



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA – CCET

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE

PETRÓLEO - PPGCEP



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**GERENCIAMENTO DA ABERTURA DO *CHOKE* DE INJEÇÃO
DE GÁS NO MÉTODO *GAS-LIFT* CONTÍNUO USANDO
CONTROLADORES *FUZZY***

Harlene Cristina Ambrósio Gomes Soares

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

Co-orientadora: Prof^ª Dra Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Natal / RN, Fevereiro de 2019

**Gerenciamento da Abertura do *Choke* de Injeção de Gás no Método
Gas-Lift Contínuo Usando Controladores *Fuzzy***

Harlene Cristina Ambrósio Gomes Soares

Natal / RN, Fevereiro de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Soares, Harlene Cristina Ambrósio Gomes.

Gerenciamento da Abertura do Choke de Injeção de Gás no Método Gas-Lift Contínuo Usando Controladores Fuzzy / Harlene Cristina Ambrósio Gomes Soares. - 2019.
57 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli.

Coorientador: Profa. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli.

1. Gas-Lift Contínuo - Dissertação. 2. Controlador PI-fuzzy - Dissertação. 3. Choke - Dissertação. I. Maitelli, André Laurindo. II. Maitelli, Carla Wilza Souza de Paula. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 622.276.05

Harlene Cristina Ambrósio Gomes Soares

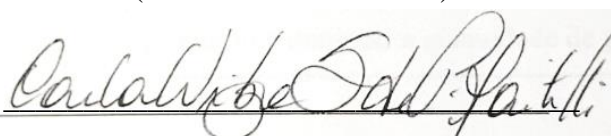
**Gerenciamento da Abertura do *Choke* de Injeção de Gás no Método *Gas-Lift*
Contínuo Usando Controladores *Fuzzy***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo PPGCEP, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Petróleo.

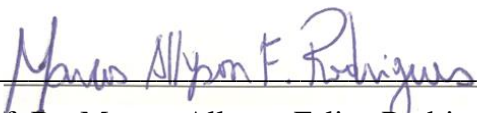
Aprovado em 22 de fevereiro de 2019.




Prof. Dr. André Laurindo Maitelli
(Orientador / Presidente)



Profª Dra Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
(Membro Interno ao PPGCEP)



Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues
(Membro Externo ao PPGCEP)



Eng. Fábio Soares Lima
(Membro Externo à UFRN)

SOARES, Harlene Cristina Ambrósio Gomes - Gerenciamento da Abertura do *Choke* de Injeção de Gás no Método *Gas-Lift* Contínuo Usando Controladores *Fuzzy*. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo. Linha de Pesquisa: Automação na Indústria de Petróleo e Gás Natural, Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

Co-orientadora: Prof^a Dra Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

RESUMO

Quando poços surgentes não possuem mais energia suficiente para elevar os fluidos do reservatório para a superfície, são utilizados os métodos de elevação artificial. Sistemas de elevação por *Gas-Lift* Contínuo são utilizados em poços terrestres e marítimos, devido a sua robustez, simplicidade e capacidade de operar a larga faixa de vazão. Esse método consiste na injeção contínua de gás em um determinado ponto da coluna de produção, fazendo com que a pressão de fluxo no fundo do poço diminua e a vazão de produção aumente. Com o intuito de manter o poço operando por *Gas-Lift* nas condições ótimas de operação, controladores eletrônicos têm sido utilizados para realizar ajustes em alguns parâmetros e assim otimizar a injeção de gás. Neste trabalho, desenvolveu-se um controlador PI-*fuzzy* para gerenciar a abertura do *choke* de injeção de gás no método *Gas-Lift* Contínuo com o objetivo de aumentar a vazão de produção, tendo seu início de atuação após a operação de descarga do poço. Para validar o controle, integrou-o ao código de um *software* de simulação dinâmica para poços operando por GLC, o *TraceLiftLaut*, e testou-se a ferramenta com dados de campo. Com isso, foi possível a realização de três testes, cada um com os valores dos limites da pressão de revestimento diferentes, e verificou-se que o controle se mostrou eficiente ao aumentar a vazão de produção e diminuir a quantidade de gás injetado quando comparado com o poço operando sem o controle.

Palavras-Chaves: *Gas-Lift* Contínuo, controlador PI-*fuzzy*, *choke*, vazão de produção.

ABSTRACT

When flowing wells no longer have enough energy to lift the reservoir fluids to the surface, the artificial lift methods are used. