A escolha da posição da válvula de gás *lift* de maneira não otimizada pode não só diminuir a produção do poço como também resultar em um abandono precoce do sistema de produção.

A tomada de decisão de escolher uma única profundidade para a instalação da VGL é, na maioria das vezes, feita de maneira infundada por esse ser o processo atualmente difundido na indústria. Observa-se empresas escolhendo ou o ponto mais profundo ou aquele que permita a produção durante toda a vida produtiva do poço sem analisar os outros fatores que poderiam otimizar a recuperação.

Propõe-se uma nova abordagem, que não irá excluir escolhas como as citadas acima, mas irá garantir que, caso isso ocorra, seja pelo fato que essa é a opção que irá trazer um maior retorno financeiro ao projeto.

O problema encontrado era não haver um procedimento de escolha da posição baseado em uma análise econômica e incapacidade de calcular a viabilidade de uma operação de intervenção para alterar a posição da VGL durante a produção do poço. O presente trabalho propõe um procedimento de cálculo que permita ao tomador de decisão escolher como será o comportamento da VGL ao longo da vida produtiva, tanto em relação a orifício quanto em relação a posição.

O presente trabalho tem o objetivo de propor, através de um exemplo passo a passo, uma nova abordagem para a determinação da VGL considerando o comportamento de pressão do reservatório ao longo do tempo.

4.1.1 Entrada de dados

O primeiro passo é entrar com os dados do reservatório em um *software* de simulação.

Para isso é preciso obter da simulação de reservatórios os dados de geometria do poço, fluidos e todos as demais informações necessárias para montar um modelo. A fim de evitar uma nova simulação para cada um dos tempos analisador, faz-se uma análise de sensibilidade de todos os parâmetros que terão grande influência na produtividade,

Considerando que apenas os parâmetros básicos de Pressão, Índice de Produtividade (IP), BSW e RGO foram definidos como necessários para essa análise, estima-se esses valores ao longo da vida produtiva do poço analisado. Sugere-se a adoção de etapas definidas como início, meio e final como a análise feita nesse trabalho.

Utilizando valores obtidos através de um exemplo de simulação de reservatórios pré-definido e usados como exemplo de simulação. Esses valores são apresentados na tabela:

Tabela 1- Parâmetros usados na simulação da nova abordagem de escolha de posição.

	início	meio	fim
Pe(kgf/cm ²)	222	218	215
IP(m ³ /d/bar)	128	115	104
BSW (%)	0	45	75
RGO (m ³ /m ³)	80	100	110

4.1.2 Análise de pressão e vazão de injeção

Depois de determinado quais serão os períodos de tempo utilizados, fazer para cada um deles a simulação da sensibilidade da produção em relação a pressão e vazão de injeção:

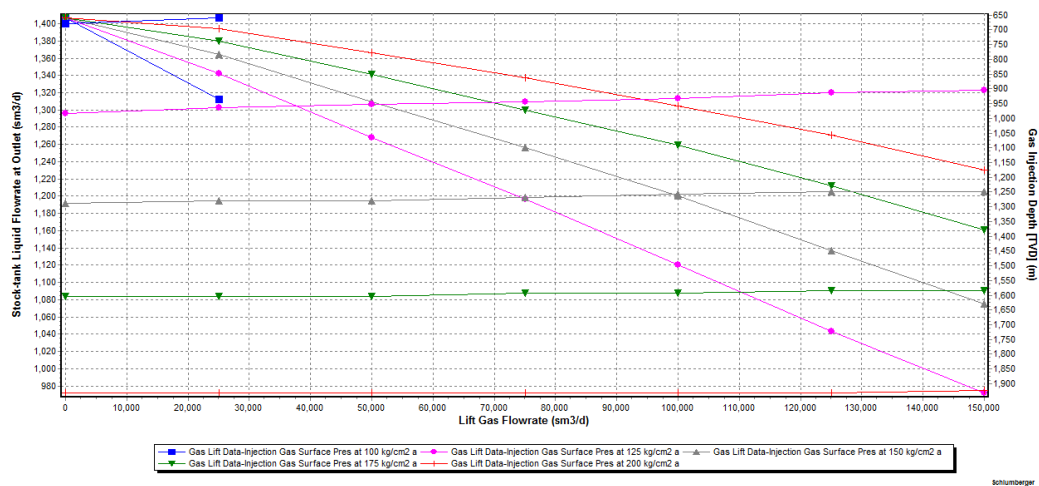


Figura 34 –Análise da Pressão e Vazão de Injeção em um Software de Simulação.

E então analisar em quais pressões tem-se produção de óleo. No exemplo acima a produção ocorre para as pressões de injeção de 100, 125 e 150 m³/d e vazões de 25000, 50000, 75000, 100000, 125000 e 150000 m³/d. Esses serão os valores usados nas próximas etapas.

4.1.3 Análise da produção e posição de injeção

Usando os valores da simulação anterior para os 3 períodos de tempo, simular qual será a vazão produzida e o TVD (True Vertical Depth), onde o TVD é a profundidade sugerida de instalação da VGL.

Para isso, considerando-se a pressão de saída como 12 kg/cm², usando o “Deepest Injection Point” do simulador e inserindo-se as informações do poço como mostrado na figura abaixo:

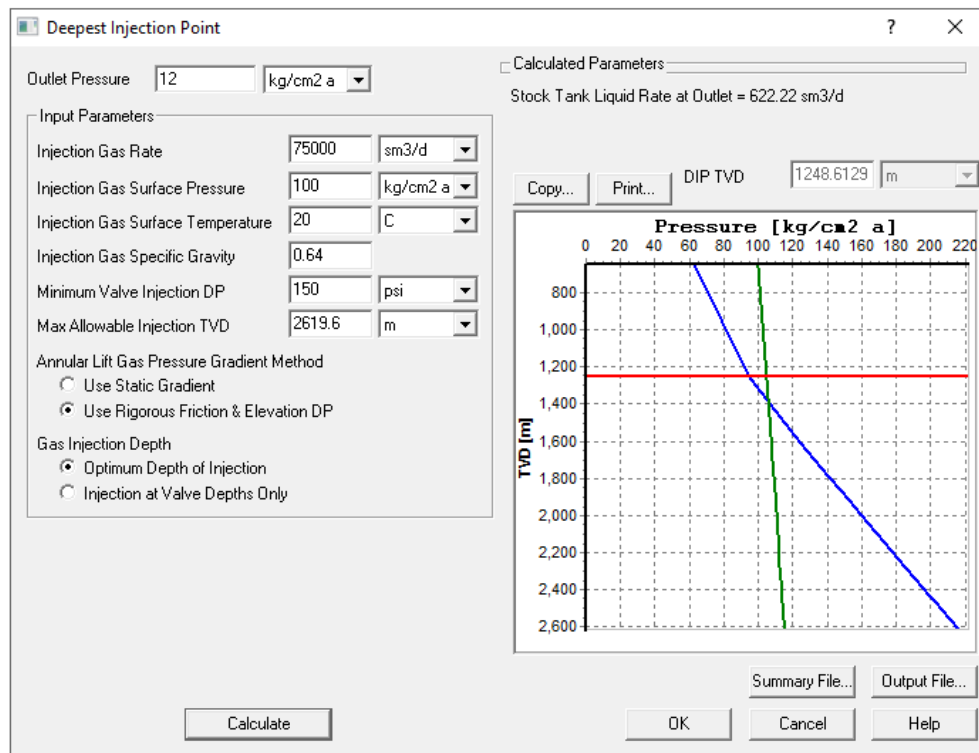


Figura 35 – Simulação do ponto mais profundo de injeção através de um Software de Simulação.

A análise de vazão e pressão de injeção resulta em uma matriz de valores, deve-se fazer a simulação da vazão e TVD para cada um dos elementos dessa matriz. A simulação com o valor do exemplo resultou nos valores apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores resultantes da simulação do TVD e vazão para cada pressão e vazão de injeção.

PRESSAO	VAZAO GL	INICIO		MEIO		FIM	
		VAZAO	TVD	VAZAO	TVD	VAZAO	TVD
		sm ³ /d	m	sm ³ /d	m	sm ³ /d	m
100	25000	832,49	983,70	738,99	1160,31	588,32	1337,53
	50000	781,58	964,08	703,77	1150,50	600,02	1337,53
	75000	730,93	953,65	659,67	1140,68	579,23	1337,53
	100000	679,16	934,03	614,63	1130,87	544,19	1327,72
	125000	629,95	924,22	568,04	1111,25	504,43	1317,92
	150000	581,03	914,41	522,56	1101,44	463,16	1308,09
125	25000	867,91	1425,83	785,04	1563,19	657,29	1699,75
	50000	839,95	1416,02	772,36	1563,19	693,43	1703,20
	75000	799,34	1406,21	738,55	1553,38	677,87	1703,20
	100000	758,58	1406,32	703,43	1553,38	649,65	1699,75
	125000	717,02	1396,38	664,02	1543,57	616,82	1696,90
	150000	675,91	1386,59	624,97	1533,76	582,85	1696,90
150	25000	893,75	1853,83	820,14	1960,45	705,34	2057,72
	50000	888,83	1853,83	831,98	1970,17	765,43	2067,44
	75000	866,98	1853,83	813,67	1960,45	763,08	2067,44
	100000	834,53	1844,60	784,21	1960,45	739,18	2057,72
	125000	798,66	1835,37	750,86	1950,72	712,31	2057,72
	150000	763,83	1835,37	718,12	1950,72	682,82	2057,72
		893,75	1853,83	831,98	1970,17	765,43	2067,44

4.1.4 Escolha da profundidade de comparação

O (American Petroleum Institute, 1994) define que a pressão de injeção de gás deve ser muito maior que a pressão estática do reservatório, a finalidade é a maior otimização possível do fluido produzido. Para isso, as válvulas de gás *lift* são instadas na coluna de forma que permita o poço ser progressivamente produzido, logo estabelecendo que a profundidade de injeção deve ser tão profunda quanto possível. Considerando essa informação e os dados apresentados na tabela, temos que a profundidade máxima será o maior valor de profundidade entre todos os valores mostrados. Assim:

Profundidade máxima 2067,44

Figura 36 – Apresentação da profundidade máxima obtida no modelo de simulação.

Esse será o valor de comparação, o valor que teríamos escolhido usando apenas as informações obtidas nas referências.

4.1.5 Obter a vazão de comparação

Simula-se, para cada período de tempo analisado anteriormente e considerando a profundidade determinada no item 4.1.4, a vazão de produção.

Cria-se uma tabela com esses valores para ser usado como comparação em relação ao novo modelo proposto.

Para o exemplo, os resultados de simulação com a profundidade escolhida são;

Tabela 3 –Vazões resultantes da simulação considerando a válvula instalada na profundidade máxima.

Profundidade máxima 2067,44	
	Vazão
Início	858,17
Meio	781,18
Fim	765,43

4.1.6 Comparação com a nova proposta

Utilizando a proposta desse trabalho, deve-se considerar a maior vazão em cada um dos períodos e qual profundidade, pressão e vazão de injeção são necessárias para obter-se tais valores.

Da tabela resultante em 4.1.3, faz-se a escolha da maior vazão em cada um dos tempos.

Tabela 4 – Escolha da maior vazão para cada um dos tempos da vida produtiva do poço.

PRESSAO	VAZAO GL	INICIO		MEIO		FIM	
		VAZAO	TVD	VAZAO	TVD	VAZAO	TVD
		sm ³ /d	m	sm ³ /d	m	sm ³ /d	m
100	25000	832,49	983,70	738,99	1160,31	588,32	1337,53
	50000	781,58	964,08	703,77	1150,50	600,02	1337,53
	75000	730,93	953,65	659,67	1140,68	579,23	1337,53
	100000	679,16	934,03	614,63	1130,87	544,19	1327,72
	125000	629,95	924,22	568,04	1111,25	504,43	1317,92
	150000	581,03	914,41	522,56	1101,44	463,16	1308,09
125	25000	867,91	1425,83	785,04	1563,19	657,29	1699,75
	50000	839,95	1416,02	772,36	1563,19	693,43	1703,20
	75000	799,34	1406,21	738,55	1553,38	677,87	1703,20
	100000	758,58	1406,32	703,43	1553,38	649,65	1699,75
	125000	717,02	1396,38	664,02	1543,57	616,82	1696,90
	150000	675,91	1386,59	624,97	1533,76	582,85	1696,90
150	25000	893,75	1853,83	820,14	1960,45	705,34	2057,72
	50000	888,83	1853,83	831,98	1970,17	765,43	2067,44
	75000	866,98	1853,83	813,67	1960,45	763,08	2067,44
	100000	834,53	1844,60	784,21	1960,45	739,18	2057,72
	125000	798,66	1835,37	750,86	1950,72	712,31	2057,72
	150000	763,83	1835,37	718,12	1950,72	682,82	2057,72
		893,75	1853,83	831,98	1970,17	765,43	2067,44

Não utiliza-se a profundidade máxima, mas os valores que resultam em uma maior vazão em cada período de tempo, conclui-se que as profundidades deveriam ser alteradas, começando com a profundidade de 1853,83, mudando para 1970,17 no meio e terminando com 2067,44.

Observa-se que a vazão do final é exatamente a mesma usada no caso de maior profundidade, isso ocorre pois essa é a maior profundidade que a VGL deve ocupar em todo o tempo.

4.1.7 Comparação entre os dois casos

Colocando os valores em uma tabela, fica-se com:

Tabela 5 – Comparação entre as vazões nos dois casos analisados.

	vazão	
	Prof. Máxima	Prof. Variável
Início	858,17	893,75
Meio	781,18	831,98
Fim	765,43	765,43

Que resulta no gráfico que segue.

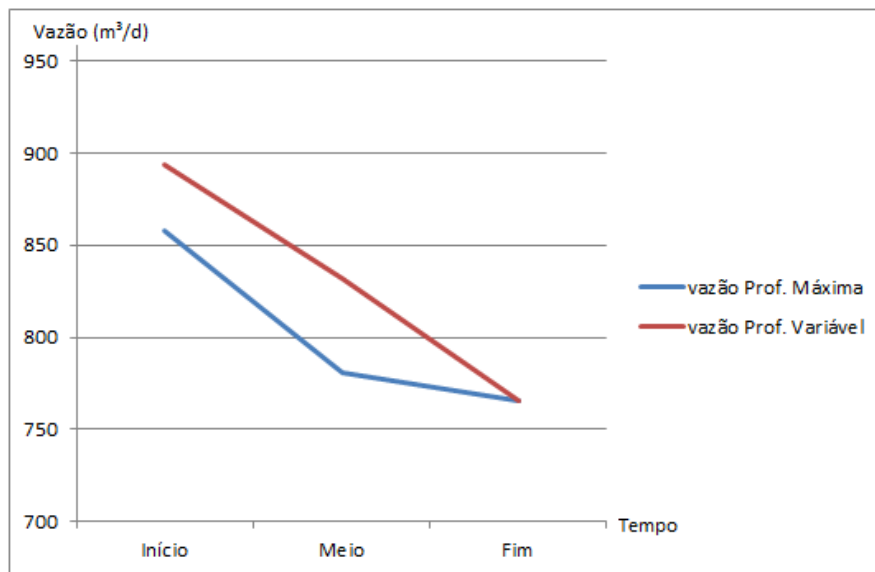


Figura 37 – Vazão de produção em relação ao tempo.

O gráfico resultante dessa simulação seria dado conforme a Figura 38:

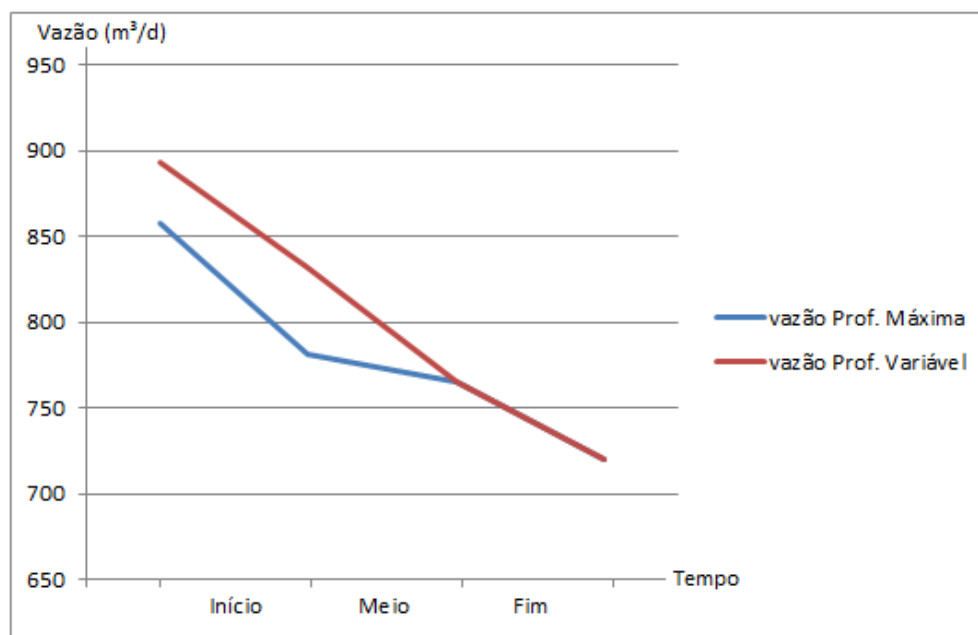


Figura 38 – Produção real do poço simulado considerando toda a sua vida produtiva.

