

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
SIMULAÇÃO DA VAZÃO ÓTIMA DE INJEÇÃO DE GÁS PARA SISTEMAS
DE *GAS LIFT* CONTÍNUO EM POÇOS VERTICAIS**

ALLAN KARDEC DA COSTA BARROSO JUNIOR

MANAUS – AM
2018

ALLAN KARDEC DA COSTA BARROSO JUNIOR
21003067

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
SIMULAÇÃO DA VAZÃO ÓTIMA DE INJEÇÃO DE GÁS PARA SISTEMAS
DE *GAS LIFT* CONTÍNUO EM POÇOS VERTICAIS**

Projeto apresentado ao Curso de Engenharia de
Petróleo e Gás como requisito final ao
desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de
Curso – TCC.

Orientador: Prof. Ketson Patrick de Medeiros
Freitas

Co-orientador: Eng. João Paulo Calixto Salgado

Colaborador: Profa. Ana Carolina Monte
Almeida

Manaus, 10 / 12 / 2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B277d Barroso Junior, Allan Kardec da Costa
Desenvolvimento de ferramenta computacional para simulação da
vazão ótima de injeção de gás para sistemas de gas lift contínuo
em poços verticais / Allan Kardec da Costa Barroso Junior. 2018
75 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ketson Patrick de Medeiros Freitas
Coorientador: João Paulo Calixto Salgado
TCC de Graduação (Engenharia de Petróleo e Gás) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. gas lift. 2. simulador. 3. potencial do poço. 4. elevação artificial.
I. Freitas, Ketson Patrick de Medeiros II. Universidade Federal do
Amazonas III. Título

ALLAN KARDEC DA COSTA BARROSO JUNIOR

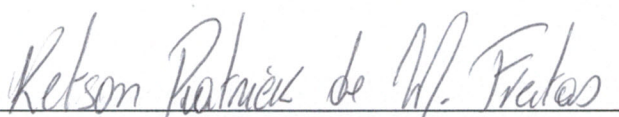
**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
SIMULAÇÃO DA VAZÃO ÓTIMA DE INJEÇÃO DE GÁS PARA
SISTEMAS DE GAS LIFT CONTÍNUO EM POÇOS VERTICAIS**

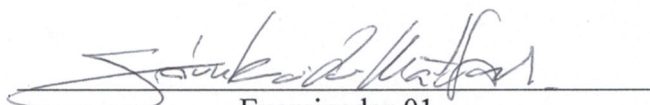
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
a Universidade Federal do Amazonas, como
parte das exigências para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Petróleo e Gás.

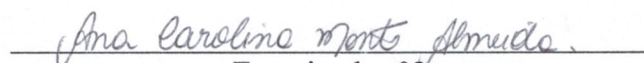
Manaus, 10 de dezembro de 2018.

Aprovado em 10 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA


Presidente da Banca Examinadora


Examinador 01


Examinador 02

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me concedido força e determinação para finalizar esta graduação.

Aos meus pais e minha irmã, que sempre me deram amor, apoio e incentivo, não só nesta graduação como também em toda minha vida. Agradeço a eles também pela construção do meu caráter e sempre terem me mostrado que a educação é o melhor caminho. Foi a presença constante deles em minha vida que permitiu que eu seguisse em frente e enfrentasse todas as dificuldades.

Aos meus queridos familiares e amigos, pela força e incentivo para a realização deste desafio.

Ao Ketson Patrick de Medeiros Freitas, pela paciência, disponibilidade e orientação dada para realização deste trabalho.

A Ana Carolina Monte Almeida e João Paulo Calixto Salgado pelo auxílio e tempo dedicado para sanar minhas dúvidas.

A todos os meus professores, por compartilharem do seu conhecimento durante toda essa jornada.

A todos os alunos da primeira turma de petróleo e gás da Universidade Federal do Amazonas, por dividirem os momentos felizes e tristes durante grande parte desta caminhada.

A Universidade Federal do Amazonas, pelo ensino e oportunidade a mim concedidos.

Gostaria de agradecer também a todas as dificuldades enfrentadas durante essa jornada, pois foram elas que mais me ensinaram e me forçaram a melhorar como acadêmico e como profissional.

RESUMO

Prever resultados é fundamental para uma melhor análise de produção e tomada de decisões na indústria petrolífera. Desta forma, este trabalho consiste na construção de um simulador para o cálculo do potencial de um poço de petróleo sob efeito da aplicação do método de elevação *gas lift* contínuo. Para isto, foi utilizado o software Excel 2016 como plataforma para desenvolvimento do projeto. Após ampla revisão literária, foram inseridas equações baseadas na literatura objetivando facilitar o uso de cálculos complexos para análise de um sistema de *gas lift*, assim como, automatizar o processo de obtenção de resultados e com isto, permitir uma melhor análise do potencial de produção do poço. Desta forma, o simulador permite a obtenção rápida e com grande confiabilidade da vazão ótima de injeção de gás, uma das principais variáveis a ser considerada para análise de produção de um poço sob efeito deste método de elevação.

Palavras-chave: *gas lift*, simulador, potencial do poço, elevação artificial.

ABSTRACT

Predicting results is essential to better production analysis and decision making in the oil industry. Thus, this work consists in the construction of a simulator to calculate the well's potential of a well under effect of the continuous gas lift method. For this, the software Excel 2016 was used as a platform for project development. After extensive literary review, equations were inserted based on the literature, aiming to facilitate the use of complex calculations for gas lift system's analysis, as well as, to automate the obtaining results process and, with this, to allow a better analysis of the production caused by this lift method. In this way, the simulator allows a fast and reliable value of optimum gas injection flow, one of the main variables to be considered for the well production analysis of a well under the effect of this lift method.

Keywords: gas lift, simulator, well potential, artificial lift.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	JUSTIFICATIVA.....	9
3	OBJETIVOS	10
3.1	OBJETIVO GERAL	10
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
4.1	Métodos de elevação	11
4.2	<i>Gas lift</i>	12
4.2.1	Tipos de sistema <i>gas lift</i>	15
4.3	Correlações de fluxo multifásico	22
4.3.1	Método de Hagedorn-Brown.....	23
5	METODOLOGIA	29
5.1	Construção do simulador.....	29
5.1.1	Planilha “Tela inicial”	29
5.1.2	Planilha “Hagedorn&Brown”	31
5.1.3	Planilha “ <i>Gas lift</i> ”	42
5.1.4	Planilha “Análise de profundidade”	45
5.1.5	Planilha “Ponto de operação”	46
5.1.6	Planilha “RGL ótima”	47
5.1.7	Planilha “Resultados”	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
	APÊNDICE A – Macros Utilizadas.....	58

1 INTRODUÇÃO

No início de sua vida produtiva os poços de petróleo podem apresentar surgência. Um poço é dito como surgente quanto a elevação do fluido de formação alcança a superfície de forma natural, devido à pressão do reservatório ser suficiente para que isto ocorra. Quando a pressão de reservatório não é suficiente para realizar a elevação do fluido ou após o declínio da pressão de reservatório causada pela produção do fluido da formação, faz-se necessário a aplicação de um método de elevação artificial.

Existem vários métodos de elevação artificial com princípios de funcionamento diferentes. Cada um apresenta vantagens e desvantagens de acordo com as características do poço, da localização e do fluido produzido. Na concepção de Thomas (2004) os mais utilizados são o bombeio centrífugo submerso, bombeio mecânico com hastes, bombeio por cavidades progressivas e método *gas lift*.

O método *gas lift* pode ser subdividido entre *gas lift* contínuo e intermitente. O primeiro, consiste na injeção de gás na coluna de produção para diminuir a densidade relativa do fluido e facilitar a sua surgência. O segundo, tem como princípio de funcionamento o deslocamento do fluido na coluna de produção por meio de golfadas geradas pela injeção de gás em intervalos de tempo pré-definidos.

O método *gas lift* contínuo é amplamente utilizado. Isto se deve ao fato deste método ser muito versátil. Sua aplicação pode ser realizada em poços submersos, poços que apresentem elevada razão gás-líquido (RGL) e produção de areia, assim como, elevada profundidade, porém demandando um investimento relativamente baixo. As principais variáveis a serem definidas para o melhor rendimento deste método de elevação são: vazão e pressão do gás de injeção e a profundidade da válvula de injeção de gás. Para defini-las, devem ser utilizados simuladores para prever o comportamento da produção de acordo com a configuração destas variáveis. Com isto, podemos definir estas variáveis para melhor atuação do sistema.

Deste modo, este trabalho propõem a construção de um simulador para prever a vazão ótima de injeção de gás para um sistema de *gas lift* contínuo implementado em um poço vertical. A vazão ótima de injeção de gás é a que proporcionará a vazão

máxima de produção. Com isto, o sistema de *gas lift* poderá ser configurado para alcançar todo o seu potencial produtivo.

2 JUSTIFICATIVA

Os métodos de elevação artificiais são de grande importância na indústria do petróleo pois sua utilização permite a produção de óleo em poços onde não há elevação natural. Estes métodos também permitem a otimização da produção em poços surgentes. Desta forma o conhecimento de cada método apresenta grande importância na escolha do melhor método a ser aplicado.

O método de elevação por *gas lift* contínuo é amplamente aplicado em poços de petróleo pelo mundo. Assim sendo, a compreensão de seu princípio de funcionamento e o conhecimento de suas limitações é fundamental para formação de um engenheiro de petróleo. Para isto, é necessário o conhecimento dos equipamentos utilizados neste sistema e as variáveis que mais influenciam o desempenho do mesmo.

Para um sistema de *gas lift* contínuo as principais variáveis a serem analisadas são a pressão e vazão de gás de injeção e a profundidade do ponto de injeção. Deste modo, é necessário a utilização de um simulador capaz de prever a configuração do sistema para que estas variáveis permitam o alcance do máximo desempenho de produção do poço analisado.

A criação de um simulador para cálculo da vazão ótima de injeção de gás proporcionará um conhecimento mais aprofundado deste método de elevação, assim como, permitirá analisar a influência de cada variável na atuação do sistema. Além disso, a construção de *software* acessível aos demais acadêmicos poderá auxiliá-los em projetos futuros.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver simulador no *software* Excel 2016 para cálculo da taxa ótima de gás de injeção em um sistema de *gas lift* aplicado em um poço de petróleo vertical, visando o ganho de conhecimento do método de elevação estudado, assim como, a melhor compreensão do funcionamento do sistema.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma ferramenta computacional acessível e funcional;
- Verificar o ponto de operação na profundidade de injeção de um sistema de *gas lift* contínuo em um poço vertical;
- Calcular os valores da taxa ótima de injeção de gás e pressão ótima de injeção de gás em um sistema de *gas lift* contínuo;
- Validar os resultados obtidos com base na literatura estudada;

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Métodos de elevação

A retirada de hidrocarbonetos de uma jazida de petróleo ocorre por meio dos métodos de elevação. Estes são utilizados para proporcionarem o fluxo de fluídos desde o reservatório até as unidades de produção.

Quando a pressão de reservatório é suficientemente elevada, os fluidos de reservatório alcançam a superfície de forma natural. Poços que produzem com elevação natural são classificados como surgentes. Geralmente, essa elevação natural ocorre durante o início da vida produtiva dos poços e ocasiona um menor custo de produção por unidade de volume, maiores vazões de líquido e simplifica os equipamentos de superfície e subsuperfície necessários. Porém, a produção de fluido causa um declínio na pressão de reservatório, resultando na perda da capacidade de surgência.

De acordo com Thomas (2004), quando a pressão de reservatório é baixa ou quando o poço se encontra no final de sua vida produtiva por elevação natural, os fluidos devem alcançar a superfície por meio de métodos de elevação artificiais. Dentre esses métodos, os mais comumente utilizados são: bombeio centrífugo submerso (BCS); bombeio mecânico com hastes (BM); bombeio por cavidades progressivas (BCP); e *gas lift*.

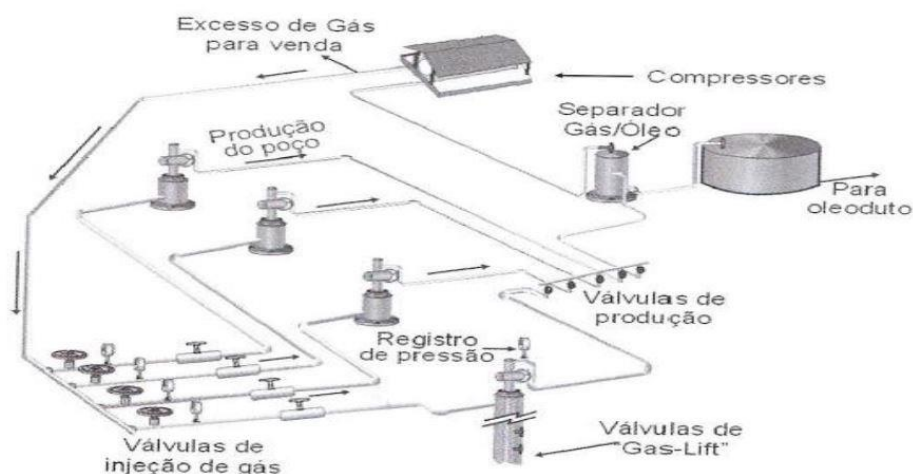
Os métodos de elevação artificiais requerem a utilização de equipamentos específicos de superfície e subsuperfície, assim como, uma análise da viabilidade do método utilizado. Vários fatores interferem na escolha do método aplicado, dentre eles, podemos destacar a quantidade de poços, diâmetro do revestimento, presença de areia, disponibilidade de energia, profundidade do reservatório, vazão esperada e custo de equipamentos e de operação (THOMAS, 2004).

4.2 Gas lift

O método de elevação *gas lift* consiste na injeção de gás sob alta pressão através do anular do *casing* na coluna de produção para utilizar essa energia contida no gás comprimido para elevar o fluido até a superfície. O gás comprimido pode afetar o fluido de duas maneiras: a energia de expansão do gás impulsiona o fluido para a superfície (*gas lift* intermitente – GLI) ou o gás gaseifica a coluna de fluido fazendo com que sua densidade efetiva diminua e, com isso, tornando mais fácil sua elevação até a superfície (*gas lift* contínuo – GLC) (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

O uso de *gas lift* proporciona grande versatilidade no quesito profundidade do poço, com o alcance de até 2600 metros e vazão de 1 a 1700 m³/dia. É indicado para poços com elevada razão gás-líquido, alto teor de areia e poços com profundidade elevada devido ao seu baixo custo (THOMAS, 2004). Como limitação, o método requer a injeção de gás em alta pressão e, para isso, gera um grande custo devido utilização de compressores. Para contornar esse problema e tornar a utilização do método economicamente viável, é interessante compartilhar o sistema com mais de um poço (FIGURA 1) (RIZZO FILHO, 2011).

Figura 1 – Composição de sistema *gas lift* para mais de um poço



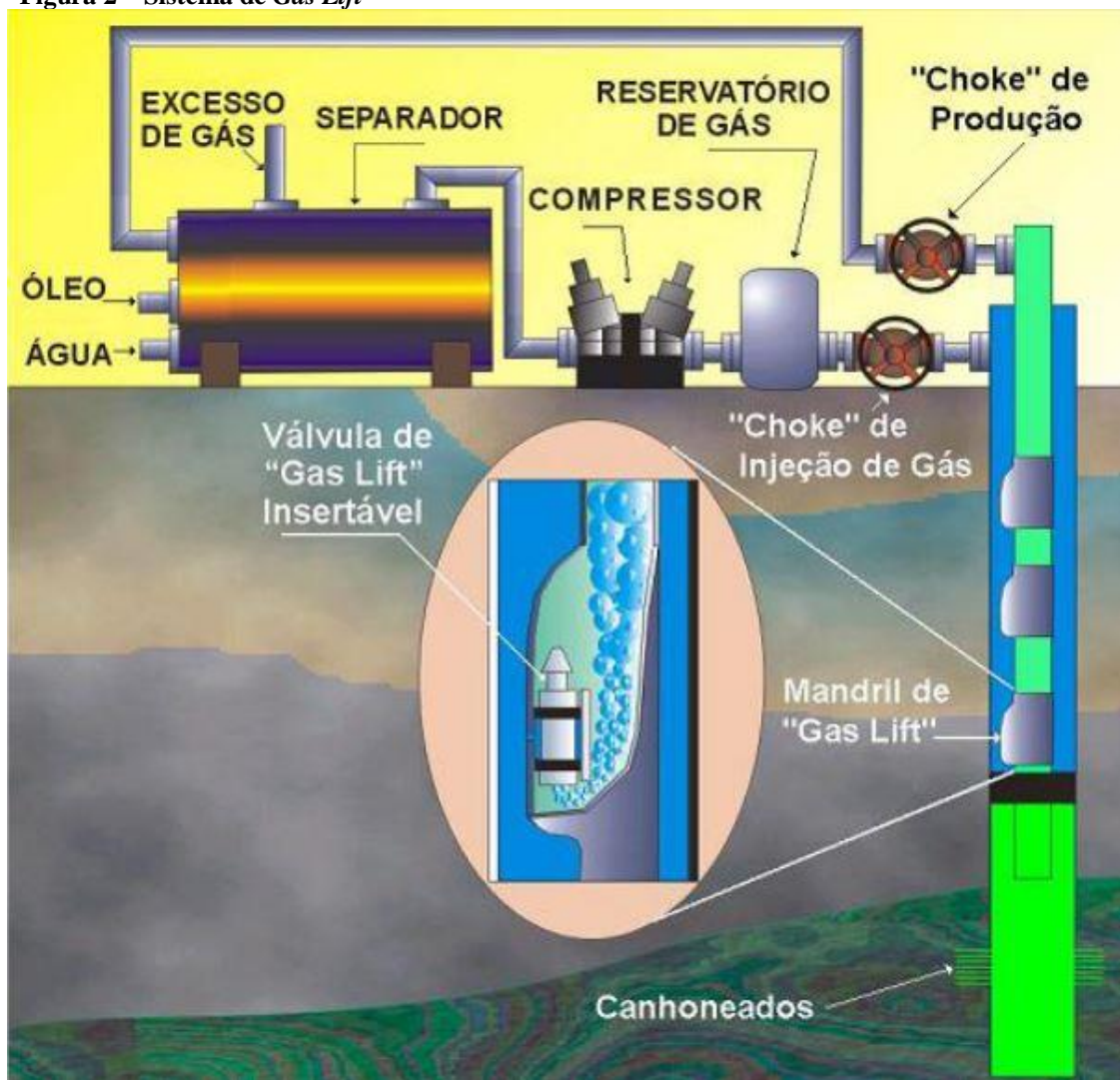
Fonte: (THOMAS, 2004)

Thomas (2004) descreve a composição de um sistema *gas lift* (FIGURA 2) da seguinte forma:

- Compressor – proporciona o gás a alta pressão;

- *Choke* ou válvula motorizada – controla a injeção de gás em superfície;
- Válvula de *gas lift* – controla a injeção do gás em subsuperfície;
- Separadores – separa os fluidos de produção;
- Tanques – armazena os fluidos;
- Árvore de natal – controla o fluxo de fluido da formação;
- Controlador lógico programável (CLP).

Figura 2 – Sistema de *Gas Lift*



Fonte: (PLUCENIO, 2003)

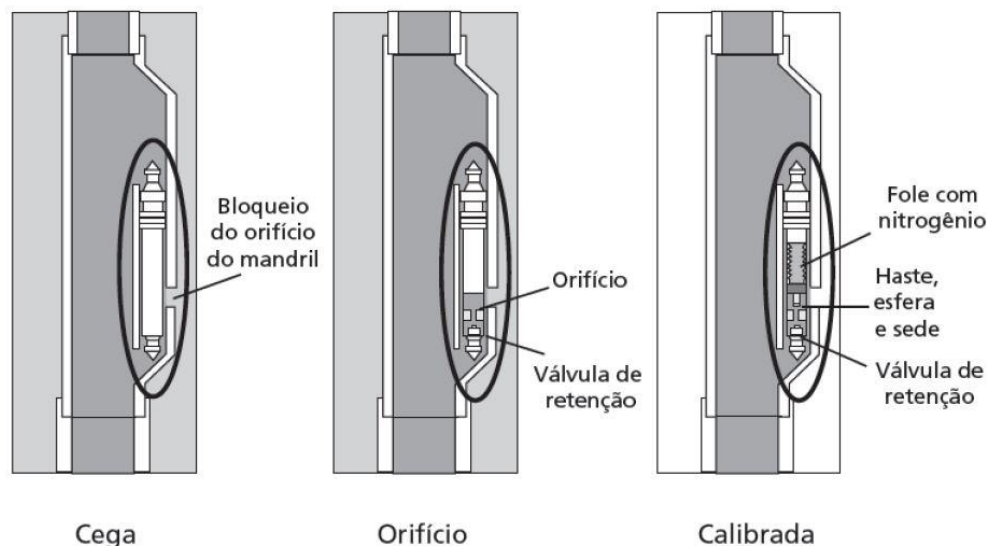
Podemos dividi-los em equipamentos de superfície e subsuperfície. Os equipamentos de superfície têm a função de injetar gás na pressão necessária, controlar a injeção de gás, controlar o fluxo do fluido produzido até a superfície e vedar o espaço entre revestimento de produção e coluna. Como exemplo de equipamentos de

subsuperfície podemos citar: árvore de natal, *choke* ou válvula motorizada, compressor e CLP. Já os equipamentos de subsuperfície conduzem o fluido até a superfície e realizam interação da injeção de gás entre anular do *casing* e a coluna de produção. Temos como exemplo a válvula de *gas lift*, mandril e a coluna de produção.

A válvula de *gas lift* possui um papel fundamental no sistema *gas lift* no fundo do poço. Esta fica alojada no mandril ou faz parte do mesmo. Sua função é guiar o fluido na coluna de produção não permitindo o fluxo no sentido contrário (da coluna de produção para o anular). Geralmente, as válvulas contam com um *check* que previne o fluxo contrário do fluido após a injeção. As válvulas podem ser classificadas como válvula operadora ou válvula de descarga, dependendo de sua função. A válvula operadora realiza o controle de injeção de gás e a válvula de descarga retira o fluido de amortecimento do poço.

Na Figura 3 podemos visualizar os três tipos de válvulas *gas lift* existentes: cega, de orifício e calibrada. A válvula cega bloqueia o orifício do mandril. A válvula de orifício tem o papel de uma válvula operadora, atuando da mesma forma. Por fim, a válvula de calibrada atua na descarga do poço.

Figura 3 – Tipos de válvulas de *gas lift*



Fonte: (SPÍNDOLA, 2003)

4.2.1 Tipos de sistema *gas lift*

O método de elevação *gas lift* pode ser aplicado de duas formas diferentes: *gas lift* intermitente (GLI) e *gas lift* contínuo (GLC). Estes dois sistemas possuem características diferentes que influenciam na produção. A escolha do melhor tipo de sistema a ser aplicado é influenciada por diversos fatores, dentre eles Góis Júnior (2014) destaca o índice de produtividade (IP) e a pressão estática (Pe).

Góis Júnior (2014) afirma que, em um poço com índice de produtividade baixo deve ser aplicado o GLI independentemente de sua pressão estática ser baixa, média ou alta. Por outro lado, em caso de poços com IP médio podem ser utilizados ambos os sistemas quando apresentar Pe média ou alta, porém é recomendável apenas o sistema GLI para Pe baixa. Já no caso onde o poço apresentar IP alto é aconselhado utilizar: GLC para Pe alta; qualquer um dos métodos para Pe média; apenas GLI para Pe baixa. O Quadro 1 pode demonstrar a relação entre a escolha do sistema, IP e Pe de forma mais clara.

Quadro 1 – Relação do método *gas lift* utilizado com o IP e Pe

	IP – Baixo	IP – Médio	IP - Alto
Pe – Baixa	GLI	GLI	GLI
Pe – Média	GLI	GLI/GLC	GLI/GLC
Pe – Alta	GLI	GLI/GLC	GLC

Fonte: (GÓIS JÚNIOR, 2014)

Podemos classificar Pe como: baixa – quando suporta uma coluna de fluido inferior a 40% da profundidade total do poço; média – quando a coluna de fluido suportada está entre 40% e 70% da profundidade total do poço; alta – quando suporta uma coluna de fluido igual ou superior a 40% da profundidade total do poço. A classificação utilizada para IP está descrita no Quadro 2 (GÓIS JÚNIOR, 2014).

Quadro 2 – Classificação de IP

	Baixo	Médio	Alto
IP $\left[\frac{m^3}{\frac{d}{kg}} \right]$	IP < 0,68	0,68 > IP > 2,26	IP > 2,26

Fonte: (GÓIS JÚNIOR, 2014)

4.2.1.1 *Gas Lift* Intermitente

O GLI é um sistema de injeção de gás lift baseado no deslocamento do fluido de produção até a superfície por meio de golfadas. Para isto, o gás é injetado em alta pressão com intervalos de tempo definidos. Estes intervalos de injeção são controlados por um intermitor de ciclo localizado na superfície. Desta forma, a válvula permite a injeção de gás em subsuperfície, respeitando o intervalo tempo definido.

Conforme Dunn-Norman (2014 apud DE OLIVEIRA, 2017, p. 22), o GLI atua sob as seguintes condições:

- Taxa de produção: 500 bpd;
- Pressão de fundo do poço: >150 psi;
- Injeção de gás: 250 a 300 scf/bbl por 1000 ft de injeção;
- Pressão de injeção: < 100 psi por 1000 ft de injeção;

Este sistema de injeção de gás é utilizado quando o GLC não é mais viável, em campos onde a pressão de formação sofreu declínio. Poços com alta pressão de formação e baixa produtividade são ideais para a aplicação deste método de elevação (TAKÁCS, 2005).

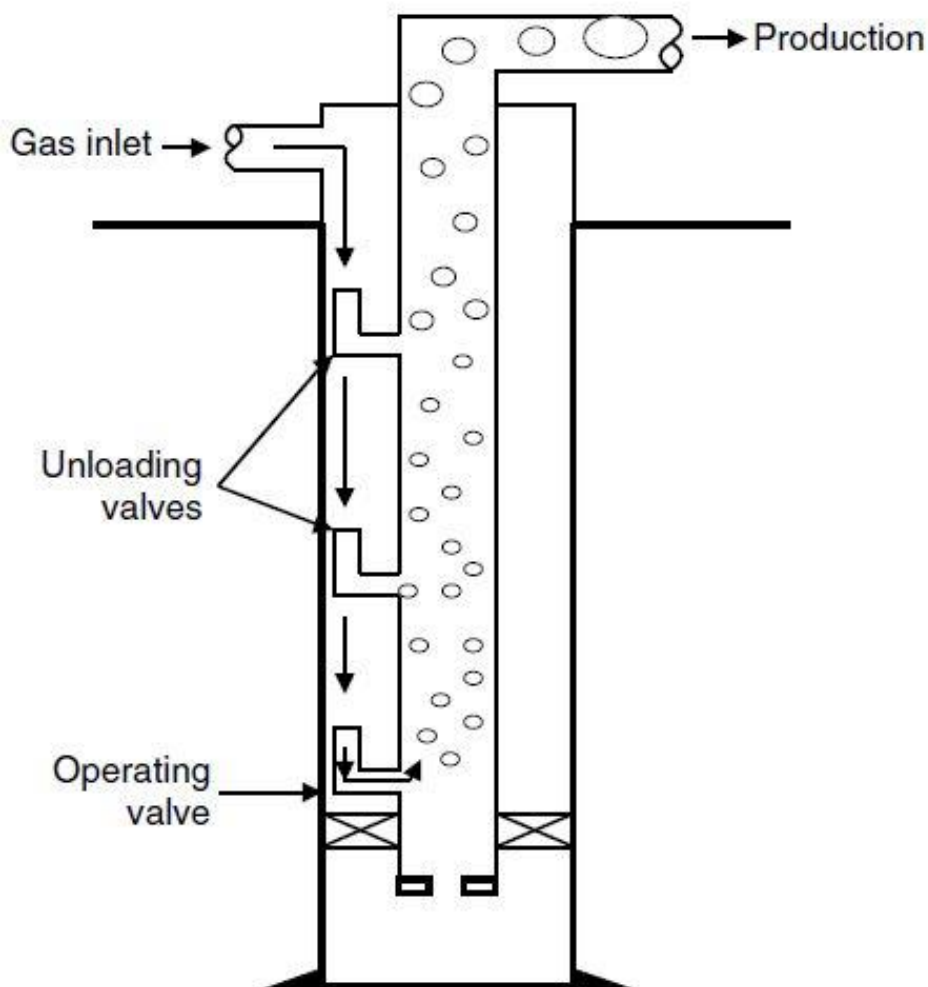
4.2.1.2 *Gas Lift* Contínuo

Este método de elevação artificial consiste na injeção de gás em alta pressão de forma contínua. A injeção de gás tem como objetivo aerar o fluido na coluna de produção, reduzindo sua densidade efetiva e com isto, diminuindo a pressão hidrostática do fluido na coluna acima do ponto de injeção. Desta forma, a pressão hidrostática da coluna deve ser reduzida o suficiente para que a pressão do reservatório consiga elevar o fluido até a superfície com uma vazão desejada.

Uma das vantagens deste método é a utilização de injeção do próprio gás da formação que é produzido, separado e tratado. Este gás é comprimido em alta pressão por compressores e distribuídos por linhas de injeção de gás para um ou mais poços. O

gás é injetado dentro do anular o *casing*. A vazão de injeção no anular é controlada pelo *choke* ou válvula motorizada. Com isto, o gás ocupa todo o espaço anular do *casing* e deve permanecer com pressão suficiente para a injeção dentro da coluna de produção. Para chegar a coluna de produção, o gás flui através de uma válvula operadora, que pode ser do tipo válvula de orifício ou pode ser um dispositivo que se abre de acordo com a pressão do anular ou da coluna de produção. A válvula operadora de *gas lift* fica localizada em um mandril de *gas lift* que é instalado na coluna de produção. Podemos ver na Figura 4 um esquema de injeção de *gas lift* contínuo.

Figura 4 – Configuração de injeção de *gas lift* contínuo



Fonte: (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007)

4.2.1.2.1 Avaliação do potencial de *gas lift*

De acordo com Guo, Lyons e Ghalambor (2007), o potencial do método *gas lift* é influenciado pela taxa de injeção de gás e pela razão gás-líquido (RGL). Quatro resultados são significativos de acordo com a injeção de gás aplicada:

- Não ocorre fluxo de fluido de produção para superfície devido à baixa vazão de gás – gás é injetado com vazão muito baixa e é insuficiente para elevar o fluido na coluna de produção, subindo a superfície em pequenas semiesferas (regime de bolha);
- A taxa de injeção ocorre com máxima eficiência - menor volume de gás requerido para elevar determinada quantidade de fluido de produção;
- A taxa de injeção utilizando a RGL ótima – máxima vazão de fluido;
- Não ocorre fluxo de fluido de produção para a superfície devido a vazão de gás extremamente alta – o gás produz fricção com a coluna de produção impedido o fluxo de fluido de produção no tubo.

Para avaliar o potencial da aplicação do método de elevação por *gas lift* contínuo é necessário determinar o ponto de operação do poço. O ponto de operação mostra o potencial de produção do poço. Para encontrá-lo devemos realizar uma análise nodal no ponto de injeção de gás dentro do tubo da coluna de produção, calculando a curva de *inflow performance* e de *outflow performance*. A curva de *inflow performance* é a *inflow performance relationship* (IPR) menos a queda de pressão no fundo do poço até o ponto de injeção. Já a curva de *outflow performance* é dada pela queda de pressão ao longo da coluna de produção gerada pela RGL causada pela injeção de gás, que pode ser calculada utilizando uma correlação de fluxo multifásico. O ponto de interseção entre essas duas curvas resultará no ponto de operação (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

Conforme Guo, Lyons e Ghalambor (2007), desprezando a perda de pressão por fricção abaixo do ponto de injeção, a curva de *inflow performance* no ponto de injeção dentro do tubo pode ser calculada pela equação 1.

$$P_{vf} = 0,125P_{res} \left[\sqrt{81 - 80 \left(\frac{q}{q_{max}} \right)} - 1 \right] - G_r(D - D_v) \quad (1)$$

Onde:

P_{vf} : Pressão do tubo no ponto de injeção de gás [psia];

P_{res} : Pressão de reservatório [psia];

Q : vazão [stb/d];

Q_{max} : vazão máxima [stb/d];

G_r : gradiente de pressão do fluido de reservatório [psi/ft];

D : profundidade [ft];

D_v : profundidade da válvula [ft].

Quando existe disponibilidade de quantidade ilimitada de gás de injeção, o poço deve receber uma vazão de injeção que gere a RGL ótima. A RGL ótima é a RGL que proporciona a menor pressão no fundo do poço, o que ocasiona maximização da produção.

Guo, Lyons e Ghalambor (2007) afirmam que, depois da análise do ponto de operação utilizando a RGL ótima tomamos conhecimento da vazão de líquido esperada (vazão do ponto de operação). Com isto, calculando a RGL ótima para a vazão do ponto de operação podemos calcular a RGL de injeção (equação 2).

$$RGL_{inj} = RGL_{opt,o} - RGL_{fm} \quad (2)$$

Onde:

RGL_{inj} : razão gás-líquido de injeção [scf/stb];

$RGL_{opt,o}$: razão gás-líquido ótima para vazão de líquido do ponto de operação [scf/stb];

RGL_{fm} : razão gás-líquido do fluido da formação [scf/stb].

A vazão de injeção de gás requerida para vazão de líquido esperada é dada pela equação 3.

$$Q_{inj} = RGL_{inj}Q_L \quad (3)$$

Onde:

Q_{inj} : vazão de gás de injeção [scf/d];

Q_L : vazão de líquido [stb/d].

4.2.1.2.2 Pressão de saída do gás de injeção da unidade de compressão

Para o funcionamento ideal do método de injeção *gas lift* contínuo é de extrema importância o controle da pressão de injeção de gás. Para isso, a unidade de compressão necessita comprimir o gás de forma a alcançar a pressão de injeção requerida pelo sistema. Guo, Lyons e Ghalambor (2007) afirmam que o cálculo da pressão de saída do gás de injeção da estação de compressão pode ser realizado com a equação 4.

$$P_{out} = S_f P_L \quad (4)$$

Onde:

P_{out} : pressão de saída do gás de injeção da unidade de compressão [psia];

S_f : fator de segurança;

P_L : pressão na linha de distribuição do gás de injeção [psia].

O fator de segurança deve ser estabelecido durante a fase de projeto. Desta forma, podemos realizar o cálculo da pressão de saída obtendo a pressão na linha de distribuição com a equação descrita por Weymouth (1912), utilizada para fluxo horizontal. Rearranjando a equação para solução da pressão na linha de distribuição, temos a equação 5.

$$P_L = \sqrt{P_{up}^2 + \left(\frac{Q_{gM} P_b}{0,433 T_b} \right)^2 \frac{\gamma_g \bar{T}_s \bar{Z}_L L_g}{D_g^{16/3}}} \quad (5)$$

Onde:

P_{up} : pressão *upstream choke* [psia];

Q_{gM} : vazão de gás por *manifold* [Mscf/d];

P_b : pressão na base [psia];

T_b : temperatura na base [$^{\circ}\text{R}$];

γ_g : gravidade específica do gás relacionada com o ar;

T_s : temperatura na superfície [$^{\circ}\text{R}$];

Z_L : fator de compressibilidade médio do gás na linha de distribuição;

L_g : comprimento da linha de distribuição de gás [ft];

D : diâmetro da linha de distribuição de gás [in].

Assumindo um fluxo crítico no *choke* de injeção em superfície podemos encontrar P_{up} com a equação 6.

$$P_{up} = 1,82P_{dn} \quad (6)$$

Onde:

P_{dn} : pressão *downstream choke* [psia];

O fluxo crítico ocorre quando a velocidade do gás fluindo através do orifício do *choke* de injeção é a mesma que a velocidade do som no gás (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

Se negligenciarmos a perda de pressão entre o *choke* de injeção e o *casing*, a pressão *downstream choke* pode ser considerada igual a pressão do *casing* próximo a superfície. Desta maneira a pressão do *casing* na profundidade da válvula operadora poderá ser encontrada:

$$P_{c,v} = P_{c,s} e^{0,01875 \frac{\gamma_g D_v}{Z_A T}} \quad (7)$$

Onde:

$P_{c,v}$: pressão do *casing* na profundidade da válvula operadora [psia];

$P_{c,s}$: pressão do *casing* próximo a superfície [psia];

Z_A : fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular do *casing* [psia];

T : média das temperaturas de superfície e na profundidade da válvula operadora [$^{\circ}\text{R}$].

Para relacionar a pressão da coluna de produção na profundidade da válvula operadora com $P_{c,v}$, Guo, Lyons e Ghalambor (2007) citam a equação 8.

$$P_{c,v} = P_{t,v} + \Delta P_v \quad (8)$$

Onde:

$P_{t,v}$: pressão da coluna de produção na profundidade da válvula operadora [psia];

ΔP_v : diferencial de pressão no orifício da válvula operadora.

O valor utilizado de ΔP_v em projetos é geralmente 100 psi (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

4.3 Correlações de fluxo multifásico

Muitos métodos empíricos foram desenvolvidos para calcular o gradiente de pressão de fluxo multifásico. Estes métodos usam propostas diferentes para calcular os três componentes do gradiente de pressão total.

A equação (9) mostra que gradiente de pressão total é igual a soma do gradiente de pressão por elevação (primeiro termo da equação), do gradiente de pressão por fricção (segundo termo) e do gradiente de pressão por aceleração (terceiro termo). O gradiente de elevação corresponde a cerca de 80 a 95% do gradiente de pressão total, o de fricção corresponde de 5 a 20% e o de aceleração é geralmente negligenciado devido a só ser significativo em casos onde haja mudanças significativas na velocidade ou alta velocidade de escoamento de fluido (GÓIS JÚNIOR, 2014).

$$\left(\frac{dP}{dL}\right)_t = \left(\frac{dP}{dL}\right)_e + \left(\frac{dP}{dL}\right)_f + \left(\frac{dP}{dL}\right)_a \quad (9)$$

As correlações para fluxo vertical foram desenvolvidas a partir de resultados coletados em laboratório de experimentos realizados em determinados modelos de sistemas. Desta forma, a aplicabilidade destas correlações deve ser avaliada de acordo

com as características dos experimentos realizados. Isto faz com que os modelos desenvolvidos percam confiabilidade se aplicados em sistemas com características diferentes dos sistemas utilizados para o desenvolvimento dos métodos. Os fatores mais significativos são: diâmetro da tubulação de fluxo, tamanho da tubulação, razão gás-líquido, presença de água e grau API do óleo.

4.3.1 Método de Hagedorn-Brown

De acordo com Lyons e Plisga (2005), este modelo foi desenvolvido através do estudo de um poço vertical de 1500 ft. Deve ser aplicado para uma tubulação entre 1 e 2 polegadas de diâmetro pois um aumento de diâmetro superestima o cálculo da queda de pressão. Óleos com o valor de 13 a 25 °API também ocasionam um gradiente de pressão superestimado, enquanto óleos de 45 a 56 °API subestimam o valor do gradiente. Razão gás-líquido acima de 5000 scf/stb também prejudica o resultado obtido, gerando superestima do gradiente de pressão. A viscosidade do óleo deve estar entre 10 e 110 cp a 80°F para a utilização da correlação do fator de *holdup*. Já para a presença de água, correlação gera um bom resultado para a maioria dos valores.

Hagedorn e Brown (1965), deduziram a equação principal para esta correlação (equação 10).

$$144 \frac{\Delta P}{\Delta L} = \bar{\rho}_m + \frac{f Q_L^2 M^2}{2,9652 \times 10^{11} D_i^5 \bar{\rho}_m} + \bar{\rho}_m \frac{\Delta \left(\frac{v_m^2}{2g_c} \right)}{\Delta L} \quad (10)$$

Onde:

ρ_m : massa específica média da mistura [lb/ft³];

M : massa total de óleo, água e gás em associação a 1 barril de líquido em escoamento [lbm/bbl];

D_i : diâmetro interno da tubulação [ft];

v_m : velocidade média da mistura [ft/s];

g_c : constante de conversão com o valor de 32,174 lbm*ft/lbf*s²;

ΔL : diferencial de comprimento [ft].

11. Sendo realizado o cálculo da massa específica média da mistura com a equação

$$\bar{\rho}_m = \bar{\rho}_L H_L + \bar{\rho}_g (1 - H_L) \quad (11)$$

Onde:

ρ_L : massa específica média do líquido [lb/ft³];

H_L : *holdup* de líquido;

ρ_g : massa específica média do gás [lb/ft³];

A massa total dada pela equação 12.

$$M = (350)\gamma_o \left(\frac{1}{1+RAO} \right) + (350)\gamma_w \left(\frac{RAO}{1+RAO} \right) + (0,0764)(RGL)\gamma_g \quad (12)$$

Onde:

γ_o : densidade do óleo;

γ_w : densidade da água.

Duns e Ros (1963), elaboraram números adimensionais utilizados para o cálculo dos arranjos de fase e grau de escorregamento, sendo isto, em um local específico no escoamento vertical. Estes números foram utilizados por Hagedorn e Brown (1965) para calcular alguns fatores e coeficientes de sua correlação. Para o cálculo dos números adimensionais são utilizadas as equações 13, 14, 15 e 16, com unidades de medida inglesas.

$$N_{gv} = 1,938 v_{sg} \left(\frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{0,25} \quad (13)$$

Onde:

v_{sg} : velocidade superficial do gás [ft/s];

σ_L : tensão superficial do líquido [dyn/cm].

$$N_{Lv} = 1,938 v_{sL} \left(\frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{0,25} \quad (14)$$

Onde:

v_{sL} : velocidade superficial do líquido [ft/s].

$$N_D = 120,872 D_i \left(\frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{0,5} \quad (15)$$

$$N_L = 0,15726 \mu_L \left(\frac{1}{\rho_L \sigma_L^3} \right)^{0,25} \quad (16)$$

Onde:

μ_L : viscosidade do líquido [cp].

Os adimensionais N_{gv} , N_{Lv} , N_D e N_L são relativos a velocidade do gás, velocidade do líquido, diâmetro da tubulação e viscosidade do líquido, respectivamente. Todos eles requerem o cálculo da massa específica do líquido que é dada pela equação 17.

$$\rho_L = 62,4 \left[\gamma_o \left(\frac{1}{1+RAO} \right) + \gamma_w \left(\frac{RAO}{1+RAO} \right) \right] \quad (17)$$

Já a equação 18 é aplicada para o cálculo da massa específica do gás.

$$\rho_g = 0,0764 \gamma_g \left(\frac{\bar{P}}{14,7} \right) \left(\frac{520}{\bar{T}} \right) \left(\frac{1}{Z} \right) \quad (18)$$

Onde:

P : pressão média [psi];

T : temperatura média [°F];

Z : fator de compressibilidade médio do gás.

Para o cálculo da velocidade superficial de líquido temos a equação 19.

$$v_{sL} = \frac{5,61 Q_L}{86400 A} \left[B_o \left(\frac{1}{1+RAO} \right) + B_w \left(\frac{RAO}{1+RAO} \right) \right] \quad (19)$$

Onde:

B_o : fator volume-formação do óleo [bbl/stb];

B_w : fator volume-formação da água [bbl/stb].

A velocidade superficial do gás é dada pela equação 20.:

$$v_{sg} = \frac{Q_L \left[RGL - R_s \left(\frac{1}{1 + RAO} \right) \right]}{86400A} \left(\frac{520}{\bar{P}} \right) \left(\frac{\bar{T}}{520} \right) \left(\frac{\bar{Z}}{1} \right) \quad (20)$$

Onde:

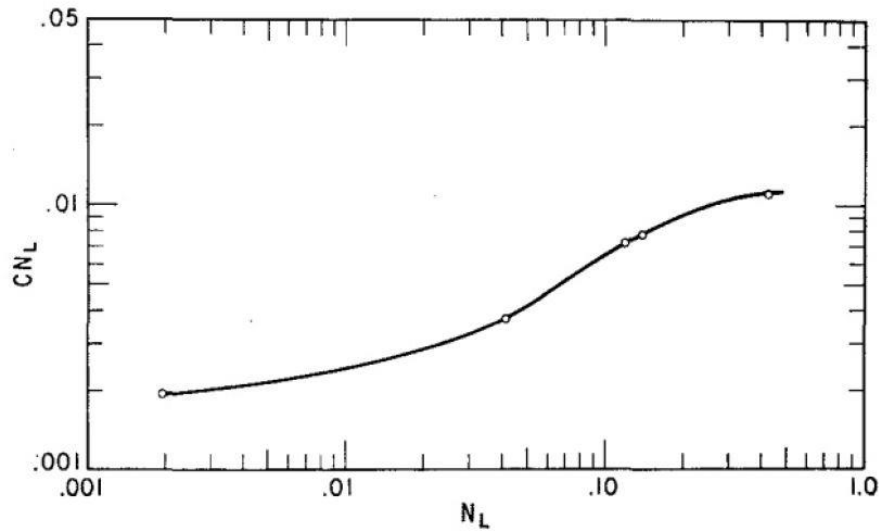
R_s : razão de solubilidade [scf/stb].

Com isto, podemos obter a velocidade média da mistura com a equação 21.

$$v_m = v_{sL} + v_{sg} \quad (21)$$

Podemos encontrar o coeficiente do número de viscosidade C na Figura 5, relacionando-o com número adimensional de viscosidade do líquido.

Figura 5 – Gráfico de correlação do coeficiente de número de viscosidade



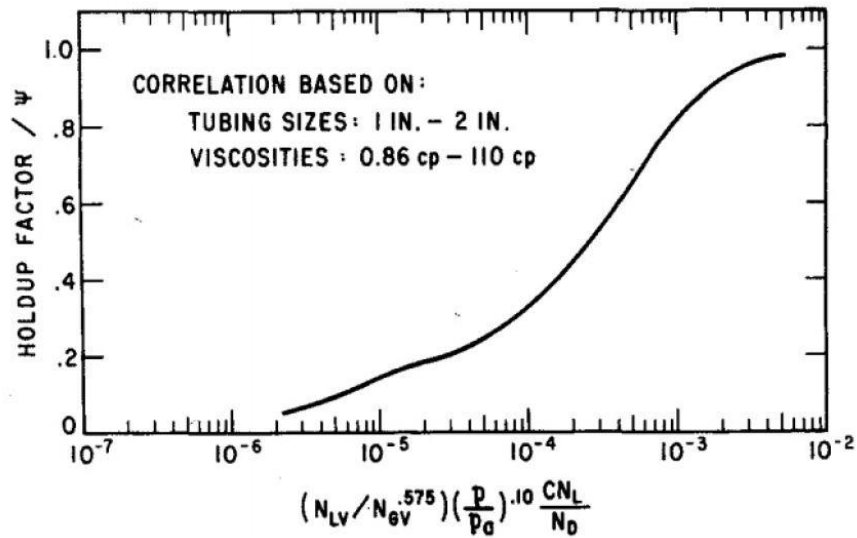
Fonte: (HAGEDORN; BROWN, 1965)

Com C , podemos calcular o fator de correlação para *holdup* Φ com a equação

$$\Phi = \frac{N_{Lv}}{N_{gv}^{0,575}} \left(\frac{\bar{P}}{14,7} \right)^{0,1} \left(\frac{CN_L}{N_D} \right) \quad (22)$$

O fator de *holdup* pode ser relacionado graficamente com o a razão entre holdup e o seu fator de correção Ψ (FIGURA 6).

Figura 6 – Gráfico de correlação do fator de *holdup*

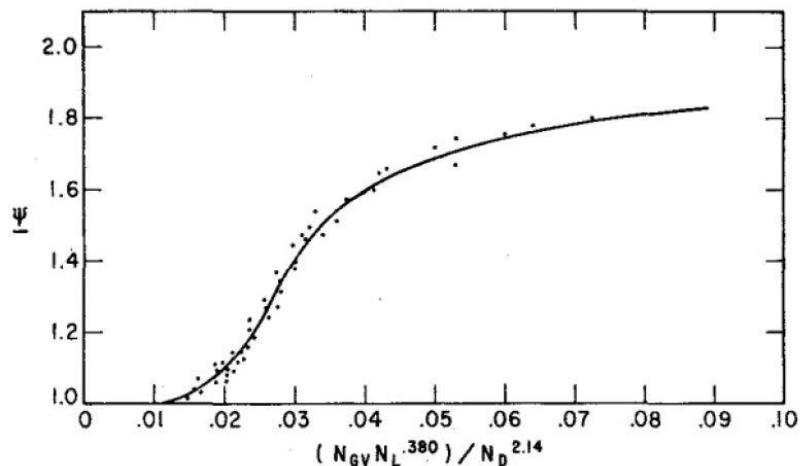


Fonte: (HAGEDORN; BROWN, 1965)

Para achar o fator de correlação secundário para *holdup* Φ_s utilizamos a equação (23).

$$\Phi_s = \frac{N_{gv} N_L^{0,38}}{N_D^{2,14}} \quad (23)$$

Figura 7 – Gráfico de correlação do fator secundário de correção



Fonte: (HAGEDORN; BROWN, 1965)

Com os dados obtidos nas Figuras 6 e 7 é possível obter o valor do *holdup* de líquido utilizando a equação 24.

$$H_L = \left(\frac{H_L}{\Psi} \right) (\Psi) \quad (24)$$

Hagedorn e Brown (1965) utilizaram o número de Reynolds de duas fases para o cálculo do fator de fricção. Desta forma, devemos utilizar a equação 25 para obtê-lo.

$$NRe_{tp} = \frac{2,2(10^{-2})Q_L M}{D\mu_m} \quad (25)$$

Onde:

NRe_{tp} : número de Reynolds para duas fases;

μ_m : viscosidade da mistura [cp].

Por fim, o cálculo da viscosidade da mistura é dado pela equação 26.

$$\mu_m = \mu_L^{H_L} \mu_g^{(1-H_L)} \quad (26)$$

Onde:

μ_g : viscosidade do gás [cp].

Esta correlação usa a diferença de velocidade média da mistura entre dois pontos para o cálculo do gradiente de pressão total. Este intervalo é o mesmo onde está sendo calculada a pressão média. Isto pode ser observado na equação 10 pela presença do termo Δv_m . Desta forma, fatores como a velocidade superficial do líquido, velocidade superficial do gás, razão de solubilidade e o fator de compressibilidade devem ser calculados no ponto anterior e posterior ao ponto médio, visto que estes fatores são funções das propriedades termodinâmicas.

5 METODOLOGIA

Após ampla revisão da literatura, foi utilizado o *software* Excel 2016 para construção do simulador. Também foi utilizado o recurso *Visual Basics for Applications* (VBA) do Excel para automatização de cálculos mais complexos com o uso de macros pré-programadas, que utilizam a linguagem de programação *Visual Basics* produzida pela Microsoft. Desta maneira, foi criado o simulador utilizando a metodologia descrita no item 5.1.

5.1 Construção do simulador

Como o Excel 2016 permite a subdivisão dos arquivos criados em planilhas que interagem de forma fácil e eficiente, optou-se pela criação de planilhas separadas, com finalidades diferentes, mas interagindo entre si para a obtenção dos resultados desejados. Deste modo, o desenvolvimento do simulador ocorreu de forma mais organizada e clara.

A finalidade de cada planilha e a metodologia para sua construção será descrita nos itens a seguir.

5.1.1 Planilha “Tela inicial”

Esta planilha foi criada com o objetivo de ser a tela inicial do simulador, permitindo a interação do usuário para a inclusão das variáveis de entrada necessárias para a realização dos cálculos e obtenção dos resultados. As variáveis de entrada requeridas pelo simulador e suas unidades podem ser visualizadas no Quadro 3.

Esta planilha permite a utilização de dois sistemas de unidades para os dados de entrada, sendo eles: o sistema internacional de unidades (SI) e o sistema de unidades inglesas.

Quadro 3 – Variáveis de entrada

Variáveis de entrada	Unidades SI	Unidades inglesas
Profundidade	m	ft
Profundidade da válvula	m	ft
Pressão de reservatório	MPa	psia
Pressão de cabeça de poço	MPa	psia
Temperatura de cabeça	°C	°F
Temperatura de fundo	°C	°F
Diâmetro interno do tubo	m	in
Grau API do óleo	-----	°API
Viscosidade do óleo	Pa.s	cp
Vazão de líquido	sm ³ /day	stb/d
Corte de água	%	%
Tensão superficial do líquido	N/m	dyn/cm
Gravidade específica da água	-----	-----
Gravidade específica do gás	-----	-----
Fração de contaminantes do óleo (CO ₂ , H ₂ S e N ₂)	%	%
Razão gás-líquido mínima	sm ³ /m ³	scf/stb
Razão gás-líquido máxima	sm ³ /m ³	scf/stb
Comprimento da linha de distribuição	km	mi
Diâmetro interno da linha de distribuição	m	in
Temperatura de superfície	°C	°F
Pressão na base	MPa	psia
Temperatura na base	°C	°F
Diferencial de pressão da válvula	MPa	psia
Fator de segurança de pressão	-----	-----
Gravidade específica do gás de injeção	-----	-----
Fração de contaminantes do gás de injeção (CO ₂ , H ₂ S e N ₂)	%	%

Fonte: (DO AUTOR, 2018)

Os valores de entrada devem ser inseridos na célula branca entre o nome da unidade requerida e a sua unidade de medida.

Na Figura 8 podemos visualizar a interface da planilha “Tela Inicial”.

Figura 8 – Interface da planilha “Tela Inicial”

VALORES DE ENTRADA		
PROFUNDIDADE		ft
PROFUNDIDADE DA VÁLVULA		ft
PRESSÃO DE RESERVATÓRIO		psia
PRESSÃO DE CABEÇA DE POÇO		psia
TEMPERATURA DE CABEÇA		°F
TEMPERATURA DE FUNDO		°F
DIÂMETRO INTERNO DO TUBO		in
GRAU API		°API
VISCOSIDADE DO ÓLEO		cp
VAZÃO DE LÍQUIDO		stb/dia
CORTE DE ÁGUA		%
TENSÃO SUPERFICIAL DO LÍQUIDO		dynes/cm
GRAVIDADE ESPECÍFICA DA ÁGUA		H ₂ O = 1
GRAVIDADE ESPECÍFICA DO GÁS		Ar = 1

RAZÃO GÁS-LÍQUIDO		
MÍNIMO		scf/stb
MÁXIMO		scf/stb

COMPRIMENTO DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO		miles
DIÂMETRO INTERNO DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO		in
TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE		°F
PRESSÃO NA BASE		psia
TEMPERATURA NA BASE		°F
DIFERENCIAL DE PRESSÃO DA VÁLVULA		psia
FATOR DE SEGURANÇA DE PRESSÃO		
GRAVIDADE ESPECÍFICA DO GÁS DE INJEÇÃO		Ar = 1

FRAÇÃO DE CONTAMINANTES		
DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)		%
ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S)		%
NITROGÊNIO (N ₂)		%

FRAÇÃO DE CONTAMINANTES DO GÁS DE INJEÇÃO		
DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)		%
ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S)		%
NITROGÊNIO (N ₂)		%

Unidades US Field

**ANALISAR
PROFUNDIDADE
DE VÁLVULA**

SIMULAR

Fonte: (DO AUTOR, 2018)

5.1.2 Planilha “Hagedorn&Brown”

O intuito desta planilha é utilizar a correlação de fluxo vertical multifásico criada por Hagedorn e Brown (1965) para predição do gradiente de pressão na tubulação do poço vertical analisado. Gradiente este, que será utilizado posteriormente para verificar as consequências da aplicação de diversos valores de vazão, razão gás-líquido e profundidade da válvula operadora do poço estudado.

Primeiramente, todas as unidades das variáveis de entrada foram colocadas no sistema de unidade inglesas pois o usuário tem a opção de inseri-las com unidades do sistema SI.

Após isto, foi realizado o cálculo da correlação de Hagedorn e Brown (1965) da forma descrita a seguir:

- Profundidade

Para análise, foi dividido o poço de estudo em vinte e nove seções de mesmo comprimento, de acordo com a profundidade total. Utilizou-se o valor da profundidade em ft.

- Pressão

Como a pressão conhecida é a pressão de cabeça de poço, o cálculo do gradiente de pressão é realizado na primeira seção (mais próxima à superfície) e é adicionado para obter a pressão no ponto posterior. Desta forma, é calculada para diferentes valores de profundidade. A pressão é obtida em psia.

- Temperatura

O gradiente de temperatura entre a temperatura de cabeça e de fundo do poço (ambas definidas pelo usuário) é calculado com a seguinte equação:

$$\Delta T = \frac{(T_{wf} - T_{hf})}{D} \quad (27)$$

Onde:

T_{wf} : temperatura de fundo do poço [°F];

T_{hf} : temperatura de cabeça do poço [°F].

Como T_{hf} é dada pelo usuário, podemos calcular a temperatura na profundidade desejada com a equação 28.

$$T_a = T_{hf} + D_a \times \Delta T \quad (28)$$

Onde:

T_a : temperatura na profundidade de análise [°F];

D : profundidade de análise [ft].

A temperatura também é obtida em °F, para cada valor de profundidade.