Como o objetivo é o cálculo da diferença entre as áreas resultantes desse processo e a válvula já é instalada na profundidade máxima no tempo final, o comportamento seria o mesmo para qualquer um dos dois cenários. Dessa forma só se considerará o ganho na vazão nas duas primeiras etapas do processo. Observa-se que, visualmente, é possível perceber que a profundidade variável gera uma maior produção de óleo.

O próximo passo é analisar se executar as intervenções no poço é economicamente viável.

4.1.8 Análise de Viabilidade Econômica

Pode-se calcular o ganho na produção a partir da área de trapézios usando que a vazão é dada no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal, na Figura 38 acima e, nesse exemplo, tem-se que cada período de tempo é igual a 5 anos. Resultando nos valores de área mostrados na Tabela 6 que segue:

Tabela 6 – Cálculo do ganho de produção considerando a área das figuras.

Área	Prof. Máxima	Prof. Variável	Diferença
Início-Meio	1495906,88	1574728,63	78821,75 m ³
Meio-Fim	1411281,63	1457636,63	46355,00 m ³
			125176,75 m ³

O incremento na produção, usando esse exemplo, é de 125.176,75 m³.

Agora analisa-se a viabilidade econômica do projeto considerando um workover de 7 dias. Esse período se refere apenas ao tempo de troca da VGL nas diferentes alturas usadas. Para isso ser possível, é necessário que o poço seja projetado inicialmente com mandris cegos nas futuras posições de instalação..

Nesse caso o workover irá apenas retirar a válvula cega e colocar a VLG de operação e, na posição que a VGL antiga estava, instalar uma válvula cega.

Para isso, é necessário que todas as posições sejam conhecidas antes da descida da coluna, caso contrário, será necessária a troca de toda a coluna de produção, gerando um custo maior e um *workover* mais demorado. Essa opção não é inviável, só deve ser analisada se vale a pena economicamente e essa análise não precisa ser feita no início do projeto, antes da instalação da coluna.

Sendo a análise financeira, já com todos os custos, mostrada na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 – Valores necessários para analisar financeiramente a viabilidade do projeto.

1 m ³	=	6,29 barris
Aumento na produção (barril)		787337,97 barris
Aumento na produção (US\$)		39366898,70 US\$
Preço do barril		50,00 US\$
Aluguel sonda/dia		130000,00 US\$
Lucro cessante início/dia		44687,50 US\$
Lucro cessante meio/dia		41599,00 US\$
Tempo médio de intervenção		7,00 dias
 Custo Intervenção		 2424005,50 US\$
Lucro Gerado		39366898,70 US\$
Resultante		36942893,20 US\$

Como o resultante é positivo, vale a pena fazer essa intervenção.

Então conclui-se que, economicamente, o mais viável as seguintes posições apresentadas na Tabela 8:

Tabela 8 – Valores de TVD's que serão usados no projeto e vazões de produção esperadas.

	início	meio	fim
Pe(kgf/cm ²)	222	218	215
IP(m ³ /d/bar)	128	115	104
BSW (%)	0	45	75
RGO (m ³ /m ³)	80	100	110
Vazão	893,75	831,98	776,05
TVD	1853,83	1970,17	1873,46

4.1.9 Escolha do tipo de válvula

Garantida a viabilidade econômica deve-se analisar se o sistema sempre irá trabalhar com fluxo crítico. Para isso calcula-se a razão crítica dada pela Equação 16 abaixo, que é dada por:

$$r_c = \frac{P_{jusante}}{P_{montante}}$$

Equação 16- Equação da Razão Crítica

Para encontrar essa razão, calcula-se a pressão à jusante, que é a pressão na coluna de produção. Ela deve ser calculada exatamente no ponto em que a VGL será instalada, então, para cada uma das posições encontradas, mede-se a pressão em relação à elevação para analisar qual será a pressão na profundidade escolhida.

Para o caso inicial tem-se o perfil apresentado na Figura 45:

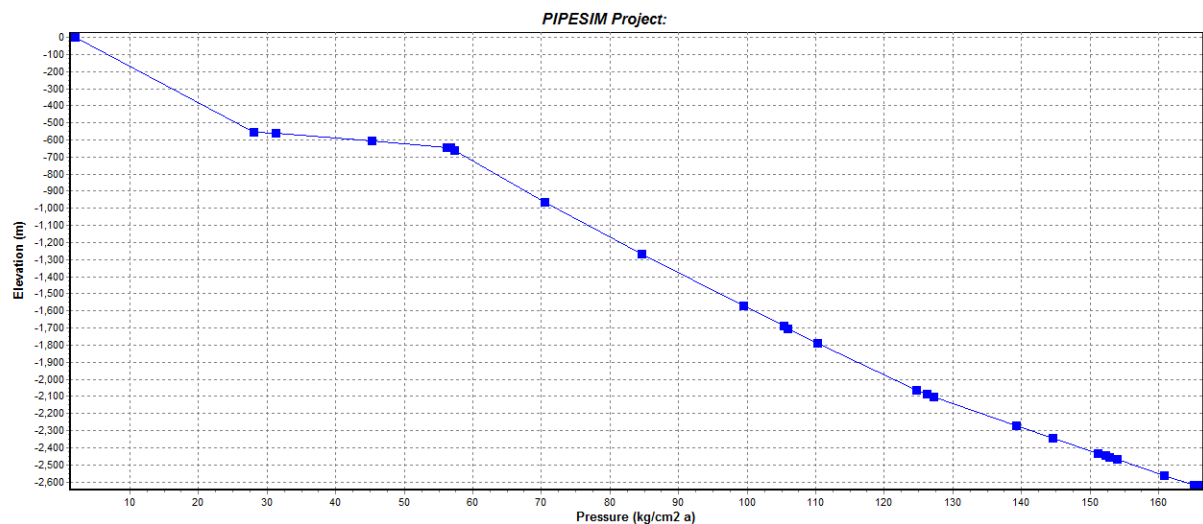


Figura 39 – Perfil de pressão no momento inicial da vida produtiva do poço.

Realizando tais medidas para os 3 tempos, obtém-se as seguintes pressões a jusante mostradas na Tabela 9. Depois, usando as informações de simulação, calcula-se a pressão a montante. Considerando para isso a pressão no anular na altura que a válvula está instalada.

Por fim, usa-se a fórmula da razão crítica, resultando nos valores apresentados na tabela abaixo:

Tabela 9 – Valores necessários para a análise da razão crítica em cada um dos tempos.

	início	meio	fim
Pe(kgf/cm ²)	222	218	215
IP(m ³ /d/bar)	128	115	104
BSW (%)	0	45	75
RGO (m ³ /m ³)	80	100	110
Vazão	893,75	831,98	765,43
TVD	1853,83	1970,17	2067,44
Pjusste	113,93	128,47	141,73
Pmontante	165,06	166,13	167,04
Rc	0,69	0,77	0,85

Analisando as razões encontradas, esse trabalho apresentou no capítulo 2, o comportamento para os dois tipos de válvulas que iremos analisar. Mostrando esse comportamento:

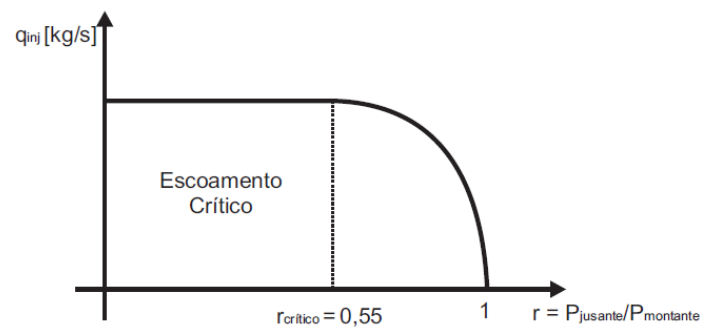


Figura 40- Comportamento da Válvula de Orifício. (Ganzaroli, 2011).

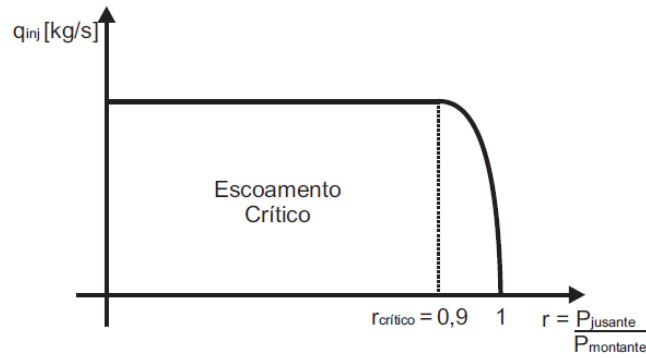


Figura 41 – Comportamento da Válvula Venturi. (Ganzaroli, 2011).

Assim, pode-se afirmar que para as faixas de valores dessa razão, a melhor opção de escolha é dada por:

$r_c < 0,55$: podemos escolher qualquer uma das válvulas

$0,55 < r_c < 0,9$: escolher válvula Venturi

$r_c > 0,9$: não conseguimos trabalhar em fluxo crítico

Como o raio crítico está entre 0,55 e 0,9 nos 3 casos, opta-se por trabalhar com a Válvula Venturi para as 3 posições.

4.1.10 Determinação do Orifício

Como já foi definido que o poço irá trabalhar em fluxo crítico usando válvula Venturi, pode-se usar a equação abaixo para determinar o diâmetro nessa situação:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{\pi \cdot P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2}}$$

Equação 17 – Cálculo do diâmetro para Válvula Venturi.

Onde:

- d é o diâmetro da válvula de gás lift, em mm
- Q_v é a vazão de injeção de gás lift em condições standar, em Mm³/dia
- P_{std} é a pressão nas condições standard, em bar
- $z_{g,2}$ é o fator de compressibilidade do gás a jusante da válvula
- θ_2 é a temperatura a jusante do choke, em Kelvin.
- P_2 é a pressão a jusante do choke, dada em bar
- $z_{g,std}$ é o fator de compressibilidade do gás standard
- θ_{std} é a temperatura standard, em Kelvin.
- i_2 é a velocidade do som no gás, em m/s

Para encontrar o valor de z , usa-se primeiro as correlações de Standing dadas no anexo 4 para encontrar a pressão e temperatura pseudocríticas:

$$P_{pc} = 677 - 15 \cdot d_g - 37,5 \cdot (d_g)^2$$

$$T_{pc} = 168 + 325 \cdot d_g - 12,5 \cdot (d_g)^2$$

Usando a densidade do gás dada no simulador.

E depois as relações:

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}}$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$$

Insere-se no excel todos os parâmetros necessários para calcular o diâmetro:

Utilizando os valores da simulação e os valores de pressão e temperatura pseudoreduzida da carta de Standing, obtem-se z e é possível calcular o diâmetro já convertido para polegadas.

Tabela 10 –Determinação do diâmetro considerando os parâmetros de cálculo.

Válvula Venturi		início	meio	fim
Condições std	vazão de injeção	0,025	0,50	0,50
	pressão std	1,01	1,01	1,01
	temperatura std	161,85	162,92	163,81
	z gas std	0,98	0,98	0,98
Condições a montante da válvula	densidade do gás	0,66	0,68	0,71
	pressão montante	161,85	162,92	163,81
	temperatura montante	361,15	361,15	361,15
	z gas montante	0,88	0,88	0,88
	pressão pseudocrítica	650,77	649,46	647,45
	pressão pseudoreduzida	0,25	0,25	0,25
	temperatura pseudocrítica	377,06	383,22	392,45
	temperatura pseudoreduzida	0,96	0,94	0,92
velocidade do som no gás		270,00	270,00	270,00
diâmetro		0,05	0,21	0,21

Os diâmetros de prateleira são listados abaixo:

$$\frac{7}{64}, \frac{1}{8}, \frac{3}{16}, \frac{3}{8}, \frac{1}{4}, \frac{5}{16}, \frac{1}{2}, \frac{9}{16}, \frac{5}{8}$$

Considerando esses diâmetros, no início da vida produtiva usaríamos o de $\frac{7}{16}$, no meio e no fim usaríamos o mesmo valor: $\frac{1}{4}$.

4.2 Procedimento de Escolha

Após a definição de um mecanismo de escolha exemplificado no item 4.1, faz-se necessário um procedimento para permitir o uso dessa análise por qualquer pessoa.

Esse procedimento é dado em alguns poucos passos.

1. Entrada de Dados.

Pegar, da simulação de reservatórios, os dados de geometria do poço, fluidos e todos as demais informações necessárias para montar um modelo em um software de simulação. A fim de evitar uma nova simulação para cada um dos tempos considerado, faz-se uma análise de sensibilidade de todos os parâmetros que terão grande influência na produtividade,

Considerando um exemplo em que apenas os parâmetros básicos de pressão, Índice de Produtividade (IP), BSW e RGO foram definidos como necessários para a análise. Estima-se esses valores ao longo da vida produtiva do poço analisado, nessa primeira análise sugere-se a adoção do início, meio e final.

Caso algum outro parâmetro apareça como necessário para aumentar a precisão da análise, inclui-se esse valor e analisa-o para os tempos considerados.

Com esses parâmetros, completa-se uma tabela como a mostrada abaixo;

Tabela 11 – Exemplo de Entrada de Dados

	início	meio	fim
Pe(kgf/cm ²)			
IP(m ³ /d/bar)			
BSW (%)			
RGO (m ³ /m ³)			

2. Entrada dos dados do modelo em um software de simulação.

Usando qualquer software de simulação (no exemplo foi usado o PIPESIM), cria-se um número de modelos de poços referentes a quantidade de tempos que pretende-se analisar, um para cada tempo da vida produtiva com as informações dadas no modelo de poço e as informações listadas acima, sempre definindo na análise de sensibilidade quais são os parâmetros críticos que devem ser considerados.

Essa análise deve ser feita para os n tempos de vida produtiva do poço que forem considerados como necessários, para simplificar a análise, no primeiro momento adota-se o início, meio e fim da vida produtiva.

3. Validação do Processo

O objetivo nessa etapa é validar se vale a pena ou não prosseguir com a análise. É um estudo inicial que irá analisar se o incremento na produção será suficiente para pagar os custos com manutenção considerando o cenário mais básico apenas para evitar a perda de tempo em processos que, logo de cara, dariam um resultado negativo.

4. Determinação da maior posição e vazão nessa posição.

Determinar, usando o PIPESIM, qual será o TVD e a vazão para o início e o fim da vida produtiva, depois fazer o cálculo, usando o maior TVD entre os dois, qual seria a vazão no início e no fim da vida produtiva.

5. Cálculo do Processo

Para o início da vida produtiva, simular o TVD que resulta na maior vazão.

5.1. Para o fim da vida produtiva, simular o TVD que resulta na maior vazão.

5.2. Colocar esses valores em uma tabela:

Tabela 12 –Tabela Exemplo de TVD e vazão para dois tempos da vida produtiva.

	início	fim
TVD		
Q		

5.3. Pegar o maior valor de TVD entre eles e calcular a vazão usando esse valor de TVD para os dois tempos (observe que para o tempo em que esse maior valor ocorre a vazão será a mesma daquela já encontrada).

Tabela 13 – Tabela Exemplo de TVD e vazão considerando as duas análises adotadas, para dois tempos da vida produtiva.

			menor TVD	
	início	fim	início	fim
TVD				
Q				

Obs: Para uma resposta mais visual, é possível plotar o gráfico de produção pelo tempo e calcular a área do gráfico em cada um dos casos.

- 5.4. Fazer a diferença entre as áreas, considerando que no primeiro caso estamos mudando a posição no início e no fim e no segundo caso estamos mantendo a posição fixa ao longo de todo o tempo;
- 5.5. Calcular o custo total de intervenção durante o período considerado;
- 5.6. A diferença entre as áreas dará a produção incremental usando essa nova abordagem, calcular o valor em dólares desse incremento na produção;
- 5.7. Comparar o incremento na produção com o custo de intervenção. Se o incremento na produção for maior que o custo de intervenção, analisa-se se esse lucro a mais é suficiente para prosseguir com a análise;
- 5.8. Assim, se:

Diferença na Produção > Custos Totais

Continuar a análise.

Diferença na Produção < Custos Totais

Parar a análise pois já vimos que não vale a pena.

Com a condição que a diferença na produção deve ser suficiente para o tomador de decisão aceitar essa ideia, por exemplo um lucro de U\$S 1,00 pode não ser interessante para prosseguir a análise e mesmo o algoritmo orientando a continuá-la, a escolha seria parar já que, para ele, essa escolha não vale a pena.

Outra opção, mais rápida, é fazer diretamente usando o código do Python apresentado no Anexo V que já faz todos os cálculos e retorna a validação do processo.

6. Verificar quais pressões e vazões de injeção podem ser usadas na análise.

Depois de validado o processo, já sabemos que deve valer a pena fazer essa intervenção. O próximo passo é fazer uma análise mais detalhada para validar essa afirmação e escolher em quais posições a VGL será instalada.

Para isso deverá ser feito uma simulação de sensibilidade de produção em relação a pressão e vazão de injeção para sabermos em quais valores de P_{inj} e Q_{inj} iremos trabalhar.

Nessa análise iremos obter todos os valores de pressão e vazão de injeção possíveis.

7. Para os valores de P_{inj} e Q_{inj} encontrados no passo 3, simular o TVD e o Q para os 3 períodos de tempo.

Depois de descobrir quais pressões e vazões de injeção poderão ser usadas, devemos testar todas as opções e completar a tabela abaixo:

Tabela 14 – Tabela de inserção de valores de TVD e vazão considerando a pressão e vazão de gás lift.

PRESSAO	VAZAO GL	INICIO		MEIO		FIM	
		VAZAO	TVD	VAZAO	TVD	VAZAO	TVD

Essa tabela é apenas um exemplo onde temos 3 pressões possíveis e 6 diferentes vazões de injeção. Na última linha de cada um dos tempos deve ser colocada a maior vazão e qual o TVD que resulta nessa vazão.

8. Assim como no passo 2, criar uma tabela considerando a vazão e o TVD em cada um dos tempos.

8.1. Primeiro vamos criar a tabela usando apenas os valores encontrados acima, da vazão máxima considerando que a posição está variando ao longo do tempo. Usar os valores obtidos na tabela do item 2.4 para completar a tabela abaixo:

Tabela 15 – Tabela Exemplo de TVD e vazão para os três tempos da vida produtiva.

	início	meio	fim
TVD			
Q			

8.2. Calcular a vazão considerando o maior TVD encontrado.

Usando o maior valor de TVD entre os 3 encontrados em 8.1, usar esse valor no PIPESIM para calcular qual será a vazão em cada um dos tempos se colocarmos a VGL na posição mais profunda, conforme orienta a literatura.

Com esses valores, completar a tabela:

Tabela 16 – Tabela Exemplo de TVD e vazão considerando as duas análises adotadas, para os três tempos da vida produtiva.

				menor TVD		
	início	meio	fim	início	meio	fim
TVD						
Q						

Depois de validado o processo no item 2, já sabemos que deve valer a pena fazer essa intervenção.

9. Calcular a diferença de produção usando os dois processos.

Novamente usando a área do trapézio, mas agora de dois trapézios (um considerando o início e o meio e o outro o meio e o fim da vida produtiva), calcular a produção em cada uma das condições.

Depois fazer a diferença entre essas duas produções para calcular o incremento na produção que é obtido ao usar a posição variável da VGL.

Esse incremento é dado em m³, para saber o valor em dólares, passar o incremento de produção de m³ para barris e depois fazer o cálculo considerando o preço do barril para saber qual foi o retorno desse projeto.

10. Calcular o custo de intervenção.

Para alterar a posição da VGL existe um custo de intervenção que é dado pelo aluguel da sonda que irá fazer essa operação mais o lucro cessante, que é o quanto se deixa de produzir quando uma intervenção está em andamento.

Então calculando tanto o lucro cessante quanto o custo de aluguel da sonda será possível analisar qual é o custo total de realizar esse projeto.

11. Verificar a viabilidade do projeto.

Novamente fazer a análise da viabilidade do projeto. Dessa forma, como no item 2 faremos:

$$\textit{Diferença na Produção} > \textit{Custos Totais}$$

Continuar a análise.

$$\textit{Diferença na Produção} < \textit{Custos Totais}$$

Parar a análise pois já vimos que não vale a pena.

Com a condição que a diferença na produção deve ser suficiente para o tomador de decisão aceitar essa ideia. Toda essa análise, pode ser feita no excel, porém o trabalho é muito maior. Uma outra opção é fazer o código em alguma linguagem e apenas entrar com os dados.

O código dessa parte do processo, do item 3 até o item 8 é dado em anexo.

12. Definir a razão crítica.

Depois de tomada a decisão de continuar com o processo, é necessário escolher qual tipo de VGL será usada, nessa análise vamos considerar dois tipos (VGL de Orifício e Venturi). Para tomar a decisão precisamos calcular a razão crítica (r_c) que é dada por:

$$r_c = \frac{P_{jusante}}{P_{montante}}$$

Equação 18 – Cálculo da Razão Crítica

12.1. Calcular a pressão a jusante.

Como visto, calcular a pressão a jusante para os 3 períodos da vida produtiva do poço.

12.2. Calcular a pressão a montante.

Analogamente, também calcular a pressão a montante.

12.3. Para cada tempo, completar a tabela abaixo com as pressões encontradas acima e calcular a razão crítica.

Tabela 17 – Parâmetros necessários para o cálculo da Razão Crítica.

	início	meio	fim
$P_{jusante}$			
$P_{montante}$			
R_c			

13. Escolher o tipo de válvula a ser usada.

Vimos que, a escolha da válvula depende da razão crítica por sempre queremos trabalhar no fluxo crítico

Como já visto, temos a seguinte condição para determinar a válvula:

$r_c < 0,55$: podemos escolher qualquer uma das válvulas

$0,55 < r_c < 0,9$: escolher válvula Venturi

$r_c > 0,9$: não conseguimos trabalhar em fluxo crítico

E como visto na parte teórica, podemos usar as equações abaixo para determinar o orifício da Válvula de Orifício:

Equação 19 – Cálculo do diâmetro de uma Válvula de Orifício.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v \cdot \sqrt{d_g \theta_1}}{\pi \cdot 282,6 \cdot C_d \cdot P_1}}$$

E da Válvula Venturi:

Equação 20 – Cálculo do diâmetro de uma Válvula Venturi.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v \cdot P_{std} \cdot z_{g,2} \cdot \theta_2}{\pi \cdot P_2 \cdot z_{g,std} \cdot \theta_{std} \cdot i_2}}$$

Dessa forma, podemos escrever o código conforme mostrado no anexo VI para determinar, dado que o projeto é viável, qual deverá ser o diâmetro a ser escolhido.

14. Valor Presente Líquido do Projeto.

Garantido todas as partes mostradas acima, deve-se calcular o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto para conclusão da análise financeira.

Qualquer projeto deve mostrar qual é o valor, no dia atual, que esse projeto retornaria caso fosse feito o investimento com determinado custo de oportunidade. Podemos representar o fluxo de caixa através do esquema abaixo:

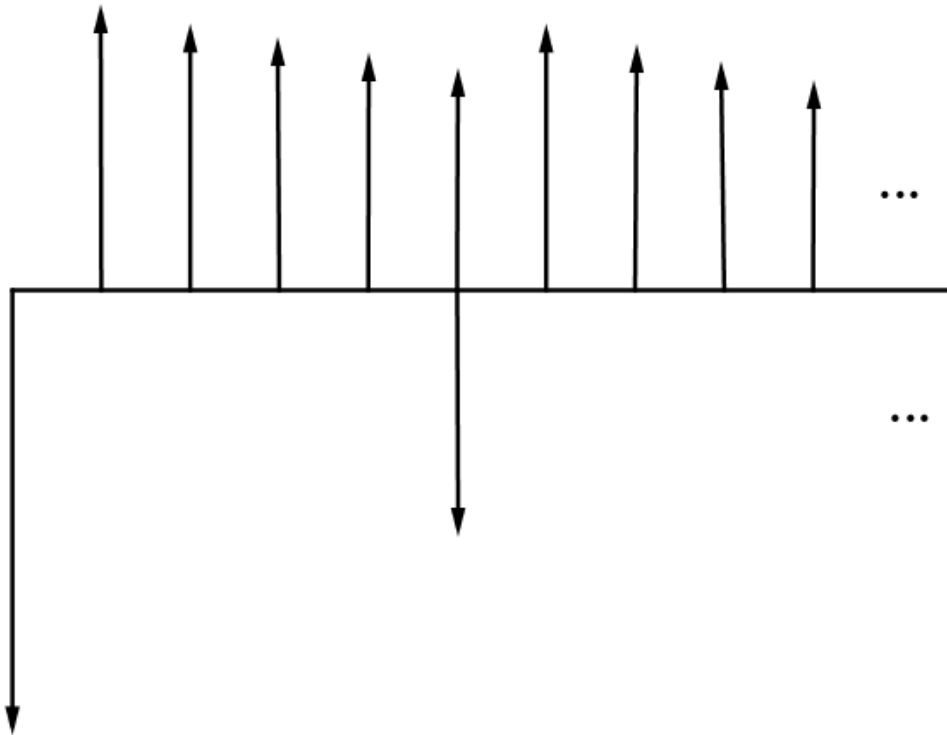


Figura 42 – Exemplificação de um fluxo de caixa para cálculo do Valor Presente Líquido (VPL).

Para fazer o cálculo do VPL, faz-se:

Equação 21 – Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto.

$$VPL = \sum_{i=0}^n \frac{(\text{Fluxo de Caixa})_i}{(1 + \text{Custo de Oportunidade})^i}$$

Onde i é o tempo analisado.

Todo esse cálculo do VPL, para validação do modelo, é apresentado no Anexo VII.

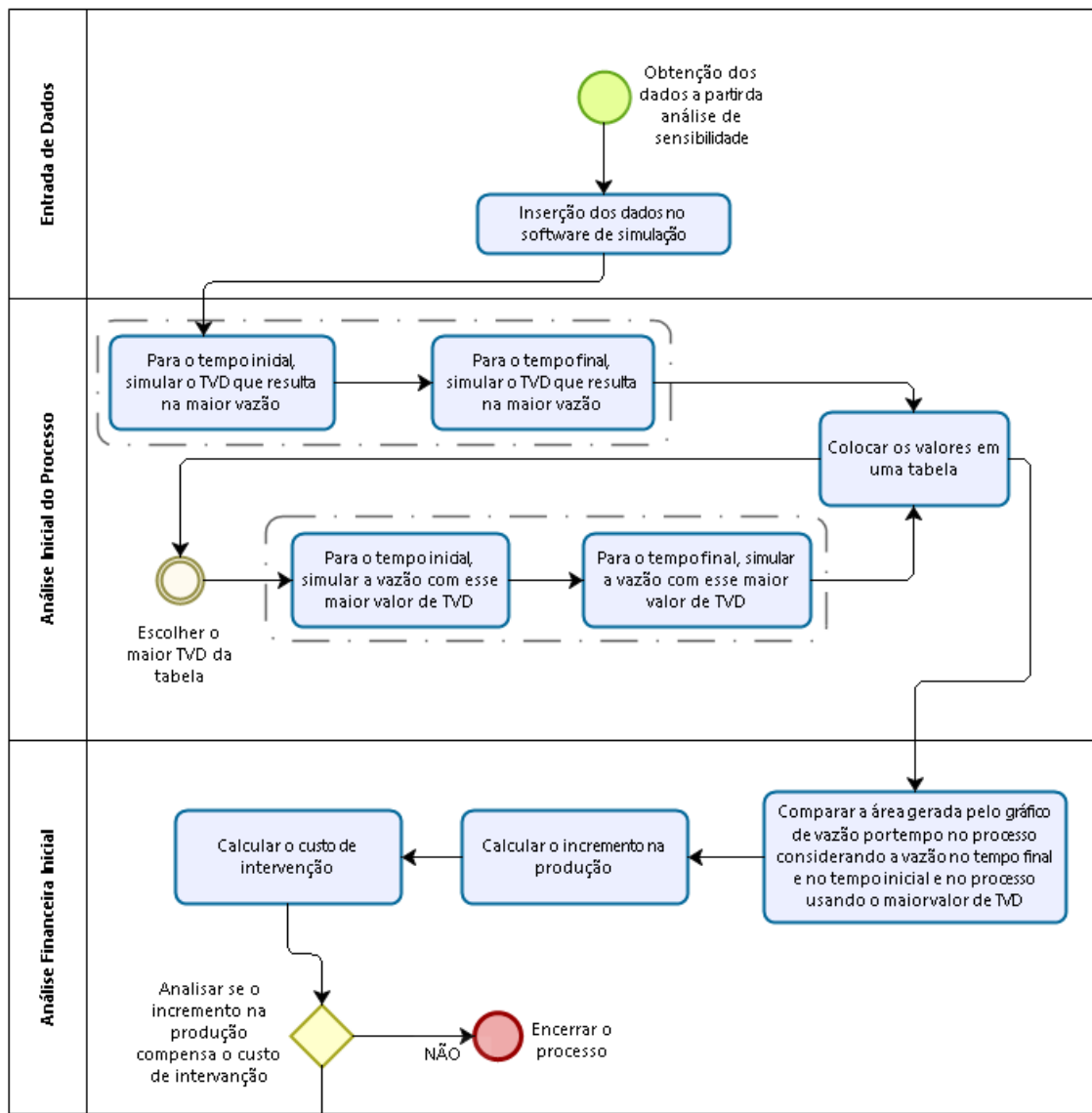
E, por fim, no anexo VIII é apresentado o código completo, contemplando todos os passos.

Todas as vezes que as condições de simulação são alteradas, deve-se fazer novamente a análise de reservatório para garantir que trabalha-se no cenário mais próximo do real possível. Isso deve ser feito, pelo menos, até se provar que não há sensibilidade considerável em relações as novas alterações. No modelo, não realiza-se a iteração considerando a análise de reservatório por limitações de dados de reservatório a serem trabalhados. Vale observar que essa iteração torna-se desnecessária para poços que possuem pouca influência de outros poços em um mesmo sistema, como o exemplo de um campo que possui um único poço produzindo. Nesse caso a iteração não seria necessária e fazer apenas a análise acima já resultaria no resultado correto da simulação.

Outro ponto a ser considerado é que analisa-se apenas o poço que já está produzindo. Todo o procedimento mostrado acima não engloba a análise de *kick off* do poço, que analisa-se de maneira complementar ao mostrado.

4.3 Fluxograma

É mostrado na figura abaixo um fluxograma que representa o modelo proposto.



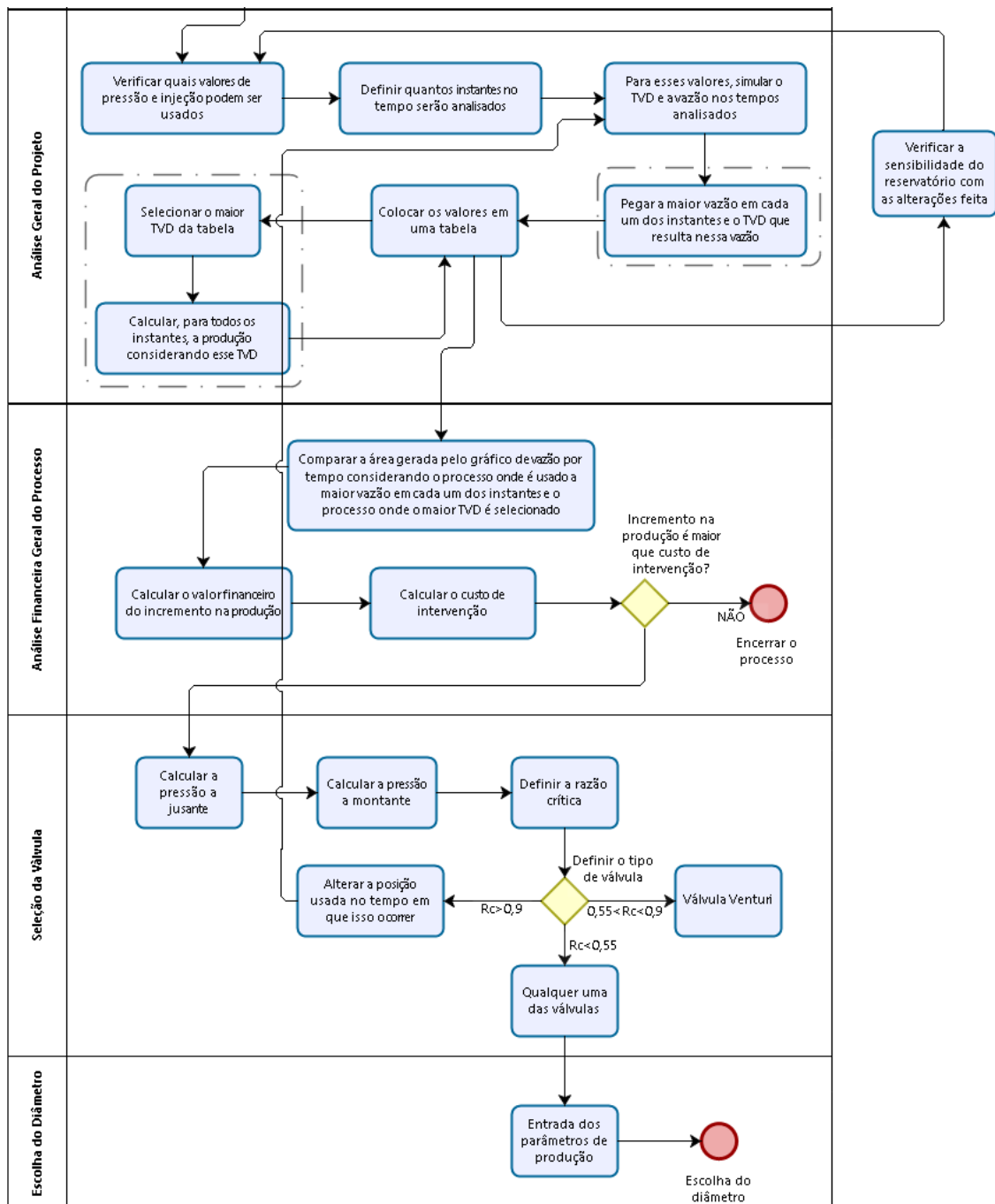


Figura 43 – Fluxograma representativo do modelo proposto.

5 Conclusão

Enquanto que, por convenção, grande parte dos autores da bibliografia defendem que a determinação da posição ocorre através da maior profundidade possível ou de uma posição que permita a produção durante toda a vida do poço, esse projeto busca introduzir uma nova abordagem que permita ao tomador de decisão escolher entre uma única posição ou se é economicamente viável fazer alterações de modo a aumentar a produção, considerando todos os custos recorrentes dessa intervenção.

A simulação de todo o processo se mostrou eficiente mesmo nos casos onde o ganho na produção era pequeno. Essas pequenas alterações na vazão, quando consideradas ao longo de toda a vida produtiva do poço, podem resultar em um ganho considerável na produção e quando isso não acontece o tomador de decisão irá trabalhar com uma única posição consciente de que esta é a melhor opção.