- Variáveis pseudo-críticas

Para calcular estas variáveis foi utilizado as correlações para sistema de gás natural de Standing (1981). As equações 29 e 30 foram usadas para obtenção dos valores da pressão e temperatura pseudo-críticas, respectivamente.

$$P_{pc} = 677 + 15\gamma_g - 37,5\gamma_g^2 \quad (29)$$

$$T_{pc} = 168 + 325\gamma_g - 12,5\gamma_g^2 \quad (30)$$

- Correção de contaminantes para variáveis pseudo-críticas

Como a presença de contaminantes interferem nos valores das variáveis pseudo-críticas, Carr et al. (1954) propuseram equações 31 e 32 para a correção destas variáveis. Estas equações levam em consideração a presença dos contaminantes mais presentes no petróleo: gás carbônico (CO₂), ácido sulfídrico (H₂S) e nitrogênio (N₂).

$$P'_{pc} = P_{pc} + 440y_{CO_2} + 600y_{H_2S} - 170y_{N_2} \quad (31)$$

$$T'_{pc} = T_{pc} - 80y_{CO_2} + 130y_{H_2S} - 250y_{N_2} \quad (32)$$

Cada variável y com indicação de um contaminante, refere-se à fração deste contaminante no óleo produzido.

- Variáveis pseudo-reduzidas

Obtendo as variáveis pseudo-críticas com a correção da presença de contaminantes, podemos calcular as variáveis pseudo-reduzidas. Para isto, utilizamos o valor da pressão em psia e o da temperatura em °R. O cálculo é feito para cada valor de temperatura e pressão, de acordo com a profundidade, e é realizado com as equações 33 e 34.

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (33)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (34)$$

- Fator de Compressibilidade

Beggs e Brill (1974) desenvolveram uma equação para o cálculo do fator de compressibilidade utilizando quatro fatores de ajustes das variáveis pseudo-reduzidas. Estes fatores são obtidos com as equações 35, 36, 37 e 38.

$$A = 1,39(T_{pr} - 0,92)^{0,5} - 0,36T_{pr} - 0,101 \quad (35)$$

$$B = (0,62 - 0,23T_{pr})P_{pr} + \left[\frac{0,066}{(T_{pr}-0,86)} - 0,037 \right] P_{pr}^2 + \left(\frac{0,32}{10^9(T_{pr}-1)} \right) P_{pr}^6 \quad (36)$$

$$C = 0,132 - 0,32 \log(T_{pr}) \quad (37)$$

$$D = 10^{(0,3016 - 0,49T_{pr} + 0,1824T_{pr}^2)} \quad (38)$$

Deste modo, é possível obter o fator de compressibilidade Z com a equação 39.

$$Z = A + \frac{1-A}{e^B} + CP_{pr}^D \quad (39)$$

- Viscosidade do gás

Sob a ótica de Standing (1981), podemos calcular a viscosidade do gás em cp à pressão de 1 atm com a equação 40.

$$\mu_{g1}^* = (1,709 \times 10^{-5} - 2,062 \times 10^{-6} \gamma_g)T + 8,188 \times 10^{-3} - 6,15 \times 10^{-3} \log_{10} \gamma_g \quad (40)$$

Assim, podemos aplicar o valor de μ_{g1}^* na equação 41.

$$\mu_{g1} = \mu_{g1}^* + (\Delta\mu_{g1})_{CO_2} + (\Delta\mu_{g1})_{H_2S} + (\Delta\mu_{g1})_{N_2} \quad (41)$$

Os termos $(\Delta\mu_{g1})$ com a indicação dos contaminantes (CO_2 , H_2S , N_2) são valores propostos para a correção do valor da viscosidade devido a influência da presença destas substâncias. Para o cálculo destes termos, utiliza-se as equações 42, 43 e 44.

$$(\Delta\mu_{g1})_{CO_2} = y_{CO_2}(9,08 \times 10^{-3} \log_{10} \gamma_g + 6,24 \times 10^{-3}) \quad (42)$$

$$(\Delta\mu_{g1})_{H_2S} = y_{H_2S}(8,49 \times 10^{-3} \log_{10} \gamma_g + 3,73 \times 10^{-3}) \quad (43)$$

$$(\Delta\mu_{g1})_{N_2} = y_{N_2}(8,489 \times 10^{-3} \log_{10} \gamma_g + 9,59 \times 10^{-3}) \quad (44)$$

Dempsey (1965) complementa a correlação de Standing (1981) propondo o uso do fator $C(P_{pr}, T_{pr})$ para correlacionar com a viscosidade do gás encontrada na equação 41. Para o cálculo do fator, é necessário o uso de algumas constantes descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Constantes de ajuste para viscosidade

Constante	Valor
A0	-2,462118200000
A1	2,970547140000
A2	-0,286264054000
A3	0,008054205220
A4	2,808609490000
A5	-3,498033050000
A6	0,360373020000
A7	-0,010443241300
A8	-0,793385684000
A9	1,396433060000
A10	-0,149144925000
A11	0,004410155120
A12	0,083938717800
A13	-0,186408848000
A14	0,020336788100
A15	-0,000609579263

Fonte: (DA PAZ, 2011)

Aplicando as constantes na equação 45 podemos obter o fator $C(P_{pr}, T_{pr})$.

$$C(P_{pr}, T_{pr}) = A_0 + A_1 P_{pr} + A_2 P_{pr}^2 + A_3 P_{pr}^3 + T_{pr}(A_4 + A_5 P_{pr} + A_6 P_{pr}^2 + A_7 P_{pr}^3) + T_{pr}^2(A_8 + A_9 P_{pr} + A_{10} P_{pr}^2 + A_{11} P_{pr}^3) + T_{pr}^3(A_{12} + A_{13} P_{pr} + A_{14} P_{pr}^2 + A_{15} P_{pr}^3) \quad (45)$$

Por fim, alcançamos o valor da viscosidade do gás, em cp, pela equação 46.

$$\mu_g = \frac{\mu_{g1}}{T_{pr}} e^{[C(P_{pr}, T_{pr})]} \quad (46)$$

- Razão de solubilidade do gás no óleo

Salgado (2015) relata a possibilidade de utilizarmos o parâmetro D em conjunto com a correlação desenvolvida por Standing (1981) para o cálculo da razão de solubilidade do gás no óleo. Desta forma, a equação 47 deve ser utilizada.

$$R_{so} = \gamma_g \left[\left(\frac{P}{18,2} + 1,4 \right) 10^{0,0125API - 0,00091T} \right]^{1,2048} \quad (47)$$

- Fator volume-formação do óleo

A correlação de Standing (1981) (equação 48) permite a obtenção deste fator.

$$B_o = 0,9759 + 1,20 \times 10^{-4} \left(R_{so} \sqrt{\frac{\gamma_g}{\gamma_o}} + 1,25T \right)^{1,2} \quad (48)$$

- Fator volume-formação da água

Gould (1974) infere a resolução do fator volume-formação da água pela equação 49.

$$B_w = 1 + 1,2 \times 10^{-4}(T - 60) + 10^{-6}(T - 60)^2 - 3,33 \times 10^{-6}(P + 14,7) \quad (49)$$

- Velocidade superficial do líquido

Para esta variável foi utilizado a equação 19 descrita no item 4.3.1.

- Velocidade superficial do gás

A equação 20 apresentou problemas gerando valores negativos, ocasionando erros que impediam o funcionamento do simulador, obrigando o usuário a fechar o *software* e abri-lo novamente. Desta forma, foi necessário o uso da equação 50, proposta por Guo, Lyons e Ghalambor (2007), que atuou de forma eficiente, solucionando o problema de ocorrência de erros.

$$v_{sg} = \frac{(RGLQ_L)}{86400A} \left(\frac{14,7}{P} \right) \left(\frac{459,67+T}{519,67} \right) \left(\frac{Z}{1} \right) \quad (50)$$

Onde:

A: área da seção transversal do fluxo [ft²]

Para obtenção de A utilizou-se a equação 51.

$$A = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_i}{12} \right)^2 \quad (51)$$

A divisão por doze é utilizada para converter a unidade de polegada para pé.

- Velocidade média da mistura

Esta velocidade é dada pela soma da velocidade superficial do líquido e do gás, sendo utilizada para cálculo a equação 21.

- Massa específica do líquido

Obtida pela equação 17.

- Número adimensional de velocidade do gás e do líquido

Utilizou-se a equação 13 e 14, respectivamente.

A tensão superficial do líquido é definida pelo usuário.

- Número adimensional de diâmetro do tubo

O cálculo foi realizado de acordo com a equação 15.

- Número adimensional de viscosidade do líquido

Primeiramente, devemos calcular a viscosidade do líquido. Sob a ótica de Guo, Lyons e Ghalambor (2007), o valor desta viscosidade em cp pode ser definido pela equação 52.

$$\mu_L = \frac{(\mu_o Q_o + 0,5 Q_w)}{Q_L} \quad (52)$$

Em seguida, aplicamos a viscosidade do líquido na equação 16.

- Coeficiente do número de viscosidade

Devido ao fato de obter valores graficamente não ser funcional para a automatização dos cálculos pretendida pelo simulador, este coeficiente foi obtido por um ajuste da função da Figura 5, proposto por Guo, Lyons e Ghalambor (2007). Para isto, o autor definiu alguns parâmetros para o cálculo do coeficiente. Os parâmetros podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste para coeficiente do número de viscosidade

Constante	Valor
A1	-2,69851000
A2	0,15840954
A3	-0,55099756
A4	0,54784917
A5	-0,12194578

Fonte: (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007)

Os parâmetros podem ser aplicados na equação 53 para obtenção do coeficiente CN_L .

$$CN_L = 10^{A_1 + A_2(\log(N_L)+3) + A_3(\log(N_L)+3)^2 + A_4(\log(N_L)+3)^3 + A_5(\log(N_L)+3)^4} \quad (53)$$

- Fator de correlação para *holdup*

Utilizou-se a equação 22 para encontrar o valor deste fator.

- Fator de correlação secundário para *holdup*

Por meio da equação 23, obteve-se este fator de correção secundário.

- H_L/ψ

Como esta é outra variável obtida por meio de gráfico (FIGURA 6), novamente foi utilizada uma equação para ajuste da função, descrita por Guo, Lyons e Ghalambor

(2007), com finalidade de prezar pela automatização dos cálculos do simulador. A equação 54 foi proposta para ajuste da função.

$$\frac{H_L}{\psi} = A_1 + A_2(\log(\Phi) + 6) + A_3(\log(\Phi) + 6)^2 + A_4(\log(\Phi) + 6)^3 + A_5(\log(\Phi) + 6)^4 \quad (54)$$

Novamente é necessário o uso de parâmetros para a realização do cálculo da equação. Estes parâmetros estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste para H_L/ψ

Constante	Valor
A1	-0,10306578
A2	0,61777400
A3	-0,63294600
A4	0,29598000
A5	-0,04010000

Fonte: (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007)

- Fator de correção para *holdup*

Para o cálculo de Ψ foi utilizada mais uma equação de ajuste, também descrita por Guo, Lyons e Ghalambor (2007). Este fator de correção é obtido através do gráfico presente na Figura 7, entretanto, o uso da equação de ajuste apresentou resultado satisfatório. Para realização do cálculo é necessário obter previamente um índice, que irá ser nomeado de X neste trabalho, obtido com a equação 55.

$$X = (\Phi_s - 0,012)|(\Phi_s - 0,012)| \quad (55)$$

Desta maneira, podemos encontrar um fator de correlação secundário para *holdup* ajustado com a equação 56.

$$\Phi_s^* = \frac{(1-X)}{0,024} + \frac{(1+X)}{(2\Phi_s)} \quad (56)$$

Na tabela 4 estão presentes os valores dos parâmetros requeridos pela equação do fator de correção Ψ .

Tabela 4 - Parâmetros de ajuste para ψ

Constante	Valor
A1	0,91162574
A2	-4,82175636
A3	1232,25036621
A4	-22253,57617000
A5	116174,28125000

Fonte: (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007)

Consecutivamente, os parâmetros foram aplicados na equação 57 para cálculo do fator de correção.

$$\Psi = A_1 + A_2 \Phi_s^* + A_3 \Phi_s^{*2} + A_4 \Phi_s^{*3} + A_5 \Phi_s^{*4} \quad (57)$$

- *Holdup*

A equação 24 foi aplicada para obtenção deste fator.

- Viscosidade da mistura

Com os valores do holdup do líquido e as viscosidades do líquido e do gás, foi possível a resolução da equação 26.

- Massa total

Foi utilizada a equação 12 para obtenção desta variável. Sendo a razão água-óleo (RAO) obtida pela equação 58.

$$RAO = \frac{Q_w}{Q_o} \quad (58)$$

Onde:

Q_o : vazão de óleo [stb/d];

Q_w : vazão de água [stb/d].

- Número de Reynolds para duas fases

O número de Reynolds pode ser encontrado com a utilização da equação 25. Para isto, devemos converter a unidade do diâmetro interno de polegada para pé apenas dividindo o valor por doze.

- Fator de atrito

De acordo com Guo, Lyons e Ghalambor (2007), o fator de atrito pode ser obtido fazendo uso da equação 59.

$$f = \left(4 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7065} - \frac{5,0452}{NRe_{tp}} \log \left(\frac{\varepsilon^{1,1098}}{2,8257} + \left(\frac{7,149}{NRe_{tp}} \right)^{0,8981} \right) \right) \right)^{-2} \quad (59)$$

Guo, Lyons e Ghalambor (2007) orientam a utilização do valor de 0,0006 para a constante ε .

- Massa específica do gás

É determinada pela equação 18.

- Massa específica da mistura

Esta variável é obtida pela soma das massas específicas de líquido e de gás levando em consideração o fator *holdup* como demonstra a equação 11.

- Gradiente de pressão

Como já mencionado, o objetivo de criação desta planilha é a obtenção do gradiente de pressão pelo método desenvolvido por Hagedorn e Brown (1965). Este gradiente é dado pela equação 10. Com o gradiente do trecho analisado é possível a obtenção da pressão no ponto posterior, desta forma, o gradiente de pressão de todos os trechos da coluna de produção pode ser calculado.

5.1.3 Planilha “*Gas lift*”

A análise do sistema *gas lift* é realizada nesta planilha com o auxílio da correlação de Hagedorn e Brown (1965) inserida na planilha descrita anteriormente. Portanto, esta planilha tem a função do cálculo do ponto de operação do sistema na profundidade da válvula, RGL ótima para vazão do ponto de operação, vazão de gás de injeção para vazão ótima de produção, pressão na profundidade da válvula ocasionada pela injeção ótima de gás e a pressão de saída do compressor requerida pelo sistema.

O método utilizado para o cálculo destas variáveis é descrito nos tópicos a seguir.

- Ponto de operação

Para o cálculo do ponto de operação necessitamos traçar as curvas de *inflow* e *outflow performance* para profundidade da válvula operadora, como descrito no item 4.2.1.2.1. Deste modo, Guo, Lyons e Ghalambor (2007) nos propõem a utilização da equação 1 para traçar a curva de *inflow performance* e uma correlação de fluxo multifásico para a curva de *outflow*. O procedimento foi realizado da forma proposta, sendo escolhida a correlação de fluxo de Hagedorn e Brown (1965).

Primeiramente, foi utilizada a equação 60, desenvolvida por Vogel (1968), para prever a vazão máxima de produção.

$$Q_{max} = \frac{Q}{\left[1 - 0,2\left(\frac{P_{wf}}{P}\right) - 0,8\left(\frac{P_{wf}}{P}\right)^2\right]} \quad (60)$$

Onde:

P_{wf} : vazão de fluxo de fundo do poço [stb/d].

O valor da vazão é utilizado para delimitar as diferentes vazões analisadas. Para isto, são analisados onze valores de vazões, de zero até a vazão máxima, com o mesmo intervalo, para a construção gráfica da curva de *inflow performance*. Foi realizado o cálculo da pressão da tubulação na profundidade da válvula operadora, para cada um dos onze valores de vazão, utilizando a equação 1. Desta forma, a curva de *inflow performance* pôde ser gerada.

Em seguida, montou-se a curva de *outflow performance* utilizando os mesmos valores de vazão para construção da curva de *inflow performance*, excluindo somente o valor de vazão igual a zero, pois impossibilita a utilização da correlação de fluxo. Os valores de pressão da tubulação na profundidade da válvula operadora são obtidos com a correlação de fluxo multifásico, porém, é necessário também a aplicação da RGL ótima para cada vazão utilizada, desta forma, simula-se o resultado ocasionado pela injeção de gás.

A RGL ótima é a RGL que gera o menor valor de pressão na tubulação. Para o cálculo deste valor, foi utilizada a função “Solver” do Excel 2016. Esta função permite determinar o menor valor que uma célula ou variável pode alcançar ao se modificar o valor de uma outra célula ou variável, para isto, é necessário que uma seja dependente da outra. Deste modo, definindo a vazão desejada na correlação de fluxo, a função irá aplicar automaticamente vários valores de RGL e irá indicar o que ocasionou o valor mínimo de pressão na profundidade da válvula. Assim, aplicando este método para todos os valores de vazão desejados e achando seus devidos valores de RGL ótima basta utilizar as respectivas pressões na profundidade da válvula para determinação da curva de *outflow performance*.

O ponto de operação é o ponto de intersecção das curvas de *inflow e outflow performance* em um gráfico de pressão por vazão. Isto significa que existe um valor de vazão que iguala a pressão calculada pela equação 1 e a calculada pela correlação de fluxo multifásico. Deste modo, foi utilizada a função “Atingir meta” para indicar o valor de vazão que igualasse as duas pressões. Porém, não possível aplicar o valor de RGL ótima a cada vazão testado. Para corrigir este problema foi calculado a RGL ótima do valor de vazão obtido e foi definido esse novo valor de RGL ótima para um novo cálculo da vazão no ponto de operação. Este processo foi repetido cinco vezes para maior aproximação do resultado real. Por fim, obtém-se a vazão no ponto de operação.

- RGL ótima para vazão do ponto de operação

Com a vazão do ponto de operação definida é aplicado novamente a função “Solver” para encontrar o valor de RGL que ocasiona a menor pressão na tubulação na profundidade da válvula operadora. Desta forma, a função indica o valor da RGL ótima.

- Vazão ótima de injeção de gás

Primeiramente, a equação 2 permite o cálculo da RGL de injeção. Onde, a RGL ótima no ponto de operação foi obtida com a metodologia descrita anteriormente e o RGL de formação é RGL mínimo definido pelo usuário. Após isto, é realizado o cálculo da vazão ótima de injeção utilizando a equação 3.

- Pressão de saída do compressor

Inicialmente, é calculada a pressão do *casing* na profundidade da válvula operadora por meio da equação 8, onde, a pressão da tubulação na profundidade da válvula operadora é a obtida ao se aplicar a RGL ótima para a vazão do ponto de operação, e para diferencial de pressão no orifício da válvula é definido pelo usuário.

Após obtida a pressão do *casing* na profundidade da válvula, podemos relacioná-la com a pressão do *casing* próximo à superfície com a equação 7. Exceto o fator de compressibilidade médio do gás no espaço anular, todas as outras variáveis para resolução da equação são definidas pelo usuário. Entretanto, o fator de compressibilidade requer o uso de cálculo iterativo para ser encontrado. Desta maneira, utilizou-se novamente o método de Beggs e Brill (1974) já descrito no item 5.1.2 e a função “Atingir meta” para a realizar a iteração por meio de macro. O chute inicial escolhido foi o valor de 0,9 e algumas repetições da função resultou na obtenção do valor de Z e da $P_{c,v}$.

Negligenciando a perda de pressão entre o *choke* de injeção e o *casing* próximo a superfície, temos a equação 61.

$$P_{dn} = P_{c,v} \quad (61)$$

Deste modo, assumindo o fluxo crítico no *choque* de injeção podemos rearranjar equação 6 para a equação 62.

$$P_{up} = 1,82P_{c,v} \quad (62)$$

Para o cálculo da pressão na linha de distribuição de gás (equação 5), utiliza-se a vazão ótima de gás de injeção e a pressão *upstream*, ambas foram previamente calculadas. As outras variáveis também são definidas pelo usuário, exceto, o fator de

compressibilidade médio do gás na linha de distribuição. Este fator também requer chute inicial e cálculo iterativo, deste modo, foi obtido de maneira semelhante ao fator de compressibilidade anterior.

A obtenção da pressão de saída do compressor requerida pelo sistema é realizada com o uso do fator de segurança definido pelo usuário e a pressão na linha de distribuição na equação 4.

Os códigos de programação utilizados para o uso das funções “Solver” e “Atingir meta”, assim como, o cálculo iterativo dos fatores de compressibilidade desta planilha estão descritos no Apêndice A deste trabalho.

5.1.4 Planilha “Análise de profundidade”

Esta planilha apresenta uma tabela com os resultados de vazão de produção, vazão de gás de injeção, RGL ótima e a pressão na profundidade da válvula operadora, todas estas calculadas no ponto de operação. Para isto foi criada uma macro com o intuito de executar a simulação para dez profundidades de válvula operadora diferentes e inserir os valores das principais variáveis obtidas em uma única tabela. Outra macro analisa para quais profundidades não foram encontrados os respectivos pontos de operação e sugere a profundidade mais indicada para a válvula. Uma terceira macro permite a utilização rápida desta profundidade em uma simulação completa, possibilitando a visualização de todos os resultados do simulador. A Figura 9 mostra a interface desta planilha.

Consultando o Apêndice A é possível verificar os códigos de programação utilizados pelas macros descritas anteriormente.

Figura 9 – Interface da planilha “Análise de Profundidade”

TABELA DE ANÁLISE DE PROFUNDIDADE DA VÁLVULA OPERADORA					
	PROFUNDIDADE (ft)	Q (OP) (stb/d)	Q _{ing} (scf/d)	RGLopt (scf/stb)	Pt,v (OP) (psia)
D1					
D2					
D3					
D4					
D5					
D6					
D7					
D8					
D9					
D10					

SIMULAR

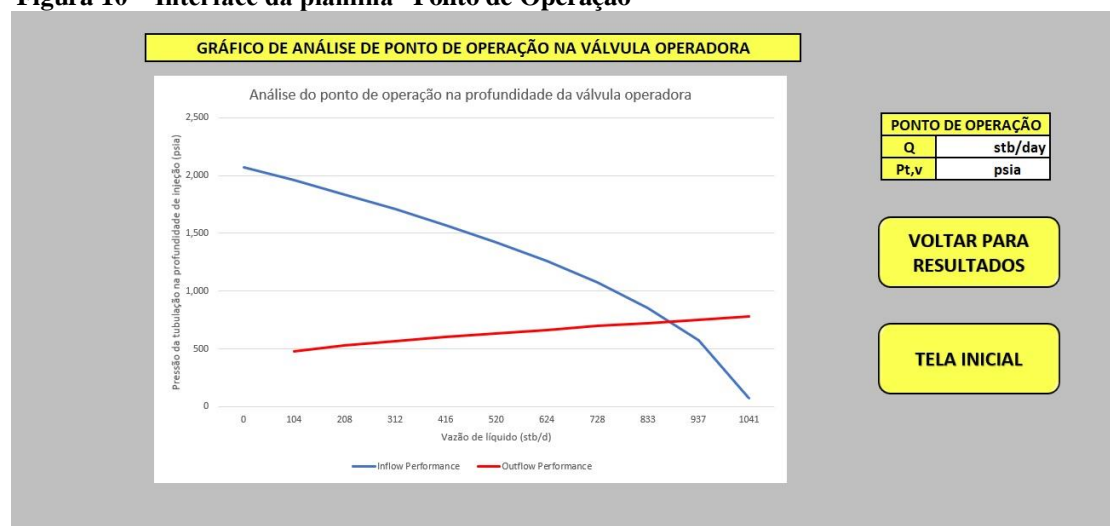
TELA INICIAL

Fonte: (DO AUTOR, 2018)

5.1.5 Planilha “Ponto de operação”

Esta planilha foi criada para exposição do gráfico de pressão da tubulação na profundidade de injeção pela vazão de líquido (FIGURA 10). Os valores das curvas de *inflow* e *outflow performance* são atualizados automaticamente com o início da simulação e os valores de vazão e pressão de tubulação do ponto de operação também são expostos.

Figura 10 – Interface da planilha “Ponto de Operação”

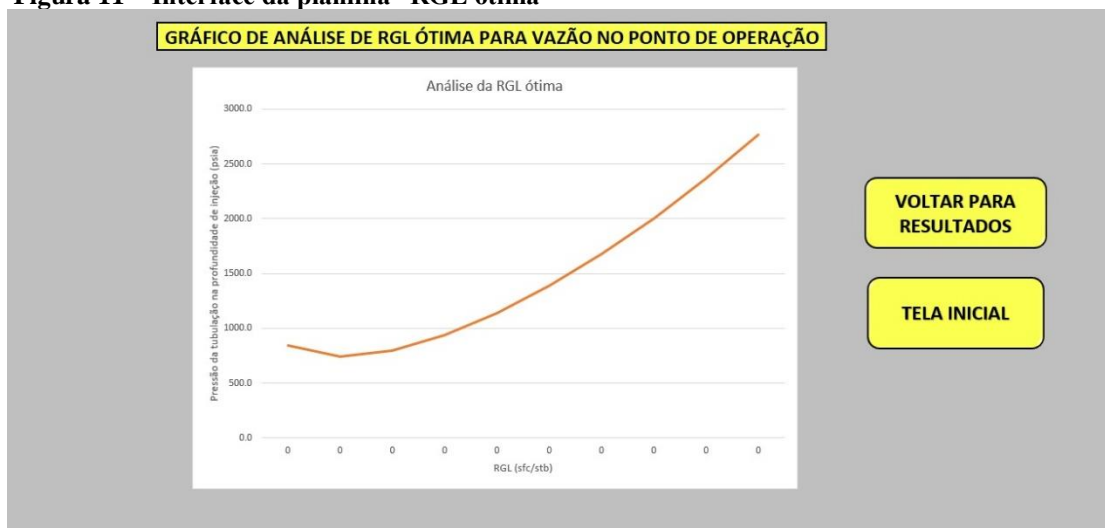


Fonte: (DO AUTOR, 2018)

5.1.6 Planilha “RGL ótima”

Do mesmo modo que a planilha do item anterior, esta planilha tem como objetivo a visualização do gráfico de pressão da tubulação no ponto de injeção pela RGL para que o usuário possa visualizar graficamente a RGL ótima para a vazão de líquido no ponto de operação. Para isto, foi criada uma macro para aplicação de diferentes valores de RGL para a vazão do ponto de operação, permitindo a visualização do comportamento da pressão de acordo com a variação da razão gás-líquido. O código desta macro também foi exposto no Apêndice A. A interface desta planilha pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – Interface da planilha “RGL ótima”

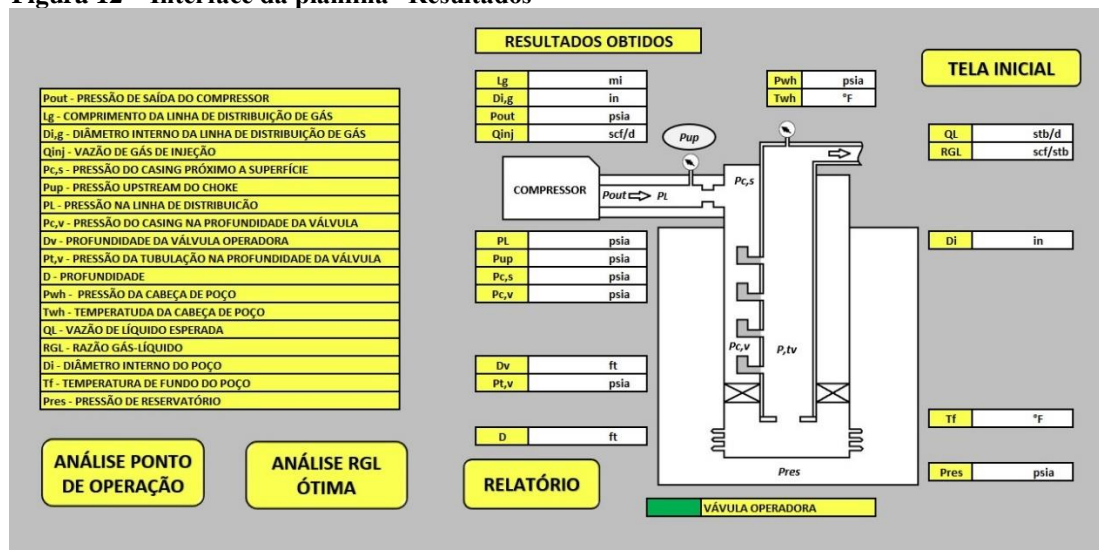


Fonte: (DO AUTOR, 2018)

5.1.7 Planilha “Resultados”

Esta planilha foi criada visando permitir a visualização dos resultados obtidos pelo simulador de forma clara. Uma interface para exposição das variáveis calculadas pelo simulador foi criada permitindo uma análise mais completa pelo usuário. Para melhor visualização da atuação dessas variáveis, foi inserida a imagem de um poço com sistema *gas lift* onde foi feita a indicação da localização das pressões obtidas. A Figura 12 permite a visualização da interface da planilha de resultados.