Somado a essa análise criou-se um código em Python que torna o processo mais rápido e preciso. Dessa forma, apenas o *software* de simulação e esse código criado, são necessários para a tomada de decisão. Com isso, além da redução do tempo de análise, foi possível obter uma maior precisão e acurácia do processo, dando ao tomador de decisão uma maior propriedade na escolha de quais serão as posições da válvula de gás *lift* durante toda a vida produtiva.

Um dos possíveis trabalhos futuros seria uma análise de quantas alterações da posição da VGL serão suficientes para otimização da produção do poço durante toda a sua vida operacional. Essa análise deverá ser baseada em quantas intervenções podem ser feitas, para aumentar a produção, de modo que o VPL do projeto seja máximo.

6 Referências Bibliográficas

- Almeida, A. (2011). *"A Model To Calculate The Theoretical Critical Flow Rate Through Venturi Gas Lift Valves"*.
- Almeida, A. (2014). *"Advantages of a Nozzle Valve for Gas Lift"*.
- Almeida, A. (2014). *Advantages of a Nozzle Valve for Gas Lift*.
- Almeida, A. (2015). *"Some Design Aspects for Venturi Gas Lift Valve"*.
- American Petroleum Institute. (1994). *API Gas Lift Manual* (Vol. Gas Lift (Book 6 of the vocational training series)). Exploration and Production Department.
- Araújo do Nascimento, J. M. (2005). *"Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico"*.
- Barreto, M. G., & Moraes, V. R. (2014). *"Identificação de Gargalos na Produção de Poços com Gás-Lift"*.
- Beggs, H. (2003). *"Production Optimization Using Nodal Analysis"*.
- Beggs, H. D. (1985). *Gas Production Operation*.
- Ganzaroli, C. A. (2011). *Modelagem, Simulação e Controle da Dinâmica de Poços operando com Gás Lift Contínuo*.
- Guo, B., Lyons, W. C., & Ghalambor, A. (s.d.). *"Petroleum Production Engineering"*.
- Kirkpatrick, C. (1959). *"Advances in Gas Lift Technology"*.
- Lopes, D. B. (2006). *Derivada Econômica e Critério de Abandono para Poço com Gás Lift Contínuo*.
- Rizzo Filho, H. d. (2011). *"A otimização de Gás Lift na Produção de Petróleo: Avaliação da Curva de Performance do Poço"*.
- Rosa, A. J., Carvalho, R. d., & Xavier, J. A. (2011). *"Engenharia de Reservatórios de Petróleo"*. Editora Interciência.
- Rosa, A., & Carvalho, R. d. (2002). *Previsão do Comportamento de Reservatórios de Petróleo*.

Rosa, V. R. (2014). Notas de aula da disciplina Métodos de Elevação Artificial.

Thomas, J. E. (2004). “*Fundamentos de Engenharia de Petróleo*” (2ª ed.). Editora Interciência.

Anexo I. A condição do Fluxo Sônico

Como falamos acima, o fluxo sônico garante que a vazão será constante em todos os equipamentos de superfície, evitando assim que esses sistemas operem com variação de vazão, o que poderia levar a uma falha.

Existem casos em que é necessário trabalhar no fluxo crítico, garantindo uma vazão constante e em outros casos aceitamos trabalhar com fluxo subcrítico pois esse garante, por exemplo, uma menor perda de carga. Em sistemas usando o Orifício Venturi pode ser muito crítico trabalhar nesse estado dado que uma pequena variação na pressão gera uma grande variação na vazão.

Para garantir que trabalhemos nessa região, podemos realizar o algoritmo a seguir.

Garantimos o fluxo crítico ao garantir que a razão entre as pressões a jusante e a montante estejam abaixo do raio crítico da válvula. Esse raio crítico é aproximadamente 0,55 para a Válvula de Orifício e 0,9 para a Válvula Venturi.

Então o primeiro passo é fazer:

$$r_c = \frac{Pressão_{jusante}}{Pressão_{montante}}$$

Equação 22 – Cálculo da Razão Crítica

Anexo II. Determinação da posição da válvula através das curvas de equilíbrio

O Gas Lift Design Guide - Artificial Lift Manual Part 2ª diz que podemos construir as curvas de equilíbrio seguindo o passo a passo mostrado abaixo.

1. Traçar a IPR:

Definir a relação entre a pressão e a vazão no fundo do poço, traçando a IPR:

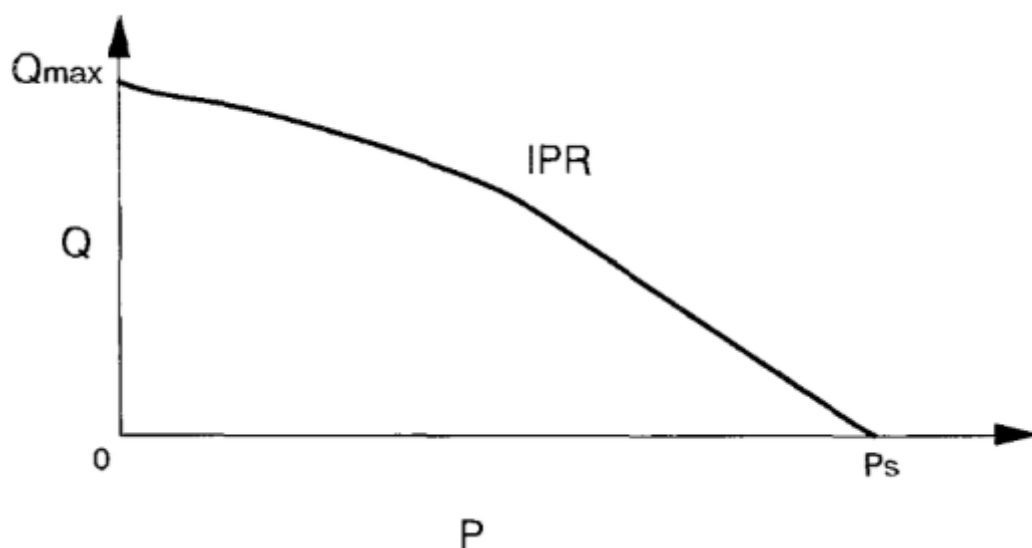


Figura 44 – Definição da IPR. (American Petroleum Institute, 1994)

2. Inverter a IPR rotacionando em relação ao eixo horizontal:

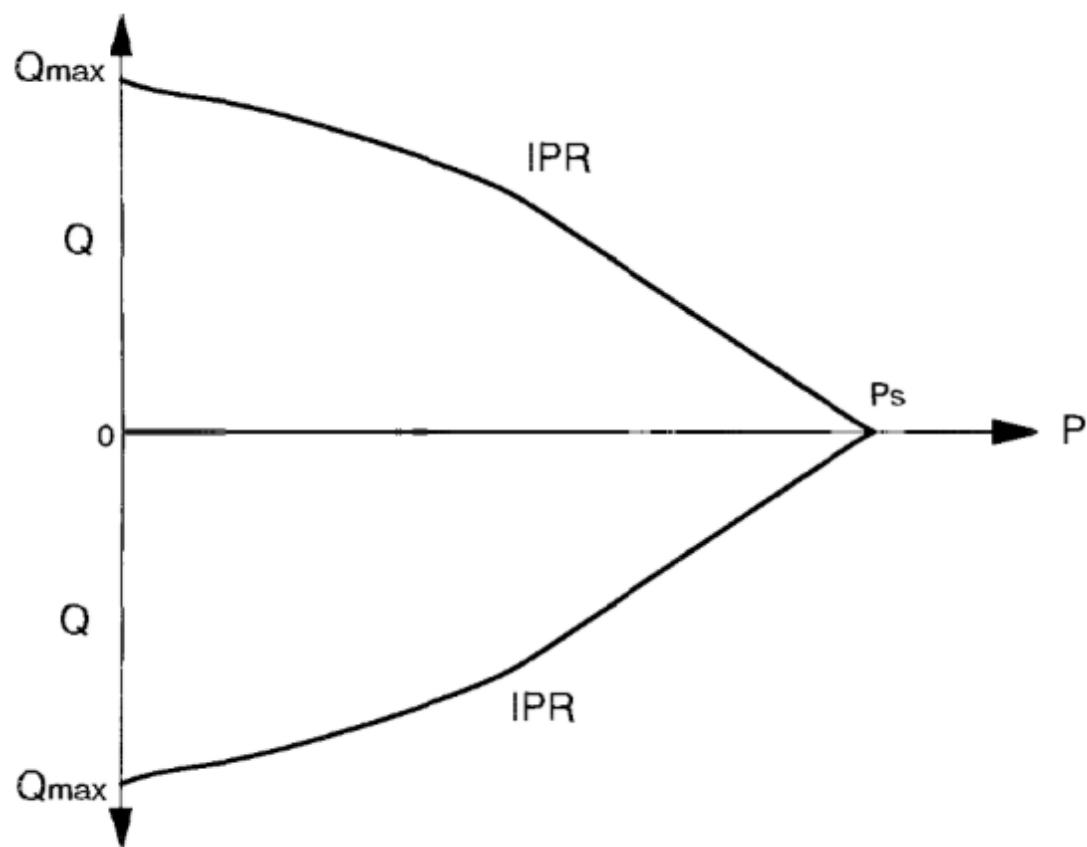


Figura 45 – Mudança de eixo no gráfico da IPR. (American Petroleum Institute, 1994)

3. Considerar apenas a parte invertida da IPR:

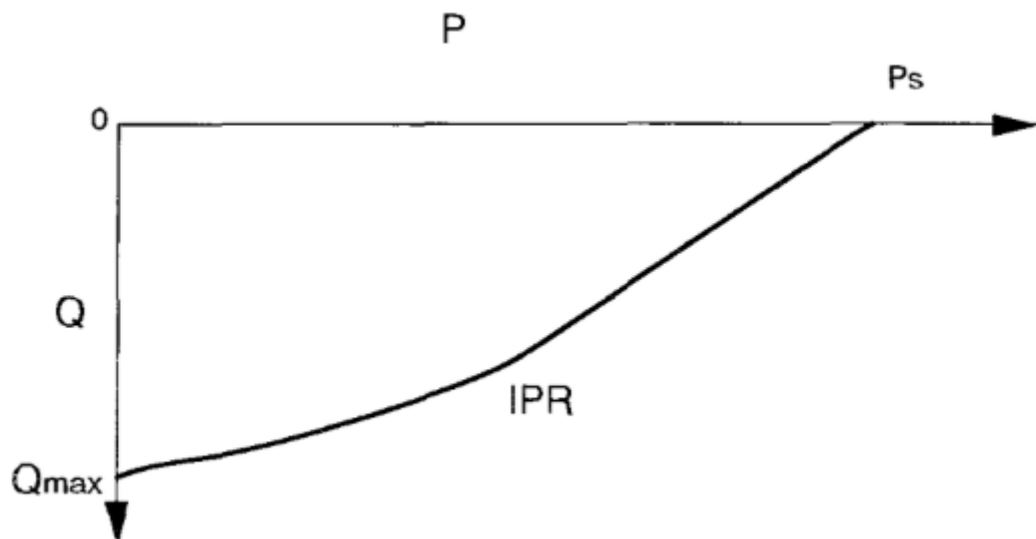


Figura 46 – Consideração da parte da IPR necessária para os cálculos. (American Petroleum Institute, 1994)

4. Adicionar a curva de pressão na cabeça de poço (em profundidade zero) a plotagem:

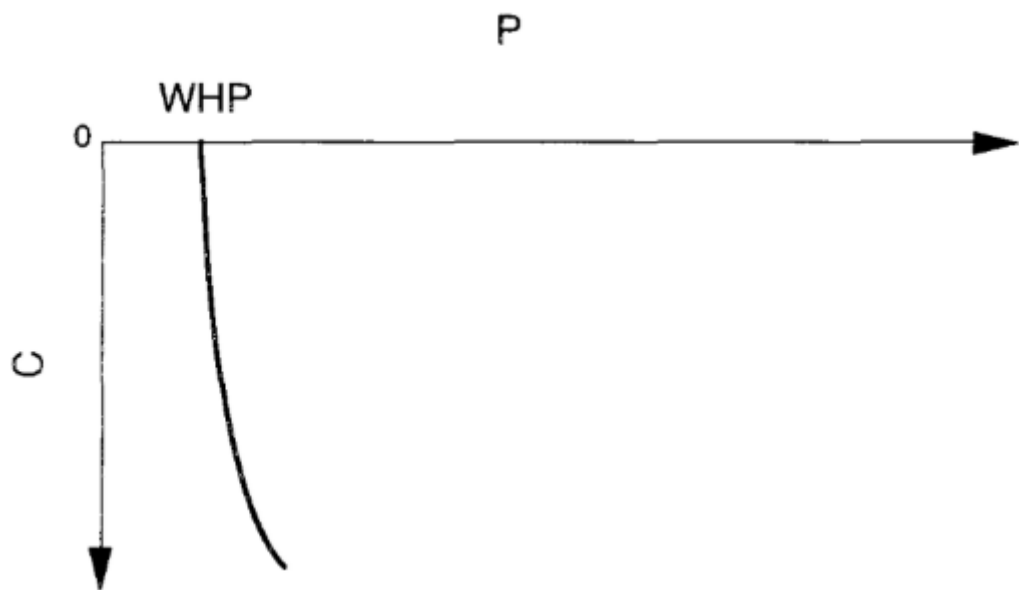


Figura 47 – Curva de Pressao na Cabeça de Poço. (American Petroleum Institute, 1994)

5. Traçar curvas de pressão requerida

Para a seção inferior da coluna, calcular do ponto mais baixo até a superfície, um conjunto de pontos para determinas as curvas de vazão e pressão requerida (IPR)

no intervalo de vazão variando de 0 a Q , começando com a pressão de fundo e traçar em intervalos regulares até a superfície. Isso resultará em:

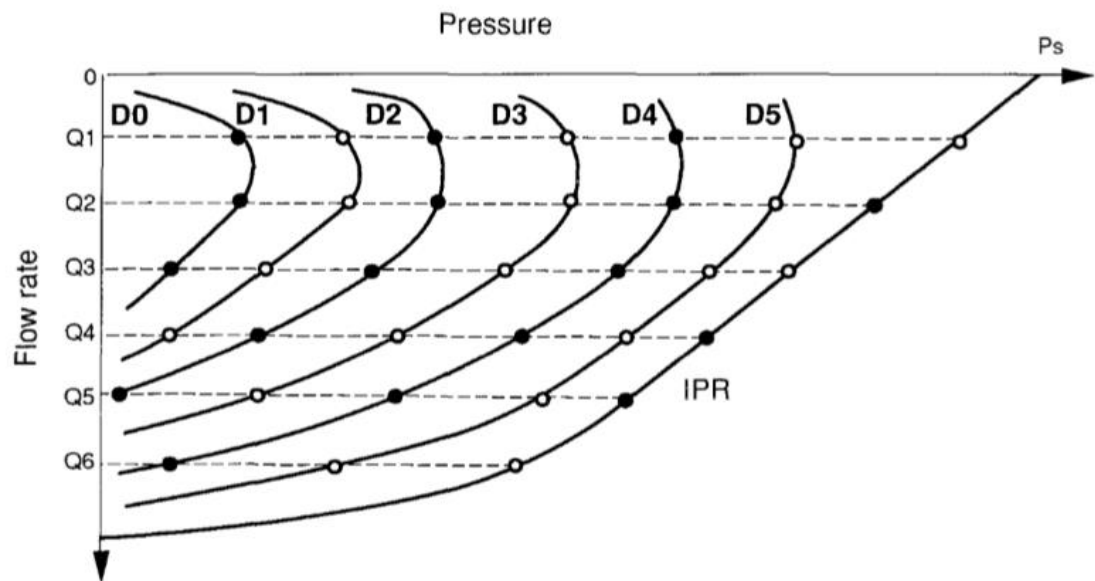


Figura 48 – Curvas de Pressão Requerida. (American Petroleum Institute, 1994)

6. Traçar as curvas de pressão disponível

Agora começando na parte superior da coluna, calculando do topo até o fundo do poço, traçar a TPR (curvas de pressão disponível) no mesmo intervalo considerado acima:

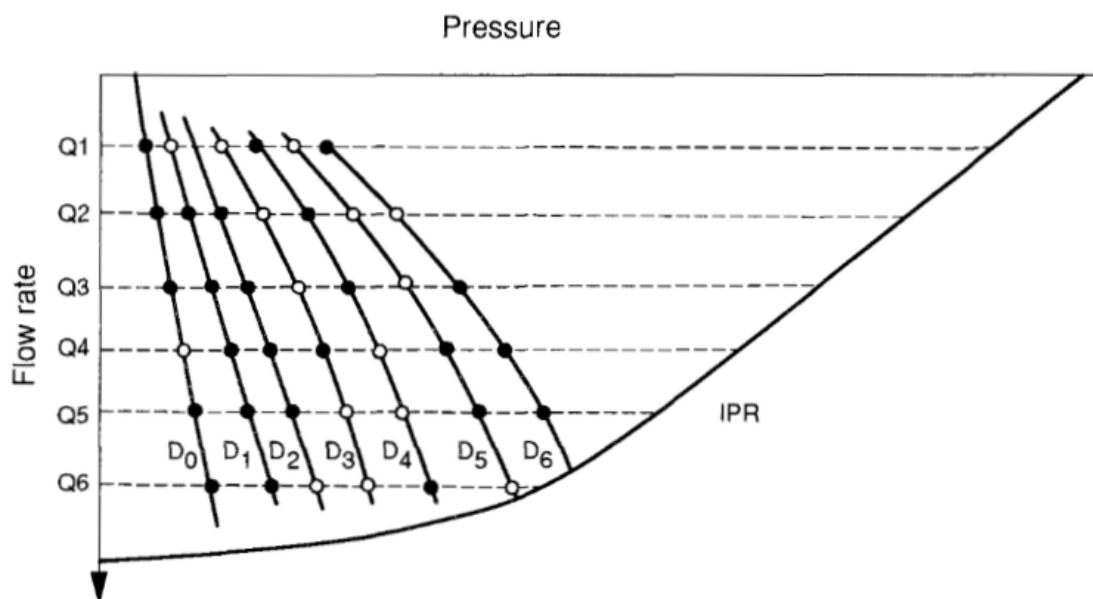


Figura 49 – Curvas de Pressão Disponível. (American Petroleum Institute, 1994)

Sendo D_0 traçado na cabeça do poço.