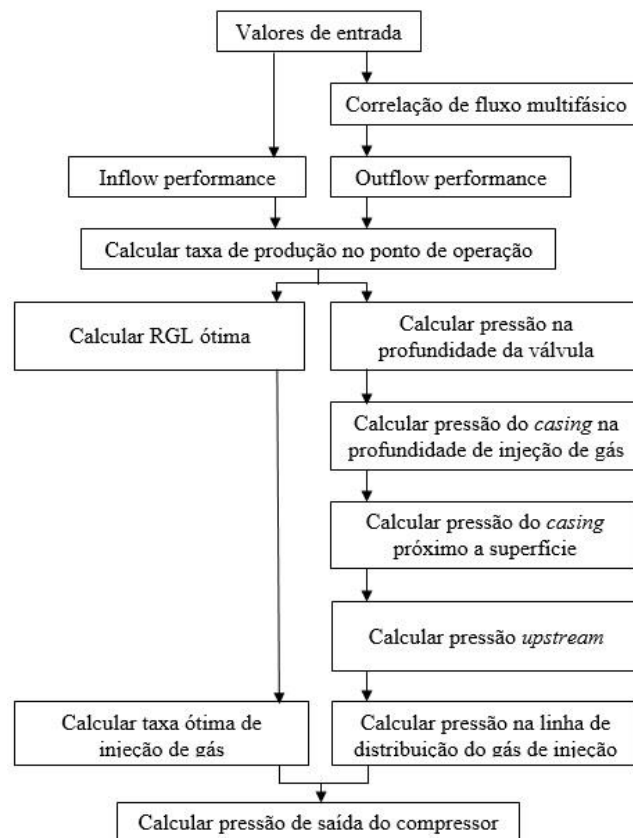
Figura 12 – Interface da planilha “Resultados”



Fonte: (DO AUTOR, 2018)

Na Figura 13 podemos visualizar um diagrama simplificado com todos os cálculos realizados para a obtenção dos resultados de uma simulação realizada pelo simulador.

Figura 13 – Interface da planilha “Tela Inicial”



Fonte: (DO AUTOR, 2018)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram inseridos os valores de entrada apresentados na Tabela 5, na planilha “Tela inicial”, para obtenção dos resultados da simulação. Estes valores são de um poço fictício, baseado em um exercício proposto por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) (*Example Problem 13.1*, p. 184).

Tabela 5 – Valores de entrada

Variáveis de entrada	Valor	Unidade
Profundidade	5200	ft
Profundidade da válvula	5000	ft
Pressão de reservatório	2000	psia
Pressão de cabeça de poço	200	psia
Temperatura de cabeça	90	°F
Temperatura de fundo	175	°F
Diâmetro interno do tubo	2,259	in
Grau API do óleo	36	°API
Viscosidade do óleo	2	cp
Vazão de líquido	800	stb/d
Corte de água	5	%
Tensão superficial do líquido	30	dyn/cm
Gravidade específica da água	1,05	-----
Gravidade específica do gás	0,64	-----
Fração de contaminantes do óleo - CO ₂	0	%
Fração de contaminantes do óleo - H ₂ S	0	%
Fração de contaminantes do óleo - N ₂	0	%
Razão gás-líquido mínima	300	scf/stb
Razão gás-líquido máxima	5000	scf/stb
Comprimento da linha de distribuição	1	mi
Diâmetro interno da linha de distribuição	1,5	in
Temperatura de superfície	70	°F
Pressão na base	14,7	psia
Temperatura na base	60	°F
Diferencial de pressão da válvula	100	psia
Fator de segurança de pressão	1,1	-----
Gravidade específica do gás de injeção	0,64	-----
Fração de contaminantes do gás de injeção - CO ₂	0	%
Fração de contaminantes do gás de injeção - H ₂ S	0	%
Fração de contaminantes do gás de injeção - N ₂	0	%

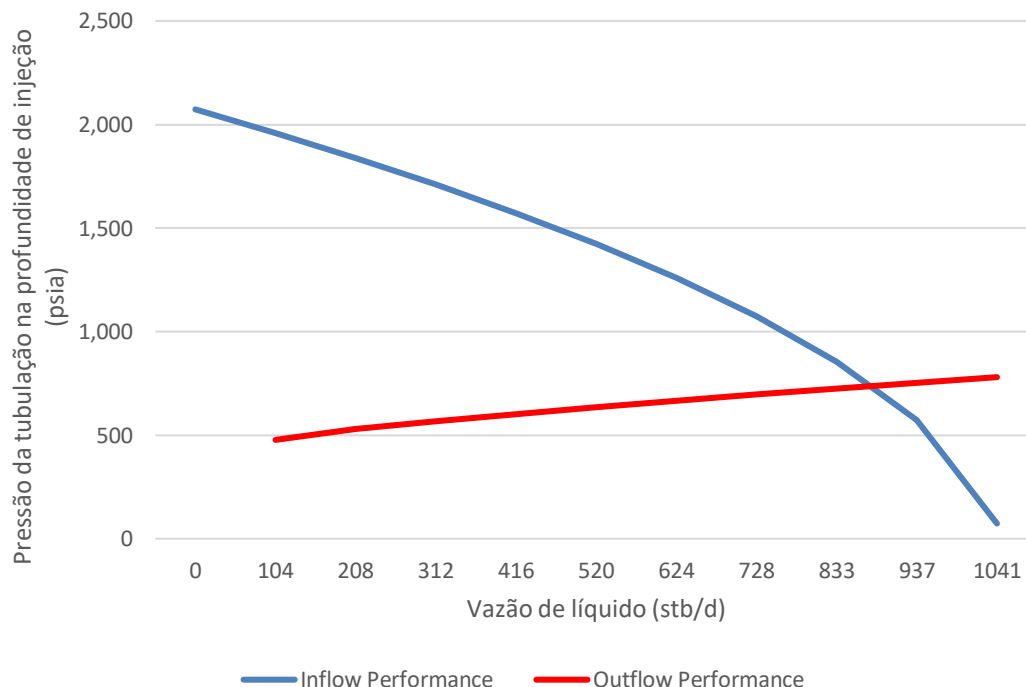
Fonte: (DO AUTOR, 2018)

As variáveis de maior importância para análise da aplicação do método *gas lift* contínuo calculadas por este simulador são:

- Vazão líquida de produção no ponto de operação;
- RGL ótima para vazão líquida no ponto de operação;
- Pressão da tubulação na profundidade da válvula;
- Vazão de injeção de gás ótima;
- Pressão de saída do compressor requerida pelo sistema.

A vazão líquida de produção obtida para esta configuração de sistema foi de 879,519 stb/d. Comparando este valor com a análise gráfica proposta por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) (GRÁFICO 1) para o ponto de operação, podemos verificar que o valor gerado pelo simulador está localizado no ponto de interseção das curvas. Isto se deve a precisão das funções “Atingir meta” e “Solver” do Excel 2016 e também, a metodologia utilizada onde foi realizado o cálculo repetidas vezes, para maior aproximação do valor real.

Gráfico 1 - Análise do ponto de operação na profundidade da válvula operadora

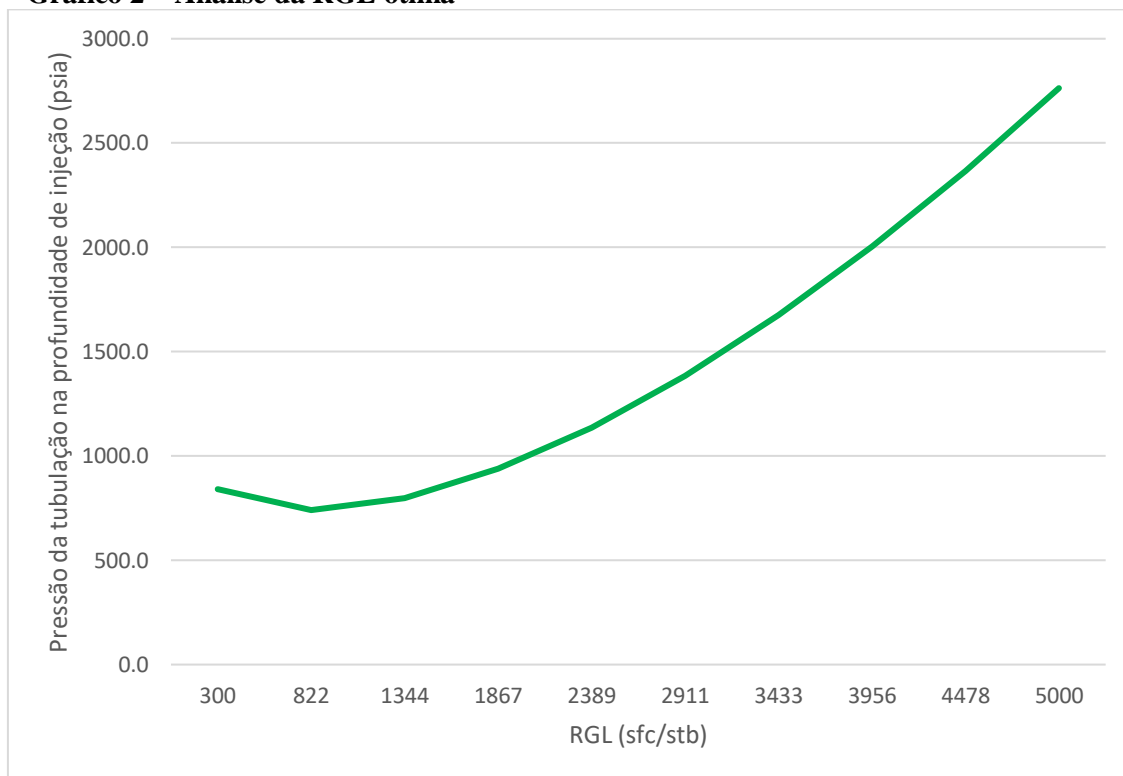


Fonte: (DO AUTOR, 2018)

O valor da razão gás-líquido ótima para o ponto de operação foi de 931,957 scf/stb. Para análise do resultado, também foi realizada a comparação com o valor

obtido seguindo o procedimento utilizado por Guo, Lyons e Ghalambor (2007), onde o gráfico obtido de RGL pela pressão na tubulação é apresentada no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Análise da RGL ótima



Fonte: (DO AUTOR, 2018)

No Gráfico 2 podemos visualizar pela análise da curva do gráfico, que o valor gerado pelo simulador apresenta bom grau de confiabilidade, pois o mesmo encontra-se no ponto mínimo de pressão da curva. Entretanto, o valor obtido pelo simulador apresenta maior precisão devido o gráfico ser gerado com uma amostragem limitada de valores de RGL. O valor 737,942 psia para pressão na tubulação apresentado pelo simulador também apresenta boa confiabilidade, pois é o valor relativo a RGL ótima apresentado no gráfico.

Para o cálculo da vazão de gás de injeção requerida pelo sistema é utilizado cálculo simples baseado na literatura revisada. Desta forma, o valor apresentado pelo simulador de 555818,40 scf/d é o mesmo encontrado utilizando o cálculo indicado por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) para RGL e vazão líquida proposta pelo simulador.

Como todos estes cálculos apresentados até o momento foram baseados na correlação de fluxo vertical multifásico proposta por Hagedorn e Brown (1965), as limitações desta correlação apresentadas no item 4.3.1 podem interferir no gradiente de

pressão na tubulação e com isto, alterar a confiabilidade dos resultados. Porém, a correlação utilizada demonstrou boa performance para o sistema estudado, devido aos valores de entrada como diâmetro interno, grau API e razão gás líquido estarem dentro dos indicados para a correlação.

O valor de pressão de saída do compressor está apresentado na tabela 6 junto ao valor obtido com a planilha de cálculo de pressão de saída do compressor disponibilizada por Guo, Lyons e Ghalambor (2007).

Tabela 6 – Comparação dos valores de pressão de saída do compressor

Pressão de saída do compressor (psia)		Erro
Simulador	Literatura	
1530,115	1514,057	0,0106

Fonte: (DO AUTOR, 2018)

Deste modo, o resultado obtido pelo simulador apresenta uma boa precisão em comparação com os resultados gerado por Guo, Lyons e Ghalambor (2007). O erro presente no cálculo pode ter sido causado devido a planilha de Guo, Lyons e Ghalambor (2007) utilizar outro método para determinação do fator de compressibilidade, assim como, o arredondamento de vários valores durante as etapas de cálculos.

Com a análise de profundidade é obtida a Tabela 7. Esta função do simulador utiliza a simulação rápida de vários valores de profundidade para análise da influência da profundidade da válvula operadora nos resultados obtidos.

Tabela 7 – Ponto de operação para diferentes profundidades de válvula operadora

Produndidade (ft)	Q (stb/d)	Qing (scf/d)	RGL (scf/stb)	Pt,v (psia)
520	1053,695	-33085,687	268,600	281,178
1040	1053,695	93148,498	388,402	346,141
1560	1053,695	186435,938	476,935	407,263
2080	1053,695	262292,299	548,926	466,335
2600	1053,695	326825,370	610,171	524,131
3120	1052,673	383486,346	664,298	580,902
3640	1033,324	438760,373	724,611	633,475
4160	990,913	494355,399	798,889	679,636
4680	927,698	541985,816	884,227	718,255
5000	879,519	555818,403	931,957	737,942

Fonte: (DO AUTOR, 2018)

O simulador também faz uma pequena análise e indica as profundidades onde não foi possível o cálculo do ponto de operação e a melhor profundidade para válvula operadora. A melhor profundidade indicada pelo simulador é a menor profundidade que apresenta ponto de operação, devido ao fato dela requerer uma menor vazão de gás de injeção e uma menor pressão de saída do compressor, o que resulta em um menor custo de operação. No caso analisado, o simulador indica a profundidade de 1340 ft. A análise desta indicação pode ser realizada com base na vazão máxima do poço. Utilizando o modelo de Vogel (1968) obtém-se o valor de 1040.68 stb/d. Comparando este valor com os valores de vazão relativos as profundidades acima da indicada, pode-se concluir que as vazões relativas a elas não estão corretas, pois elas não poderiam ter um valor maior do que a vazão máxima. Isto ocorre pelo fato do simulador não conseguir calcular o ponto de operação para esta configuração. Para não gerar dúvidas, o simulador também sinaliza que não foi possível realizar os cálculos do ponto de operação para as profundidades acima da indicada.