- **Traçar a curva de equilíbrio**

Sobrepondo as duas curvas traçadas em 5 e 6, a Curva de Equilíbrio será aquela que irá passar por todos os pontos de interseção entre as duas curvas.

Quanto maior o número de curvas nos passos anteriores, maior o número de pontos de interseção e mais acurada é a curva de equilíbrio.

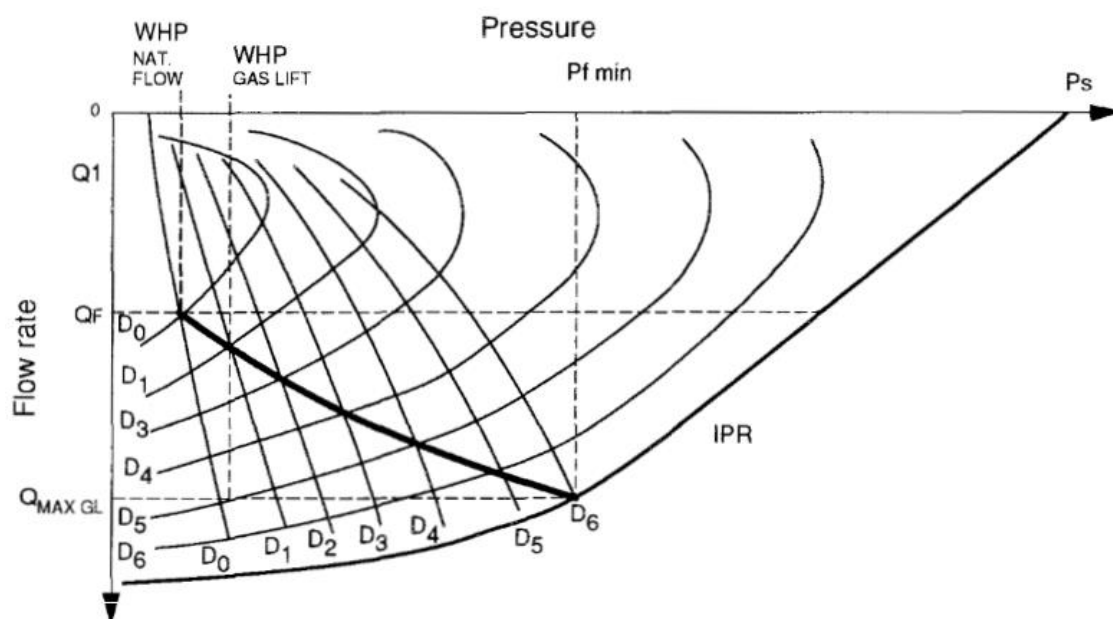


Figura 50 – Curva de Equilíbrio no gráfico de Pressão por Vazão. (American Petroleum Institute, 1994)

Segundo esse manual, a interseção da curva de equilíbrio com a IPR define a menor pressão de entrada que será possível com o gás *lift* disponível. A produção correspondente a esse ponto é o valor máximo atingível e corresponde à injeção de gás no fundo do poço.

Ele ainda diz que a interseção com as curvas no nível D_0 , quando existem, definem a pressão com a injeção de gás na cabeça do poço, ou seja, quando o efeito da injeção é desprezível e podemos considerar uma elevação natural. Caso não exista essa interseção podemos afirmar que a elevação natural nunca ocorrerá nesse sistema.

Para facilitar a determinação da posição, transfere-se as interseções para um diagrama de pressão em relação a profundidade, sendo o eixo de pressão comum aos dois gráficos:

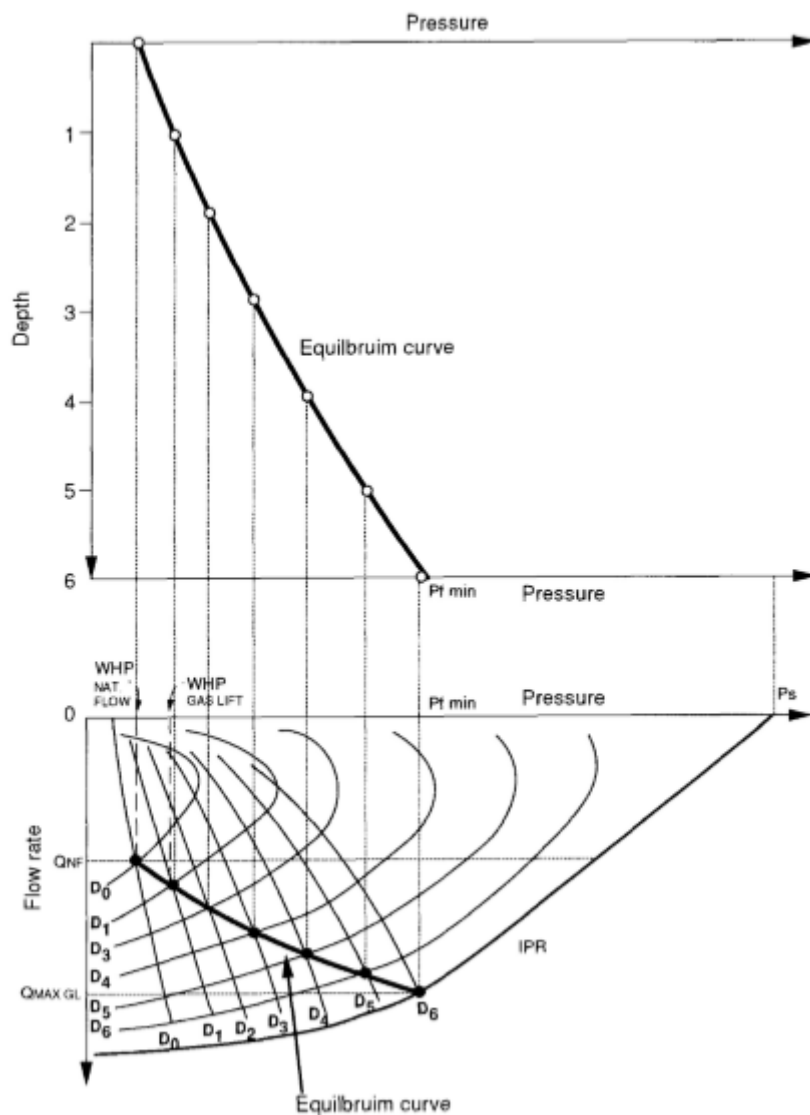


Figura 51 – Curva de Equilíbrio considerando o gráfico de Pressão por Profundidade. (American Petroleum Institute, 1994)

- **Plotar a pressão de injeção de gás na curva de Pressão por Profundidade:**

A profundidade máxima será dada, considerando uma incerteza, próxima ao ponto de interseção entre essas duas curvas.

Então o ponto de injeção pode ser qualquer ponto acima da interseção entre as duas curvas no gráfico de pressão e profundidade.

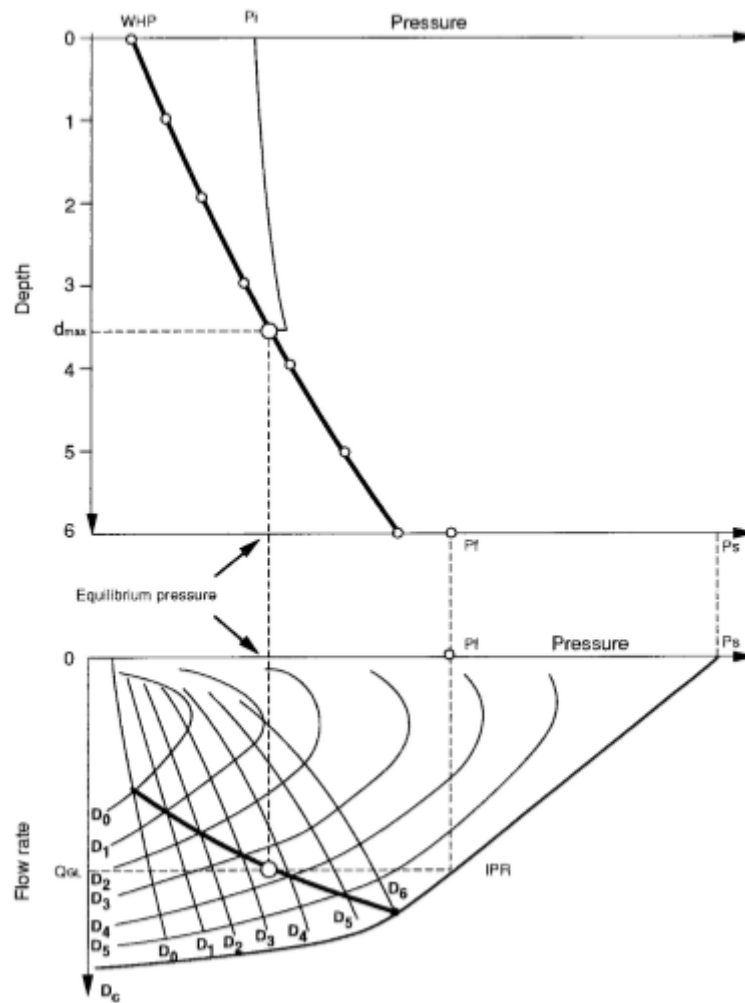


Figura 52 – Curva de Equilíbrio considerando a Pressão de Injeção de Gás. (American Petroleum Institute, 1994)

- **Determinar a posição da válvula**

Assim, para essa injeção dada acima, a válvula será instalada na posição mostrada abaixo:

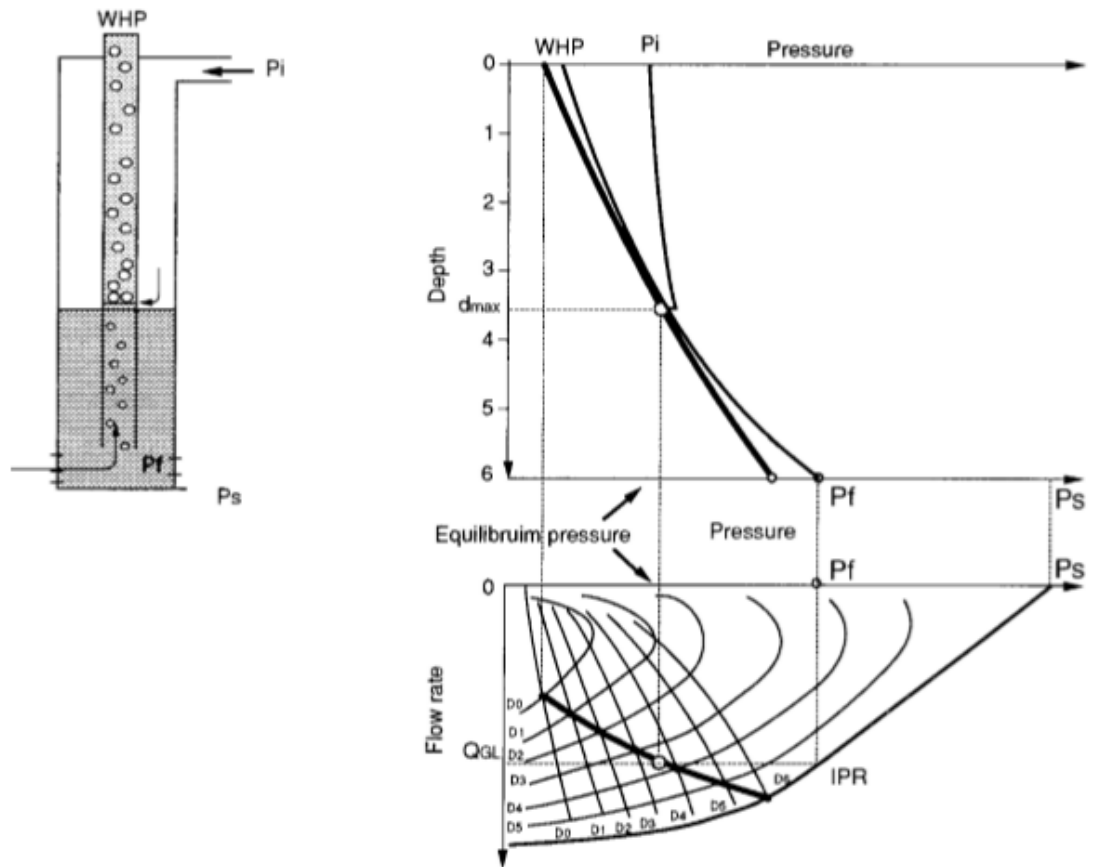


Figura 53 – Determinação da Posição da Válvula de Gás Lift. (American Petroleum Institute, 1994)

Anexo III. Obtenção do fator de compressibilidade z

Segundo Oscar Hernán Jalil Guiteras em Metodologia de Análise Global para o Desenvolvimento de um Campo de Gás Natural, 2003, a equação abaixo pode modelar o comportamento de um gás ideal:

$$pV = nRT$$

Onde:

- p é a pressão absoluta;
- V é o volume;
- T é a temperatura absoluta;
- n é o número de mols do gás;
- R é a constante universal dos gases.

Na prática, os gases não se comportam como gás ideal e precisa-se adicionar o fator de compressibilidade z para adequar essa equação acima ao comportamento real do gás. Ao adicionar esse fator obtêm-se a equação do gás real, dada por:

$$pV = znRT$$

Para o gás ideal, $z=1$ e a equação do gás real passa a ser igual a equação do gás ideal. Quanto maior a pressão e temperatura a que o gás é submetido maior o desvio de z em relação ao z do gás ideal.

Para ilustrar, a relação de z com a pressão a uma temperatura constante é mostrada abaixo:

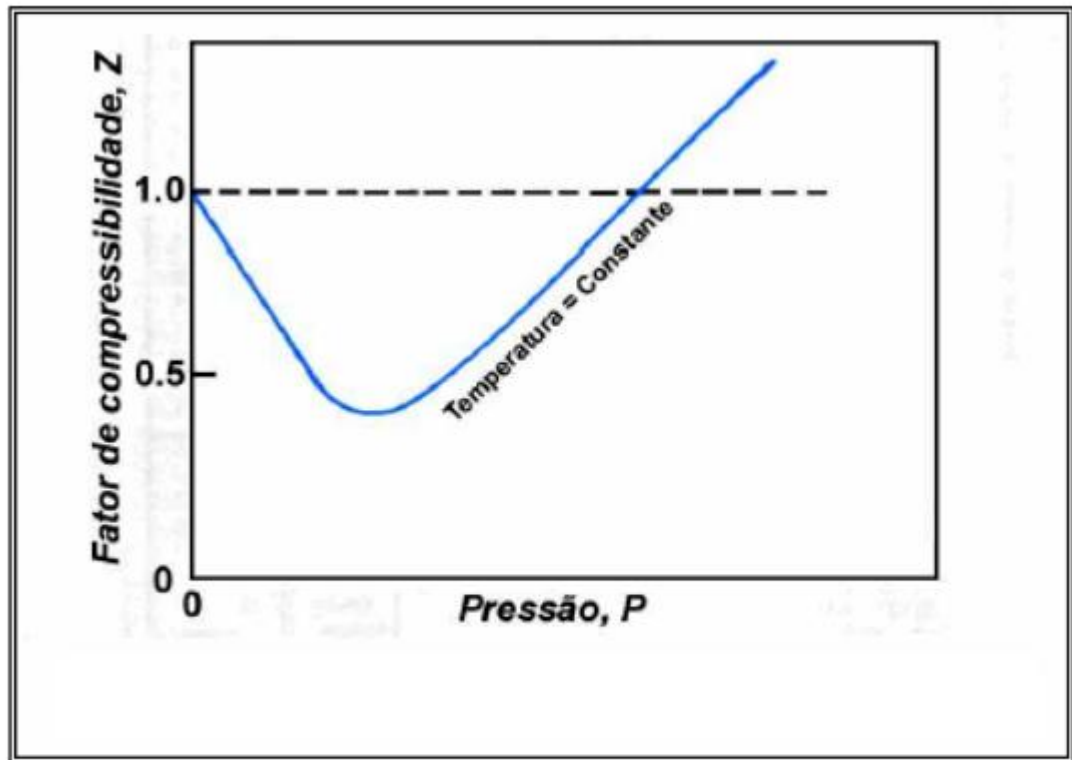


Figura A.1 Gráfico típico do fator de compressibilidade como uma função de pressão a temperatura constante. Extraído de Gas Production Operation – H. Dale Beggs, 1985

Figura 54 – Gráfico típico do fator de compressibilidade como uma função de pressão a temperatura constante.
(Beggs H. D., 1985)

Para a obtenção de z , segundo Chi U. Ikoku em Natural Gas Production Engineering, 1984, podemos usar o Teorema dos Estados Correspondentes, desenvolvido por Van der Waals.