7 CONCLUSÃO

Com a construção do simulador foi possível analisar de forma mais fácil e clara as principais variáveis que influenciam na aplicação do método de elevação artificial *gas lift* contínuo, assim como as limitações para a realização dos cálculos e a dificuldade para automação dos mesmos. A verificação do ponto de operação pôde ser realizada para ampla faixa de profundidade do ponto de injeção, porém, apresentou algumas limitações, não conseguindo ser realizada para profundidades de válvula operadora pequenas em relação a profundidade total do poço. O simulador apresentou uma boa confiabilidade e eficiência nos cálculos das variáveis almejadas, alcançando o objetivo de calcular estes parâmetros. Entretanto, os cálculos estão sujeitos as mesmas limitações encontradas para verificação do ponto de operação.

Como os cálculos são realizados de forma automática após o comando do usuário, não é necessário grande conhecimento do *software* utilizado e a utilização do simulador se dá de forma simples e intuitiva.

As limitações do simulador estão relacionadas com as limitações da correlação de fluxo vertical utilizada e a utilização de pequena profundidade de válvula operadora. A correlação de fluxo apresenta resultados menos precisos para utilização de valores de algumas variáveis fora da faixa de valores indicados para a correlação. Estas faixas de valores foram apresentadas anteriormente (item 5.1.2). Como a correlação foi desenvolvida para poços verticais, isto limita o simulador para estes tipos de poços. Em relação a limitação da profundidade de válvula operadora, o simulador não consegue calcular o ponto de operação para pequenas profundidades em relação a comprimento total do poço, devido a equação utilizada para obtenção da *inflow performance* negligenciar a perda de pressão por fricção abaixo do ponto de injeção. Isto resulta em um aumento do erro no cálculo da pressão de acordo com o aumento da distância do ponto de injeção em relação ao fundo do poço. Devido a isto, o simulador é indicado para valores de profundidade da válvula operadora próximos a profundidade total do poço.

Em relação aos erros do *software*, o simulador apresentou um bom rendimento. Erros comuns no Excel 2016 como erro de número ou de divisão foram apresentados poucas vezes pelo simulador. Outro ponto positivo foi o fato do simulador não causar a

interrupção da aplicação do *software* mesmo ao realizar os comandos de códigos mais extensos. A utilização do Excel 2016 como plataforma tornou o simulador mais acessível, pois o Excel é um *software* amplamente utilizado.

A implementação de novos recursos em trabalhos futuros poderia aumentar o desempenho e funcionalidade do simulador desenvolvido. Inserir outras correlações de fluxo multifásico poderia permitir a escolha da correlação que mais se adequa ao sistema proposto. Outra possibilidade seria a introdução de cálculos para análise de outros métodos de elevação artificial para comparação de resultados e verificação do método que apresenta melhor rendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRILL, J.P.; BEGGS, H.D. **Two-phase flow in pipes**. INTERCOMP Course, The Hague, 1974.

CARR, N.L.; KOBAYASHI, R.; BURROWS, D.B. **Viscosity of hydrocarbon gases under pressure**. Trans. AIME 1954; 201:264–272.

DA PAZ, E. F. **Sistema baseado em medidor de pressão diferencial para determinação em linha de vazões de produção em poços de petróleo**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

DE OLIVEIRA, K. C. B. **Estudo de um poço fictício no ambiente pipesim utilizando o método de gas lift**. Trabalho de Conclusão de curso. Manaus: UFAM, 2017.

DEMPSEY, J.R. **Computer routine treats gas viscosity as a variable**. Oil Gas and Journal, Agosto, 1965.

DUNS, J. H.; ROS, N. C. J. **Vertical flow of gas and liquid mixtures in wells**. Proc. Sixth. World Pet. Congress, 1963.

GÓIS JÚNIOR, J. M. de. **Avaliação do desempenho de um sistema de gas lift contínuo**. Projeto de graduação. Natal: UFRN, 2014.

GOULD, T.L. **Discussion of an evaluation of critical multiphase flow performance through wellhead chokes**. J. Petroleum Technol. 1974;26(Agosto):849–850.

GUO, B.; LYONS, W. C.; GHALAMBOR, A. **Petroleum production engineering: a computer-assisted approach**. Oxford: Elsevier, 2007.

HAGEDORN, A. R.; BROWN, K. E. **The effect of liquid viscosity on two-phase flow**. Journal of Petroleum Technology, p. 203–210, 1964.

LYONS, W. C.; PLISGA, Gary J. **Standard handbook of petroleum and natural gas engineering**. 2. ed. Elsevier, 2005.

PLUCENIO, A. **Automação da produção de poços de petróleo operando com elevação artificial por injeção contínua de gás**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 2003.

RIZZO FILHO, H dos S. **A otimização de gás lift na produção de petróleo: Avaliação da curva de performance do poço**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

SALGADO, J. P. C. **Utilização da correlação de Beggs & Brill para análises de otimização de produção**. Trabalho de Conclusão de Curso. Manaus: UFAM, 2015.

SPÍNDOLA, R. B. **Controle automático para injeção otimizada de gás em poços de petróleo equipados para funcionamento com gás lift contínuo.** Dissertação de Mestrado. Natal: UFRN, 2003.

STANDING, M. B. **Volumetric and phase behavior of oil field hydrocarbon systems.** Dallas, TX, USA, SPE of AIME, 1951; 9ª edição, 1981.

TAKÁCS, G. **Gas lift manual.** Tulsa: PennWell, 2005.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

VOGEL, J.V. **Inflow performance relationships for solution-gas drive wells.** J. Petroleum Technol. 1968; Jan.:83–92.

WEYMOUTH, T.R. **Problems in natural gas engineering.** Trans. ASME, 1912

APÊNDICE A – Macros Utilizadas

- Macro para realizar a simulação:

Sub Calcular()

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Gás Lift").Range("B5") = Sheets("Gás Lift").Range("B10").Value 'Qmax

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("D2").Value

'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("D2").Value

'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Call Pressao_Compressor

Call Restaurar_Variaveis

Call Resultados

Call Erro_PO

End Sub

- Macro para cálculo da curva de outflow performance:

Sub Pressão_de_Saída()

'Calculo Pressão de Saída

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H3").Value

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1

Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate

SolverReset

SolverOptions Precision:=0.000001

```

SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J3") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H4").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J4") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H5").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J5") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H6").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J6") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H7").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate

```

```

SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J7") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H8").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J8") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás Lift").Range("H9").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J9") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás
Lift").Range("H10").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J10") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value

```

```

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás
Lift").Range("H11").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J11") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás
Lift").Range("H12").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("J12") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value

End Sub

```

- Macro para encontrar o ponto de operação:

```
Sub PontoO()
```

```

'Calculo no Ponto de Operação de Ql e Pt,v
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10").Value = 1
Sheets("Gás Lift").Range("K15").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10")
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset

```

```

SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10").Value = 1
Sheets("Gás Lift").Range("K15").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10")
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10").Value = 1
Sheets("Gás Lift").Range("K15").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10")
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10").Value = 1
Sheets("Gás Lift").Range("K15").GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10")
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True

```



```

Sheets("Gás Lift").Range("B11") =
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10").Value

```

```

End Sub

```

- Macro para cálculo de razão gás-líquido ótima:

```

Sub Solver_RGLopto()

```

```

    'Gráfico para RGLopt,o
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás
Lift").Range("B11").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L2").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M2") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L3").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M3") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L4").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M4") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L5").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M5") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L6").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M6") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L7").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M7") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L8").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M8") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value

```

```

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L9").Value
Sheets("Gás Lift").Range("M9") = Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L10").Value
Sheets("Gás Lift").Range("M10") =
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = Sheets("Gás
Lift").Range("L11").Value
Sheets("Gás Lift").Range("M11") =
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value

```

```

' Cálculo da RGLopt,o
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value = 1
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10") = Sheets("Gás
Lift").Range("B11").Value
Worksheets("Hagedorn&Brown").Activate
SolverReset
SolverOptions Precision:=0.000001
SolverOk SetCell:="$H$31", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$21",
Engine _:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve True
Sheets("Gás Lift").Range("B13") =
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Value
Sheets("Gás Lift").Range("B12") =
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("H31").Value
Sheets("Gás Lift").Range("B39") =
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("G31").Value

End Sub

```

- Macro para cálculo da pressão de saída do compressor:

```

Sub Pressao_Compressor()

```

Call CalculoPcs

Call CalculoPl

End Sub

- Macro para cálculo da pressão no *casing* próximo a superfície:

Sub CalculoPcs()

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = 0.9

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G36")

```

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G36")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G36")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S41").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G36")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R41").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T37").Value

```

End Sub

- Macro para cálculo da pressão na linha de distribuição de gás:

Sub CalculoPl()

```

Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = 0.9

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G38")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G38")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G38")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G38")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás
Lift").Range("G38")

```

```

Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value

```

```
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G38")
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G38")
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G38")
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G38")
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G38")
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
Sheets("Gás Lift").Range("S44").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Sheets("Gás Lift").Range("G38")
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("R44").Value = Sheets("Gás Lift").Range("T36").Value
```

```
End Sub
```

- Macro para restaurar as variáveis para condição inicial:

```
Sub Restaurar_Variaveis()
```

```
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B10").Formula = Sheets("Gás Lift").Range("B4").Formula
```

```
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2").Formula = Sheets("Gás Lift").Range("B1").Formula
```

```
Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B21").Formula = Sheets("Gás Lift").Range("B8").Formula
```

```
End Sub
```

- Macro para informar o usuário quando ponto de operação não pode ser encontrado:

Sub Erro_PO()

```

    If Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value > Sheets("Gás Lift").Range("B5").Value
    Or Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value < Sheets("Gás Lift").Range("H3").Value
    Then
        Call Tela_Inicial
        MsgBox "Não foi possível encontrar ponto de operação para os dados informados."
    End If
End Sub

```

- Macro para realizar a simulação para vários valores de profundidade:

Sub Analise_Profundidade()

```

    Call Restaurar_Variaveis
    Sheets("Gás Lift").Range("B5") = Sheets("Gás Lift").Range("B10").Value 'Qmax
    Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I19").Value
    'Profundidade
    Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I19").Value
    'Profundidade
    Call Pressão_de_Saída
    Call PontoO
    Call Solver_RGLopto
    Sheets("Gás Lift").Range("J19") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("K19") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("L19") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value
    Sheets("Gás Lift").Range("M19") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value
    Call Restaurar_Variaveis

    Call Restaurar_Variaveis

```

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I20").Value
 'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I20").Value
 'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J20") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K20") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L20") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M20") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I21").Value
 'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I21").Value
 'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J21") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K21") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L21") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M21") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I22").Value
 'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I22").Value
 'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J22") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K22") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L22") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M22") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I23").Value

'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I23").Value

'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J23") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K23") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L23") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M23") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I24").Value

'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I24").Value

'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J24") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K24") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L24") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M24") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I25").Value

'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I25").Value

'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J25") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K25") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L25") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M25") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I26").Value

'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I26").Value

'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J26") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K26") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L26") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M26") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I27").Value

'Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I27").Value

'Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J27") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K27") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L27") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M27") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Restaurar_Variaveis

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I28").Value

Profundidade

Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Range("I28").Value

Profundidade

Call Pressão_de_Saída

Call PontoO

Call Solver_RGLopto

Sheets("Gás Lift").Range("J28") = Sheets("Gás Lift").Range("B11").Value

Sheets("Gás Lift").Range("K28") = Sheets("Gás Lift").Range("B14").Value

Sheets("Gás Lift").Range("L28") = Sheets("Gás Lift").Range("B13").Value

Sheets("Gás Lift").Range("M28") = Sheets("Gás Lift").Range("B12").Value

Call Restaurar_Variaveis

Call Escolher_Profundidade

Worksheets("Análise de Profundidade").Activate

ActiveSheet.Range("A1").Select

End Sub

- Macro para mudar tela para planilha “Tela inicial”:

Sub Tela_Inicial()

Worksheets("Tela Inicial").Activate

```
ActiveSheet.Range("C4").Select
```

```
End Sub
```

- Macro para indicar a melhor profundidade:

```
Sub Escolher_Profundidade()
```

```
Dim nlin
```

```
nlin = 5
```

```
Do While nlin < 15
```

```
    If Sheets("Análise de Profundidade").Cells(nlin, 5).Value < Sheets("Análise de
    Profundidade").Range("C43").Value And Sheets("Análise de Profundidade").Cells(nlin,
    5).Value > Sheets("Análise de Profundidade").Range("C44").Value Then
```

```
        Sheets("Análise de Profundidade").Range("E43").Value = nlin
```

```
        nlin = 15
```

```
    End If
```

```
nlin = nlin + 1
```

```
Loop
```

```
End Sub
```

- Macro para simular com a profundidade indicada pelo simulador:

```
Sub Simular_Profundidade()
```

```
Call Restaurar_Variaveis
```

```
Dim prof
```

```
prof = Sheets("Análise de Profundidade").Range("E43").Value + 14
```

```
Sheets("Gás Lift").Range("B5") = Sheets("Gás Lift").Range("B10").Value 'Qmax
```

```

Sheets("Hagedorn&Brown").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Cells(prof, 9).Value
'Profundidade
    Sheets("Gás Lift").Range("B2") = Sheets("Gás Lift").Cells(prof, 9).Value
'Profundidade
    Call Pressão_de_Saída
    Call PontoO
    Call Solver_RGLopto
    Call Pressao_Compressor
    Call Restaurar_Variaveis
    Call Resultados
    Call Erro_PO

End Sub

```

- Macro para mudar tela para planilha de análise da RGL ótima:

```

Sub Visualizar_RGLopt()

    Worksheets("Análise de RGL Ótima").Activate
    ActiveSheet.Range("A1").Select

End Sub

```

- Macro para mudar tela para planilha de resultados

```

Sub Resultados()

    Worksheets("Resultados").Activate
    ActiveSheet.Range("A1").Select

End Sub

```

- Macro para mudar tela para planilha de análise do ponto de operação:

```
Sub Visualizar_OP()
```

```
Worksheets("Ponto de Operação").Activate
```

```
ActiveSheet.Range("A1").Select
```

```
End Sub
```