“Segundo esse teorema, todos os gases exibem o mesmo comportamento quando submetidos às mesmas condições de pressão, temperatura e volume reduzidos” – Oscar Guiteras.

O termo reduzido significa fazer a razão entre o valor e o seu valor crítico, dado por:

$$p_r = \frac{p}{p_c}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$V_r = \frac{V}{V_c}$$

Onde:

p_r é a pressão reduzida

p_c é a pressão crítica

T_r é a temperatura reduzida

T_C é a temperatura crítica

V_r é o volume reduzido

V_C é o volume crítico

Os valores críticos de um gás são dados de acordo com a sua composição. Porém, para um gás de composição desconhecida, apenas conhecendo a sua densidade, pode-se usar a Correlação de Standing e Katz para encontrar os valores de pressão e temperatura pseudoreduzidas para o gás natural seco:

$$P_{pc} = 677 - 15 \cdot d_g - 37,5 \cdot (d_g)^2$$

$$T_{pc} = 168 + 325 \cdot d_g - 12,5 \cdot (d_g)^2$$

E, para o gás natural úmido:

$$P_{pc} = 706 - 51,7 \cdot d_g - 11,1 \cdot (d_g)^2$$

$$T_{pc} = 187 + 330 \cdot d_g - 71,5 \cdot (d_g)^2$$

Usando esses valores, o fator de compressibilidade z pode ser obtido através da carta de Standing, considerando os valores de pressão e temperatura pseudoreduzidas:

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}}$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$$

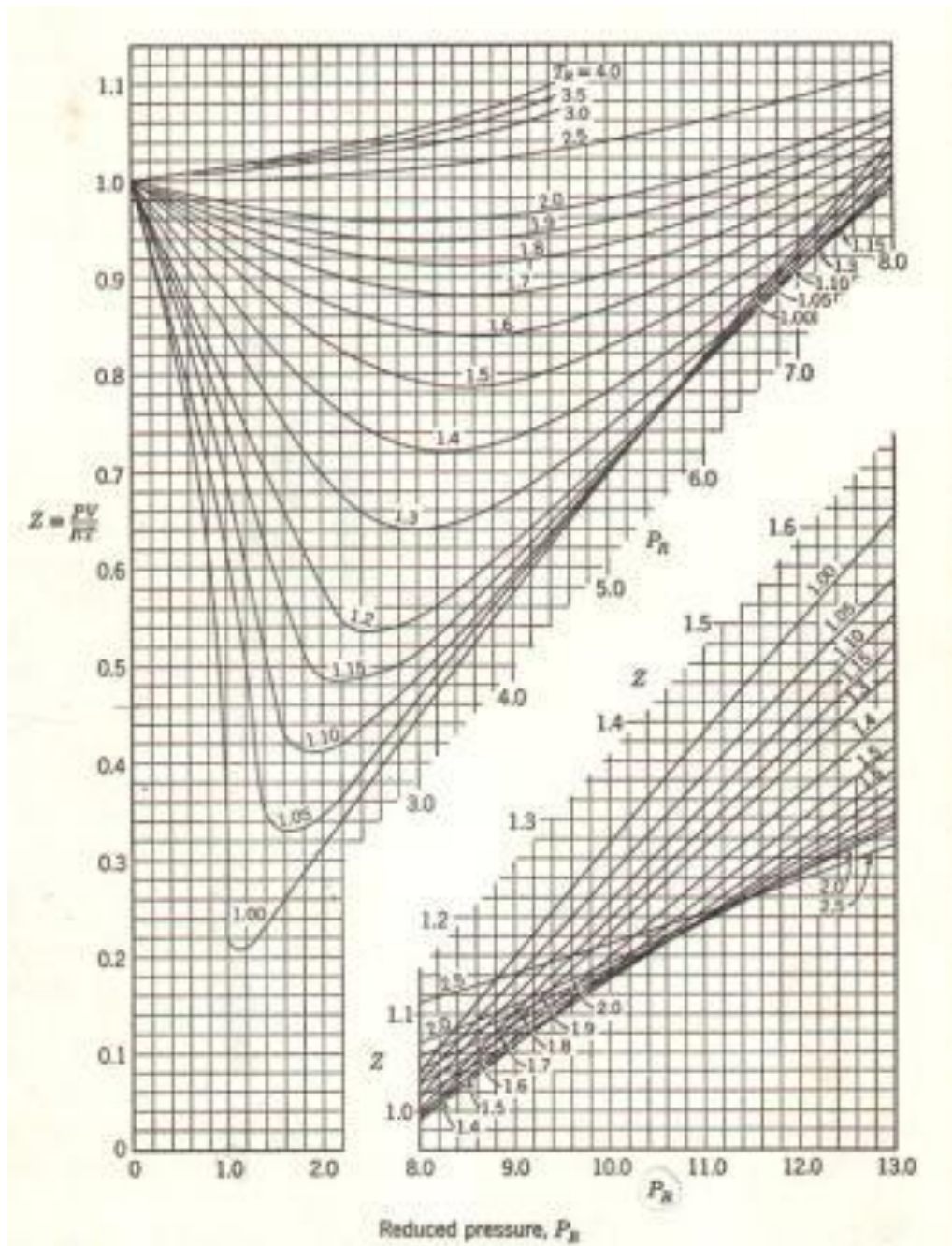


Figura 55 - Fator de compressibilidade z para gases naturais. (Rosa & Carvalho, 2002).

Essas equações são limitadas para um conteúdo total de impurezas inferior a 7%.

Outra maneira de calcular z é usar uma modificação da Correlação de Brill & Beggs que REFERÊNCIA apresenta, que é dada em Petroleum Engineering “Tool Kit”, Programs for Spreadsheets, Software, 1992 – Doug Boone & Joe Clegg:

$$z = A + \frac{1 - A}{\exp B} + C \cdot p_{pr}^D$$

Onde:

$$A = 1,39 \cdot (T_{pr} - 0,92)^{0,5} - 0,36 \cdot T_{pr} - 0,101$$

$$B = (0,62 - 0,23 \cdot T_{pr}) \cdot p_{pr} + \left(\frac{0,066}{T_{pr} - 0,86} - 0,037 \right) \cdot p_{pr}^2 + \frac{0,32}{10^{9(T_{pr}-1)}} \cdot p_{pr}^6$$

$$C = 0,132 - 0,32 \cdot \log(T_{pr})$$

$$D = \text{anti log}(0,3106 - 0,49 \cdot T_{pr} + 0,1824 \cdot T_{pr}^2)$$

Anexo IV. Código para Validação Inicial do Processo

```
#Entrada das condições variáveis de cada análise

#Vazão em metros cúbicos

print('Separar decimal usando ponto e não vírgula')

print('Todas as vazões devem ser dadas em m³/dia')

print("")

print('Simular, para o tempo inicial, qual será o TVD que resulta na maior vazão.')
```



```
Q_inicial = float(input('Q Inicial: '))

TVD_inicial = float(input('TVD Inicial: '))

print('Simular, para o tempo final, qual será o TVD que resulta na maior vazão.')
```



```
Q_final = float(input('Q Final: '))

TVD_final = float(input('TVD Final: '))

max_TVD = max(TVD_inicial,TVD_final)

print('Usando o maior TVD entre os escolhidos, entrar qual a vazão resultante por esse TVD.')
```



```
maior_TVD_Q_inicial = float(input('Usando o TVD {0}, calcular o Q Inicial:'.format(max_TVD)))

maior_TVD_Q_final = float(input('Usando o TVD {0}, calcular o Q Final:'.format(max_TVD)))

#Tempo de vida produtiva em anos

tempo = int(input('Tempo de vida produtiva (em anos): '))

#Tempo de intervenção em dias

tempo_interv = int(input('Tempo de intervenção (em dias): '))
```



```

#Valores fixos da análise (valores que não mudam de uma análise para a outra)

#Custo de aluguel da sonda
aluguel_sonda_dia=130000

#Lucro cessante (tempo que o poço deixará de produzir)
lucro_cessante=tempo_interv*((Q_final+Q_inicial)/2)

#Custo de 1 intervenção
custo_interv=aluguel_sonda_dia*tempo_interv+lucro_cessante


#Calculando o ganho de produção entre os processos

#Diferença entre as áreas, para calcular o ganho na produção em m³
A=((Q_inicial+Q_final)*tempo*365)/2
A_maior_TVD=((maior_TVD_Q_inicial+maior_TVD_Q_final)*tempo*365)/2
Dif=A-A_maior_TVD

#Transformando para barris
barris=6.28981

Dif_barris=Dif*barris

preco_barril= float(input('Preço atual do barril de petroleo (em US$): '))

#Lucro gerado no processo
receita=Dif_barris*preco_barril


#Análise de viabilidade
if receita > custo_interv:
    lucro_inicial = receita - custo_interv
    print('Continuar a análise')
    print('O lucro gerado é de:')
    print(lucro_inicial)

```

```
else:
```

```
    print('Parar')
```

```
#Obs: todos os valores são dados em dólares
```

Anexo V. Análise da Viabilidade Econômica

```
#Análise Financeira Detalhada do Projeto

print('Separar decimal usando ponto e não vírgula')

#Entrando com as pressões que serão usadas na simulação.

num_pressoes = int(input('Entre quantas pressões podem ser usadas: '))

cont_pres = int(0)

pressoes = []

while cont_pres < num_pressoes:

    pressao = float(input('Entre com a pressão: '))

    pressoes.append(pressao)

    cont_pres = cont_pres + 1

#Retirando os valores duplicados, caso exista:.

pressoes_limpo = list(set(pressoes))

#Para terminar, colocando as pressoes em ordem:

P = list(sorted(pressoes_limpo))


#Entrando com as vazões de injeção que serão usadas na simulação.

num_vaz_inj = int(input('Entre quantas vazões de injeção podem ser usadas: '))

cont_vaz_inj = int(0)

vaz_injecoes = []

while cont_vaz_inj < num_vaz_inj:

    vazao_inj = float(input('Entre com a vazão de injeção: '))

    vaz_injecoes.append(vazao_inj)

    cont_vaz_inj = cont_vaz_inj + 1
```

```

#Retirando os valores duplicados, caso exista:

vaz_injecoes_limpo = list(set(vaz_injecoes))

#Para terminar, colocando as vazoes de injeção em ordem crescente:

Qinj = list(sorted(vaz_injecoes_limpo))


#Simulando qual sera o TVD e a vazão para cada uma das combinações de
pressão e vazão de injeção em cada um dos tempos

#INICIO DA VIDA PRODUTIVA DO POÇO

print ( ' ')

print ( ' ')

print ('Simulando para as condições do INÍCIO da vida produtiva do poço.')

TVD_inicio = []

vazao_inicio = []

i=0

j=0

for i in range(len(P)):

    for j in range(len(Qinj)):

        TVD = float(input('Qual o TVD para pressão %d e vazão de injeção %d: '
%(P[i],Qinj[j])))

        vaz_prod = float(input('Qual a vazão produzida para pressão %d e vazão de
injeção %d: ' %(P[i],Qinj[j])))

        TVD_inicio.append(TVD)

        vazao_inicio.append(vaz_prod)

    j=j+1

    i=i+1

```

```

#MEIO DA VIDA PRODUTIVA DO POÇO

print ( ' ')

print ( ' ')

print ('Simulando para as condições do MEIO da vida produtiva do poço.')

TVD_meio = []

vazao_meio = []

i=0

j=0

for i in range(len(P)):

    for j in range(len(Qinj)):

        TVD = float(input('Qual o TVD para pressão %d e vazão de injeção %d: '
%(P[i],Qinj[j])))

        vaz_prod = float(input('Qual a vazão produzida para pressão %d e vazão de
injeção %d: ' %(P[i],Qinj[j])))

        TVD_meio.append(TVD)

        vazao_meio.append(vaz_prod)

        j=j+1

    i=i+1

```

```

#FIM DA VIDA PRODUTIVA DO POÇO

```

```

print ( ' ')

print ( ' ')

print ('Simulando para as condições do FIM da vida produtiva do poço.')

TVD_fim = []

vazao_fim = []

i=0

```

```

j=0

for i in range(len(P)):

    for j in range(len(Qinj)):

        TVD = float(input('Qual o TVD para pressão %d e vazão de injeção %d: '
%(P[i],Qinj[j])))

        vaz_prod = float(input('Qual a vazão produzida para pressão %d e vazão de
injeção %d: ' %(P[i],Qinj[j])))

        TVD_fim.append(TVD)

        vazao_fim.append(vaz_prod)

    j=j+1

    i=i+1


#Em cada um dos tempos, pegar a vazão máxima

vazao_inicio_max = max(vazao_inicio)

vazao_meio_max = max(vazao_meio)

vazao_fim_max = max(vazao_fim)


#E analisar em qual TVD essa vazão máxima irá ocorrer

TVD_inicio_max = TVD_inicio[vazao_inicio.index(vazao_inicio_max)]

TVD_meio_max = TVD_meio[vazao_meio.index(vazao_meio_max)]

TVD_fim_max = TVD_fim[vazao_fim.index(vazao_fim_max)]


#Fazendo a comparação usando o TVD máximo

#Para fazer a comparação, pegar o maior valor de TVD entre todos os simulados

TVD_max=max(max(TVD_inicio),max(TVD_meio),max(TVD_fim))

#Simulando qual será a vazão no inicio, meio e fim para esse TVD.

```

```

print ( ' ')

print ( ' ')

print('Fazendo, para comparação, a simulação usando o TVD máximo conforme
orientado na literatura')

vazao_comparacao_inicio = float(input('Qual a vazão máxima, no início, para o
TVD igual a %d: ' %(TVD_max)))

vazao_comparacao_meio = float(input('Qual a vazão máxima, no meio, para o
TVD igual a %d: ' %(TVD_max)))

vazao_comparacao_fim = float(input('Qual a vazão máxima, no fim, para o TVD
igual a %d: ' %(TVD_max)))


#Calculando o ganho de produção do processo, em metros cúbicos

print ( ' ')

tempo = int(input('Tempo de vida produtiva do poço (em anos): '))

#Considerando a soma da área de dois trapézios

Area_TVD_variavel = ((vazao_inicio_max +
vazao_meio_max)+(vazao_meio_max + vazao_fim_max))*(tempo*365)/2

Area_TVD_max=((vazao_comparacao_inicio +
vazao_comparacao_meio)+(vazao_comparacao_meio +
vazao_comparacao_fim))*(tempo*365)/2

Dif=Area_TVD_variavel - Area_TVD_max

#Transformando para barris

barris = 6.28981

Dif_barris = Dif*barris

preco_barril = float(input('Preço atual do barril de petróleo (em dólares): '))

#Total ganho no processo

receita=Dif_barris*preco_barril

```

```

#Calculando o custo de intervenção

#Valores fixos da análise (valores que não mudam de uma análise para a outra)

#Custo de aluguel da sonda
aluguel_sonda_dia=130000

tempo_interv = int(input("Tempo estimado de intervenção (em dias): "))

#Lucro cessante (tempo que o poço deixará de produzir)

lucro_cessante=tempo_interv*((vazao_inicio_max +
vazao_meio_max)/2)+tempo_interv*((vazao_meio_max + vazao_fim_max)/2)

#Custo da intervenção

custo_interv=aluguel_sonda_dia*tempo_interv+lucro_cessante

print ( ' ')


#Análise de viabilidade

if receita > custo_interv:

    lucro_analisado = receita - custo_interv

    print('Continuar a análise')

    print('O lucro gerado é de:')

    print(lucro_analisado)

else:

    print('Parar')

```


Anexo VI. Determinação do tipo de Válvula e Escolha do Orifício

```
#Escolha da Válvula e do Orifício

#Determinações das pressões a montante e a jusante
print('Para todos os valores, separar a parte decimal da parte inteira usando ponto')
Pjus_inicio = float(input('Entrar com a pressão a jusante no início da vida produtiva: '))
Pmon_inicio = float(input('Entrar com a pressão a montante no início da vida produtiva: '))
Pjus_meio = float(input('Entrar com a pressão a jusante no meio da vida produtiva: '))
Pmon_meio = float(input('Entrar com a pressão a montante no meio da vida produtiva: '))
Pjus_fim = float(input('Entrar com a pressão a jusante no fim da vida produtiva: '))
Pmon_fim = float(input('Entrar com a pressão a montante no fim da vida produtiva: '))

#Cálculo da razão critica
rc_inicio = Pjus_inicio / Pmon_inicio
rc_meio = Pjus_meio / Pmon_meio
rc_fim = Pjus_fim / Pmon_fim

#Para o INICIO:
print(' ')
print(' ')
print('Para o início:')
if rc_inicio >= 0.9:
    escolha = 'finalizadora'
else:
    if rc_inicio >= 0.55:
        print('Usar válvula Venturi')
        print(' ')
        escolha = 'V'
```

else:

```
print('Usar válvula Venturi ou válvula de Orifício')
escolha = input('Escolha V para Venturi ou O para Orifício: ')
print(' ')
```

if escolha == 'V' or escolha == 'v':

```
vazao = float(input('Vazão (m³/d): '))
Pmon = float(input('Pressão a jusante (bar): '))
Pstd = float(input('Pressão nas condições standard (bar): '))
dg = float(input('Densidade do gás: '))
zg_std = float(input('Fator de compressibilidade do gás em condições standard: '))
temp_mont = float(input('Temperatura a montante da válvula: '))
temp_std = float(input('Temperatura em condições standard: '))
i = float(input('Velocidade do som no gás: '))
```

quebra = 0

while quebra == 0:

tipo_gas = int(input('Entre com 1 para gás natural seco ou 2 para gás natural úmido'))

if tipo_gas == 1:

```
P_pc = 677 - 15*dg_inicio - 37,5*(dg_inicio^2)
T_pc = 168 + 325*dg_inicio - 12,5*(dg_inicio^2)
quebra = 1
```

elif tipo_gas == 2:

```
P_pc = 706 - 51,7*dg_inicio - 11,1*(dg_inicio^2)
T_pc = 187 + 330*dg_inicio - 71,5*(dg_inicio^2)
quebra = 1
```

else:

```
print('Tipo de gás escolhido em desacordo com as opções')
quebra = 0
```

P_pr = Pmon/P_pc

T_pr = temp_mont/T_pc

zg = float(input('Usando %d e %d, encontrar o valor de z através da carta de

Standing: '))

```
diametro_inicio =  
((vazao*Pstd*zg*temp_mont)/(i*Pmon*zg_std*temp_std*3.1416))**(1/2)  
  
elif escolha == 'O' or escolha == 'o':  
    dg_inicio = float(input('Densidade do gás: '))  
    temp_inicio = float(input('Temperatura(Kelvin): '))  
    Cd_inicio = float(input('Coeficiente de Descarga: '))  
    Pjus_inicio = float(input('Pressão a jusante (bar): '))  
    vazao_inicio = float(input('Vazão (m³/d): '))  
    diametro_inicio =  
    ((4*vazao_inicio*((dg_inicio*temp_inicio)**(1/2)))/(282.6*Cd_inicio*Pjus_inicio*3.1  
416))**(1/2)  
  
elif escolha == 'finalizadora':  
    print(' ')  
else:  
    print('É necessário escolher a válvula a ser usada')  
  
if escolha == 'finalizadora':  
    print('Alterar o TVD para garantir o fluxo crítico')  
else:  
    #Escolhendo o diâmetro de prateleira  
    diametro_prateleira = [7/64, 1/8, 3/16, 3/8, 1/4, 5/16, 1/2, 9/16, 5/8]  
    diametro_calculado = []  
    i=0  
    for i in range(len(diametro_prateleira)):  
        if diametro_prateleira[i] >= diametro_inicio:  
            dif_diam = diametro_prateleira[i] - diametro_inicio  
            diametro_calculado.append(dif_diam)  
        else:  
            dif_diam = diametro_inicio - diametro_prateleira[i]
```

```

    diametro_calculado.append(dif_diam)

#Pegando a menor diferença para escolher o diâmetro como o mais próximo do ideal
    dif_min = min(diametro_calculado)
#O diâmetro de prateleira será aquele que teve a mínima diferença do diâmetro
calculado
    diametro_inicio_real = diametro_prateleira[diametro_calculado.index(dif_min)]
    print('Para o início, usar o diâmetro: ')
    print(diametro_inicio_real)

#Para o MEIO:
    print(' ')
    print(' ')
    print('Para o meio:')
    if rc_meio >= 0.9:
        escolha = 'finalizadora'
    else:
        if rc_meio >= 0.55:
            print('Usar válvula Venturi')
            print(' ')
            escolha = 'V'
        else:
            print('Usar válvula Venturi ou válvula de Orifício')
            escolha = input('Escolha V para Venturi ou O para Orifício: ')
            print(' ')

    if escolha == 'V' or escolha == 'v':
        vazao = float(input('Vazão (m³/d): '))
        Pmon = float(input('Pressão a jusante (bar): '))
        Pstd = float(input('Pressão nas condições standard (bar): '))
        dg = float(input('Densidade do gás: '))
        zg_std = float(input('Fator de compressibilidade do gás em condições standard: '))
        temp_mont = float(input('Temperatura a montante da válvula: '))

```

```

temp_std = float(input('Temperatura em condições standard: '))
i = float(input('Velocidade do som no gás: '))

quebra = 0

while quebra == 0:
    tipo_gas = int(input('Entre com 1 para gás natural seco ou 2 para gás natural úmido'))
    if tipo_gas == 1:
        P_pc = 677 - 15*dg_inicio - 37,5*(dg_inicio^2)
        T_pc = 168 + 325*dg_inicio - 12,5*(dg_inicio^2)
        quebra = 1
    elif tipo_gas == 2:
        P_pc = 706 - 51,7*dg_inicio - 11,1*(dg_inicio^2)
        T_pc = 187 + 330*dg_inicio - 71,5*(dg_inicio^2)
        quebra = 1
    else:
        print('Tipo de gás escolhido em desacordo com as opções')
        quebra = 0

P_pr = Pmon/P_pc
T_pr = temp_mont/T_pc
zg = float(input('Usando %d e %d, encontrar o valor de z através da carta de
Standing: '))

diametro_meio =
((vazao*Pstd*zg*temp_mont)/(i*Pmon*zg_std*temp_std*3.1416))**(1/2)

elif escolha == 'O' or escolha == 'o':
    dg_meio = float(input('Densidade do gás: '))
    temp_meio = float(input('Temperatura(Kelvin): '))
    Cd_meio = float(input('Coeficiente de Descarga: '))
    Pjus_meio = float(input('Pressão a jusante (bar): '))
    vazao_meio = float(input('Vazão (m³/d): '))

```

```

    diametro_meio =
    ((4*vazao_meio*((dg_meio*temp_meio)**(1/2)))/(282.6*Cd_meio*Pjus_meio*3.1416
    ))**(1/2)

elif escolha == 'finalizadora':
    print(' ')

else:
    print('É necessário escolher a válvula a ser usada')

if escolha == 'finalizadora':
    print('Alterar o TVD para garantir o fluxo crítico')
else:
    #Escolhendo o diâmetro de prateleira
    diametro_prateleira = [7/64, 1/8, 3/16, 3/8, 1/4, 5/16, 1/2, 9/16, 5/8]
    diametro_calculado = []
    i=0
    for i in range(len(diametro_prateleira)):
        if diametro_prateleira[i] >= diametro_meio:
            dif_diam = diametro_prateleira[i] - diametro_meio
            diametro_calculado.append(dif_diam)
        else:
            dif_diam = diametro_meio - diametro_prateleira[i]
            diametro_calculado.append(dif_diam)

    #Pegando a menor diferença para escolher o diâmetro como o mais próximo do ideal
    dif_min = min(diametro_calculado)
    #O diâmetro de prateleira será aquele que teve a mínima diferença do diâmetro
    calculado
    diametro_meio_real = diametro_prateleira[diametro_calculado.index(dif_min)]
    print('Para o meio, usar o diâmetro: ')
    print(diametro_meio_real)

```

```

#Para o FIM:
print(' ')
print(' ')
print('Para o fim:')
if rc_fim >= 0.9:
    escolha = 'finalizadora'
else:
    if rc_fim >= 0.55:
        print('Usar válvula Venturi')
        escolha = 'V'
    else:
        print('Usar válvula Venturi ou válvula de Orifício')
        escolha = input('Escolha V para Venturi ou O para Orifício: ')

if escolha == 'V' or escolha == 'v':
    vazao = float(input('Vazão (m³/d): '))
    Pmon = float(input('Pressão a jusante (bar): '))
    Pstd = float(input('Pressão nas condições standard (bar): '))
    dg = float(input('Densidade do gás: '))
    zg_std = float(input('Fator de compressibilidade do gás em condições standard: '))
    temp_mont = float(input('Temperatura a montante da válvula: '))
    temp_std = float(input('Temperatura em condições standard: '))
    i = float(input('Velocidade do som no gás: '))

    quebra = 0

    while quebra == 0:
        tipo_gas = int(input('Entre com 1 para gás natural seco ou 2 para gás natural úmido'))
        if tipo_gas == 1:
            P_pc = 677 - 15*dg_inicio - 37,5*(dg_inicio^2)
            T_pc = 168 + 325*dg_inicio - 12,5*(dg_inicio^2)
            quebra = 1
        elif tipo_gas == 2:

```

```

P_pc = 706 - 51,7*dg_inicio - 11,1*(dg_inicio^2)
T_pc = 187 + 330*dg_inicio - 71,5*(dg_inicio^2)
quebra = 1
else:
    print("Tipo de gás escolhido em desacordo com as opções")
    quebra = 0
P_pr = Pmon/P_pc
T_pr = temp_mont/T_pc
zg = float(input('Usando %d e %d, encontrar o valor de z através da carta de
Standing: '))
diametro_fim =
((vazao*Pstd*zg*temp_mont)/(i*Pmon*zg_std*temp_std*3.1416))**(1/2)

elif escolha == 'O' or escolha == 'o':
    dg_fim = float(input('Densidade do gás: '))
    temp_fim = float(input('Temperatura(Kelvin): '))
    Cd_fim = float(input('Coeficiente de Descarga: '))
    Pjus_fim = float(input('Pressão a jusante (bar): '))
    vazao_fim = float(input('Vazão (m³/d): '))
    diametro_fim =
    ((4*vazao_fim*((dg_fim*temp_fim)**(1/2)))/(282.6*Cd_fim*Pjus_fim*3.1416))**(1/2
    )

elif escolha == 'finalizadora':
    print(' ')

else:
    print('É necessário escolher a válvula a ser usada')

if escolha == 'finalizadora':
    print('Alterar o TVD para garantir o fluxo crítico')
else:
    #Escolhendo o diâmetro de prateleira

```



```

diametro_prateleira = [7/64, 1/8, 3/16, 3/8, 1/4, 5/16, 1/2, 9/16, 5/8]
diametro_calculado = []
i=0
for i in range(len(diametro_prateleira)):
    if diametro_prateleira[i] >= diametro_fim:
        dif_diam = diametro_prateleira[i] - diametro_fim
        diametro_calculado.append(dif_diam)
    else:
        dif_diam = diametro_fim - diametro_prateleira[i]
        diametro_calculado.append(dif_diam)

#Pegando a menor diferença para escolher o diâmetro como o mais próximo do ideal
dif_min = min(diametro_calculado)
#O diâmetro de prateleira será aquele que teve a mínima diferença do diâmetro
calculado
diametro_fim_real = diametro_prateleira[diametro_calculado.index(dif_min)]
print('Para o fim, usar o diâmetro: ')
print(diametro_fim_real)

```

Anexo VII. VPL do Projeto

```
#Cálculo do VPL do projeto
tempo = int(input('Entre com o tempo de vida produtiva do poço (em anos): '))
vazao_inicio_max = float(input('Entre com a vazão máxima no início da vida produtiva,
que foi calculada: '))
vazao_meio_max = float(input('Entre com a vazão máxima no meio da vida produtiva,
que foi calculada: '))
vazao_fim_max = float(input('Entre com a vazão máxima no fim da vida produtiva, que
foi calculada: '))
vazao_comparacao_inicio = float(input('Entre com a vazão de comparação no início da
vida produtiva, que foi calculada: '))
vazao_comparacao_meio = float(input('Entre com a vazão de comparação no meio da
vida produtiva, que foi calculada: '))
vazao_comparacao_fim = float(input('Entre com a vazão de comparação no fim da vida
produtiva, que foi calculada: '))
barris=6.28981
preco_barril= float(input('Preço atual do barril de petroleo (em US$): '))
aluguel_sonda_dia=130000
#Tempo de intervenção em dias
tempo_interv = int(input("Tempo de intervenção (em dias): "))

# Usando o Custo de Oportunidade para Calcular o VPL
custo_oportunidade_porcento = float(input('Entre com o Custo de Oportunidade para o
Cálculo do VPL (em %): '))
custo_oportunidade = custo_oportunidade_porcento / 100

# Garantindo o tempo sempre como um inteiro.
if tempo % 2 == 0:
    tempo_inicio = tempo // 2
    tempo_fim = tempo // 2
elif tempo % 2 == 1:
    tempo_inicio = tempo // 2 + 1
```

```

tempo_fim = tempo // 2

# Calculando o VPL do projeto
razao_inicio = (vazao_inicio_max - vazao_meio_max) / tempo_inicio
razao_fim = (vazao_meio_max - vazao_fim_max) / tempo_fim

# Valores de Entrada
VPL_entrada = 0
contador_1 = 0
contador_2 = 1
while contador_1 <= tempo_inicio:
    valor = (((vazao_inicio_max - (razao_inicio * contador_1)) + (
        vazao_inicio_max - (razao_inicio * (contador_1 + 1)))) / 2) * 365 * barris *
preco_barril
    valor_VPL = (valor / ((1 + custo_oportunidade) ** contador_1))
    VPL_entrada = VPL_entrada + valor_VPL
    contador_1 = contador_1 + 1
while contador_2 <= tempo_fim:
    valor = (((vazao_meio_max - (razao_fim * contador_2)) + (
        vazao_meio_max - (razao_fim * (contador_2 + 1)))) / 2) * 365 * barris * preco_barril
    valor_VPL = (valor / ((1 + custo_oportunidade) ** contador_2))
    VPL_entrada = VPL_entrada + valor_VPL
    contador_2 = contador_2 + 1

# Valores de Saída
VPL_custo_meio = ((aluguel_sonda_dia * tempo_interv) + (tempo_interv *
vazao_meio_max * barris * preco_barril)) / (1 + custo_oportunidade) ** tempo_inicio
VPL_custo_fim = ((aluguel_sonda_dia * tempo_interv) + (tempo_interv *
vazao_fim_max * barris * preco_barril)) / (1 + custo_oportunidade) ** tempo_fim
VPL_saida = VPL_custo_meio + VPL_custo_fim

# VPL Resultante
VPL_total = VPL_entrada - VPL_saida

```

```
# Comparando com o VPL do projeto sem fazer as alterações
```

```
razao_comparacao_inicio = (vazao_comparacao_inicio - vazao_comparacao_meio) /  
tempo_inicio
```

```
razao_comparacao_fim = (vazao_comparacao_meio - vazao_comparacao_fim) /  
tempo_fim
```

```
VPL_comparacao = 0
```

```
contador_1 = 0
```

```
contador_2 = 1
```

```
while contador_1 <= tempo_inicio:
```

```
    valor = (((vazao_comparacao_inicio - (razao_comparacao_inicio * contador_1)) +  
(vazao_comparacao_inicio - (razao_comparacao_inicio * (contador_1 + 1)))) / 2) * 365  
    * barris * preco_barril
```

```
    valor_VPL = (valor / ((1 + custo_oportunidade) ** contador_1))
```

```
    VPL_comparacao = VPL_comparacao + valor_VPL
```

```
    contador_1 = contador_1 + 1
```

```
while contador_2 <= tempo_fim:
```

```
    valor = (((vazao_comparacao_meio - (razao_comparacao_fim * contador_2)) +  
(vazao_comparacao_meio - (razao_comparacao_fim * (contador_2 + 1)))) / 2) * 365 *  
    barris * preco_barril
```

```
    valor_VPL = (valor / ((1 + custo_oportunidade) ** contador_2))
```

```
    VPL_comparacao = VPL_comparacao + valor_VPL
```

```
    contador_2 = contador_2 + 1
```

```
# Calculando a diferença entre os VPL's
```

```
diferenca_VPL = VPL_total - VPL_comparacao
```

```
print('O VPL da nova proposta é:')
```

```
print(VPL_total)
```

```
print('Enquanto o VPL usando a maneira convencional é:')
```

```
print(VPL_comparacao)
```

```
print('E a diferença entre eles é:')  
print(diferenca_VPL)
```

Anexo VIII. Código de Simulação do Modelo

Através do código abaixo todo o modelo pode ser rodado.

O objetivo é reduzir o tempo do tomador de decisão e permitir que essa análise seja feita para todos os tipos de poços, de maneira que, se a análise se mostrar ineficiente logo na primeira tentativa o analista não perca nem 5 minutos com esse modelo.

O código abaixo descreve todos os procedimentos, juntando todas as etapas que estão em anexo e tem o objetivo de facilitar a análise reduzindo o tempo mesmo quando ela é feita por completo.

```
#Entrada das condições variáveis de cada análise

#Vazão em metros cúbicos

print('Separar decimal usando ponto e não vírgula')

Q_inicial = float(input('Q Inicial: '))

Q_final = float(input('Q Final: '))

maior_TVD_Q_inicial = float(input('Usando o menor TVD. Q Inicial: '))

maior_TVD_Q_final = float(input('Usando o menor TVD. Q Final: '))

#Tempo de vida produtiva em anos

tempo = int(input('Tempo de vida produtiva (em anos): '))

#Tempo de intervenção em dias

tempo_interv = int(input('Tempo de intervenção (em dias): '))


#Valores fixos da análise (valores que não mudam de uma análise para a outra)

#Custo de aluguel da sonda

aluguel_sonda_dia=130000

#Lucro cessante (tempo que o poço deixará de produzir)

lucro_cessante=tempo_interv*((Q_final+Q_inicial)/2)

#Custo da intervenção
```

```

custo_interv=aluguel_sonda_dia*tempo_interv+lucro_cessante

#Calculando o ganho de produção entre os processos
#Diferença entre as áreas, para calcular o ganho na produção em m³
A_inicial=((Q_inicial+Q_final)*tempo*365)/2
A_maior_TVD=((maior_TVD_Q_inicial+maior_TVD_Q_final)*tempo*365)/2
Dif=A_inicial-A_maior_TVD

#Transformando para barris
barris=6.28981

Dif_barris=Dif*barris

preco_barril= float(input('Preço atual do barril de petroleo (em US$): '))

#Lucro gerado no processo
receita=Dif_barris*preco_barril

#Análise de viabilidade
FS = int(input('Entrar com o Fator de Segurança (em %): '))
if receita/custo_interv <= 1+(FS/100):
    print('O projeto é economicamente inviável na análise inicial')
else:
    print('O projeto é economicamente viável na análise inicial')
    print('Prosseguir com a análise')
    print(' ')

#Entrando com as pressões que serão usadas na simulação.
print
num_pressoes = int(input('Entre quantas pressões podem ser usadas: '))
cont_pres = int(0)

```

```

pressoes = []

while cont_pres < num_pressoes:

    pressao = float(input('Entre com a pressão: '))

    pressoes.append(pressao)

    cont_pres = cont_pres + 1

#Retirando os valores duplicados, caso exista:.

pressoes_limpo = list(set(pressoes))

#Para terminar, colocando as pressoes em ordem:

P = list(sorted(pressoes_limpo))


#Entrando com as vazões de injeção que serão usadas na simulação.

num_vaz_inj = int(input('Entre quantas vazões de injeção podem ser usadas:

'))

cont_vaz_inj = int(0)

vaz_injecoes = []

while cont_vaz_inj < num_vaz_inj:

    vazao_inj = float(input('Entre com a vazão de injeção: '))

    vaz_injecoes.append(vazao_inj)

    cont_vaz_inj = cont_vaz_inj + 1

#Retirando os valores duplicados, caso exista:

vaz_injecoes_limpo = list(set(vaz_injecoes))

#Para terminar, colocando as vazoes de injeção em ordem crescente:

Qinj = list(sorted(vaz_injecoes_limpo))


#Simulando qual sera o TVD e a vazão para cada uma das combinações de
pressão e vazão de injeção em cada um dos tempos

```



```

#INICIO DA VIDA PRODUTIVA DO POÇO

print ( ' ')

print ('Simulando para as condições do INICIO da vida produtiva do poço.')

TVD_inicio = []

vazao_inicio = []

i=0

j=0

for i in range(len(P)):

    for j in range(len(Qinj)):

        TVD = float(input('Qual o TVD para pressão %d e vazão de injeção %d:
' %(P[i],Qinj[j]))))

        vaz_prod = float(input('Qual a vazão produzida para pressão %d e vazão
de injeção %d: ' %(P[i],Qinj[j]))))

        TVD_inicio.append(TVD)

        vazao_inicio.append(vaz_prod)

        j=j+1

    i=i+1

#MEIO DA VIDA PRODUTIVA DO POÇO

print ( ' ')

print ('Simulando para as condições do MEIO da vida produtiva do poço.')

TVD_meio = []

vazao_meio = []

i=0

j=0

for i in range(len(P)):

```

```

        for j in range(len(Qinj)):

            TVD = float(input('Qual o TVD para pressão %d e vazão de injeção %d: '
                               '%(P[i],Qinj[j])'))

            vaz_prod = float(input('Qual a vazão produzida para pressão %d e vazão
de injeção %d: ' %(P[i],Qinj[j])))

            TVD_meio.append(TVD)

            vazao_meio.append(vaz_prod)

            j=j+1

        i=i+1

```

#FIM DA VIDA PRODUTIVA DO POÇO

```

print ( ' ')

print ('Simulando para as condições do FIM da vida produtiva do poço.')

TVD_fim = []

vazao_fim = []

i=0

j=0

for i in range(len(P)):

    for j in range(len(Qinj)):

        TVD = float(input('Qual o TVD para pressão %d e vazão de injeção %d: '
                               '%(P[i],Qinj[j])'))

        vaz_prod = float(input('Qual a vazão produzida para pressão %d e vazão
de injeção %d: ' %(P[i],Qinj[j])))

        TVD_fim.append(TVD)

        vazao_fim.append(vaz_prod)

        j=j+1

```

```
i=i+1
```

```
#Em cada um dos tempos, pegar a vazão máxima
```

```
vazao_inicio_max = max(vazao_inicio)
```

```
vazao_meio_max = max(vazao_meio)
```

```
vazao_fim_max = max(vazao_fim)
```

```
#E analisar em qual TVD essa vazão máxima irá ocorrer
```

```
TVD_inicio_max = TVD_inicio[vazao_inicio.index(vazao_inicio_max)]
```

```
TVD_meio_max = TVD_meio[vazao_meio.index(vazao_meio_max)]
```

```
TVD_fim_max = TVD_fim[vazao_fim.index(vazao_fim_max)]
```

```
#Fazendo a comparação usando o TVD máximo
```

```
#Para fazer a comparação, pegar o maior valor de TVD entre todos os  
simulados
```

```
TVD_max=max(max(TVD_inicio),max(TVD_meio),max(TVD_fim))
```

```
#Simulando qual será a vazão no inicio, meio e fim para esse TVD.
```

```
print ( ' ' )
```

```
print('Fazendo, para comparação, a simulação usando o TVD máximo  
conforme orientado na literatura')
```

```
vazao_comparacao_inicio = float(input('Qual a vazão máxima, no início, para  
o TVD igual a %d: ' %(TVD_max)))
```

```
vazao_comparacao_meio = float(input('Qual a vazão máxima, no meio, para o  
TVD igual a %d: ' %(TVD_max)))
```

```
vazao_comparacao_fim = float(input('Qual a vazão máxima, no fim, para o  
TVD igual a %d: ' %(TVD_max)))
```

```

#Calculando o ganho de produção do processo, em metros cúbicos

print ( ' ')

tempo = int(input("Tempo de vida produtiva do poço (em anos): "))

#Considerando a soma da área de dois trapézios

Area_TVD_variavel          =          ((vazao_inicio_max          +
vazao_meio_max)+(vazao_meio_max + vazao_fim_max))*(tempo*365)/2

Area_TVD_max=((vazao_comparacao_inicio          +
vazao_comparacao_meio)+(vazao_comparacao_meio          +
vazao_comparacao_fim))*(tempo*365)/2

Dif=Area_TVD_variavel - Area_TVD_max

#Transformando para barris

barris = 6.28981

Dif_barris = Dif*barris

preco_barril = float(input("Preço atual do barril de petróleo (em dólares): "))

#Total ganho no processo

receita=Dif_barris*preco_barril


#Calculando o custo de intervenção

#Valores fixos da análise (valores que não mudam de uma análise para a
outra)

#Custo de aluguel da sonda

aluguel_sonda_dia=130000

tempo_interv = int(input("Tempo estimado de intervenção (em dias): "))

#Lucro cessante (tempo que o poço deixará de produzir)

lucro_cessante=tempo_interv*((vazao_inicio_max          +
vazao_meio_max)/2)+tempo_interv*((vazao_meio_max + vazao_fim_max)/2)

#Custo da intervenção

```

```

custo_interv=aluguel_sonda_dia*tempo_interv+lucro_cessante

print ( ' ')

#Análise de viabilidade

FS = int(input('Entrar com o Fator de Segurança (em %): '))

if receita/custo_interv <= 1+(FS/100):

    print('O projeto é economicamente inviável na análise geral')

else:

    print('O projeto é economicamente viável')

    print('O próximo passo é escolher a VGL')

    print(' ')

#Escolha da Válvula

#Determinações das pressões a montante e a jusante

print('Para todos os valores, separar a parte decimal da parte inteira usando
ponto')

Pjus_inicio = float(input('Entrar com a pressão a jusante no início da vida
produtiva: '))

Pmon_inicio = float(input('Entrar com a pressão a montante no início da
vida produtiva: '))

Pjus_meio = float(input('Entrar com a pressão a jusante no meio da vida
produtiva: '))

Pmon_meio = float(input('Entrar com a pressão a montante no meio da vida
produtiva: '))

Pjus_fim = float(input('Entrar com a pressão a jusante no fim da vida
produtiva: '))

Pmon_fim = float(input('Entrar com a pressão a montante no fim da vida
produtiva: '))

```

```

#Cálculo da razão critica

rc_inicio = Pjus_inicio / Pmon_inicio

rc_meio = Pjus_meio / Pmon_meio

rc_fim = Pjus_fim / Pmon_fim


#Analisando o rc encontrado

#Considerando uma constante de segurança CS

CS = int(input('Entre com a constante de segurança a ser considerada (em
%): '))


#Para o INICIO:

print(' ')

print(' ')

print('Para o início:')

if rc_inicio >= 0.9*(1-(CS/100)):

    escolha = 'finalizadora'

else:

    if rc_inicio >= 0.55*(1-(CS/100)):

        print('Usar válvula Venturi')

        print(' ')

        escolha = 'V'

    else:

        print('Usar válvula Venturi ou válvula de Orifício')

        escolha = input('Escolha V para Venturi ou O para Orifício: ')

        print(' ')

```

```

if escolha == 'V' or escolha == 'v':

    vazao_inicio = float(input('Vazão (m³/d): '))

    Pmon_inicio = float(input('Pressão a jusante (bar): '))

    Pstd_inicio = float(input('Pressão nas condições standard (bar): '))

    zg_mont_inicio = float(input('Fator de compressibilidade do gás a
montante da válvula: '))

    zg_std_inicio = float(input('Fator de compressibilidade do gás em
condições standard: '))

    temp_mont_inicio = float(input('Temperatura a montante da válvula: '))

    temp_std_inicio = float(input('Temperatura em condições standard: '))

    i_inicio = float(input('Velocidade do som no gás: '))

    diametro_inicio =
((vazao_inicio*Pstd_inicio*zg_mont_inicio*temp_mont_inicio)/(i_inicio*Pmon_inicio
*zg_std_inicio*temp_std_inicio*3.1416))**(1/2)

elif escolha == 'O' or escolha == 'o':

    dg_inicio = float(input('Densidade do gás: '))

    temp_inicio = float(input('Temperatura(Kelvin): '))

    Cd_inicio = float(input('Coeficiente de Descarga: '))

    Pjus_inicio = float(input('Pressão a jusante (bar): '))

    vazao_inicio = float(input('Vazão (m³/d): '))

    diametro_inicio =
((4*vazao_inicio*((dg_inicio*temp_inicio)**(1/2)))/(282.6*Cd_inicio*Pjus_inicio*3.1
416))**(1/2)

elif escolha == 'finalizadora':

```

```

    print(' ')
else:
    print('É necessário escolher a válvula a ser usada')

if escolha == 'finalizadora':
    print('Alterar o TVD para garantir o fluxo crítico')
else:
    #Escolhendo o diâmetro de prateleira
    diametro_prateleira = [7/64, 1/8, 3/16, 3/8, 1/4, 5/16, 1/2, 9/16, 5/8]
    diametro_calculado = []
    i=0
    for i in range(len(diametro_prateleira)):
        if diametro_prateleira[i] >= diametro_inicio:
            dif_diam = diametro_prateleira[i] - diametro_inicio
            diametro_calculado.append(dif_diam)
        else:
            dif_diam = diametro_inicio - diametro_prateleira[i]
            diametro_calculado.append(dif_diam)

    #Pegando a menor diferença para escolher o diâmetro como o mais
    próximo do ideal
    dif_min = min(diametro_calculado)
    #O diâmetro de prateleira será aquele que teve a mínima diferença do
    diâmetro calculado
    diametro_inicio_real =
    diametro_prateleira[diametro_calculado.index(dif_min)]

```



```

print('Para o início, usar o diâmetro: ')

print(diametro_inicio_real)


#Para o MEIO:

print(' ')

print(' ')

print('Para o meio:')

if rc_meio >= 0.9*(1-(CS/100)):

    escolha = 'finalizadora'

else:

    if rc_meio >= 0.55*(1-(CS/100)):

        print('Usar válvula Venturi')

        print(' ')

        escolha = 'V'

    else:

        print('Usar válvula Venturi ou válvula de Orifício')

        escolha = input('Escolha V para Venturi ou O para Orifício: ')

        print(' ')


if escolha == 'V' or escolha == 'v':

    vazao_meio = float(input('Vazão (m³/d): '))

    Pmon_meio = float(input('Pressão a jusante (bar): '))

    Pstd_meio = float(input('Pressão nas condições standard (bar): '))

    zg_mont_meio = float(input('Fator de compressibilidade do gás a
montante da válvula: '))

```

```
zg_std_meio = float(input('Fator de compressibilidade do gás em condições standard: '))
```

```
temp_mont_meio = float(input('Temperatura a montante da válvula: '))
```

```
temp_std_meio = float(input('Temperatura em condições standard: '))
```

```
i_meio = float(input('Velocidade do som no gás: '))
```

```
diametro_meio = ((vazao_meio*Pstd_meio*zg_mont_meio*temp_mont_meio)/(i_meio*Pmon_meio*zg_std_meio*temp_std_meio*3.1416))**(1/2)
```

```
elif escolha == 'O' or escolha == 'o':
```

```
dg_meio = float(input('Densidade do gás: '))
```

```
temp_meio = float(input('Temperatura(Kelvin): '))
```

```
Cd_meio = float(input('Coeficiente de Descarga: '))
```

```
Pjus_meio = float(input('Pressão a jusante (bar): '))
```

```
vazao_meio = float(input('Vazão (m³/d): '))
```

```
diametro_meio = ((4*vazao_meio*((dg_meio*temp_meio)**(1/2)))/(282.6*Cd_meio*Pjus_meio*3.1416))**(1/2)
```

```
elif escolha == 'finalizadora':
```

```
print(' ')
```

```
else:
```

```
print('É necessário escolher a válvula a ser usada')
```

```
if escolha == 'finalizadora':
```

```
print('Alterar o TVD para garantir o fluxo crítico')
```

```

else:

    #Escolhendo o diâmetro de prateleira

    diametro_prateleira = [7/64, 1/8, 3/16, 3/8, 1/4, 5/16, 1/2, 9/16, 5/8]

    diametro_calculado = []

    i=0

    for i in range(len(diametro_prateleira)):

        if diametro_prateleira[i] >= diametro_meio:

            dif_diam = diametro_prateleira[i] - diametro_meio

            diametro_calculado.append(dif_diam)

        else:

            dif_diam = diametro_meio - diametro_prateleira[i]

            diametro_calculado.append(dif_diam)

    #Pegando a menor diferença para escolher o diâmetro como o mais
    próximo do ideal

    dif_min = min(diametro_calculado)

    #O diâmetro de prateleira será aquele que teve a mínima diferença do
    diâmetro calculado

    diametro_meio_real =
    diametro_prateleira[diametro_calculado.index(dif_min)]

    print('Para o meio, usar o diâmetro: ')

    print(diametro_meio_real)


#Para o FIM:

print(' ')

print(' ')

```

```

print('Para o fim:')

if rc_fim >= 0.9*(1-(CS/100)):

    escolha = 'finalizadora'

else:

    if rc_fim >= 0.55*(1-(CS/100)):

        print('Usar válvula Venturi')

        escolha = 'V'

    else:

        print('Usar válvula Venturi ou válvula de Orifício')

        escolha = input('Escolha V para Venturi ou O para Orifício: ')

if escolha == 'V' or escolha == 'v':

    vazao_fim = float(input('Vazão (m³/d): '))

    Pmon_fim = float(input('Pressão a jusante (bar): '))

    Pstd_fim = float(input('Pressão nas condições standard (bar): '))

    zg_mont_fim = float(input('Fator de compressibilidade do gás a montante
da válvula: '))

    zg_std_fim = float(input('Fator de compressibilidade do gás em
condições standard: '))

    temp_mont_fim = float(input('Temperatura a montante da válvula: '))

    temp_std_fim = float(input('Temperatura em condições standard: '))

    i_fim = float(input('Velocidade do som no gás: '))

    diametro_fim =

((vazao_fim*Pstd_fim*zg_mont_fim*temp_mont_fim)/(i_fim*Pmon_fim*zg_std_fim*
temp_std_fim*3.1416))**(1/2)

```

```

elif escolha == 'O' or escolha == 'o':

    dg_fim = float(input('Densidade do gás: '))

    temp_fim = float(input('Temperatura(Kelvin): '))

    Cd_fim = float(input('Coeficiente de Descarga: '))

    Pjus_fim = float(input('Pressão a jusante (bar): '))

    vazao_fim = float(input('Vazão (m³/d): '))

    diametro_fim =
((4*vazao_fim*((dg_fim*temp_fim)**(1/2)))/(282.6*Cd_fim*Pjus_fim*3.1416))**(1/2
)

```

```

elif escolha == 'finalizadora':

```

```

    print(' ')

```

```

else:

```

```

    print('É necessário escolher a válvula a ser usada')

```

```

if escolha == 'finalizadora':

```

```

    print('Alterar o TVD para garantir o fluxo crítico')

```

```

else:

```

```

    #Escolhendo o diâmetro de prateleira

```

```

    diametro_prateleira = [7/64, 1/8, 3/16, 3/8, 1/4, 5/16, 1/2, 9/16, 5/8]

```

```

    diametro_calculado = []

```

```

    i=0

```

```

    for i in range(len(diametro_prateleira)):

```

```

        if diametro_prateleira[i] >= diametro_fim:

```

```

            dif_diam = diametro_prateleira[i] - diametro_fim

```

```

        diametro_calculado.append(dif_diam)

    else:

        dif_diam = diametro_fim - diametro_prateleira[i]

        diametro_calculado.append(dif_diam)


#Pegando a menor diferença para escolher o diâmetro como o mais
próximo do ideal

dif_min = min(diametro_calculado)

#O diâmetro de prateleira será aquele que teve a mínima diferença do
diâmetro calculado

diametro_fim_real =
diametro_prateleira[diametro_calculado.index(dif_min)]

print('Para o fim, usar o diâmetro: ')

print(diametro_fim_real)

```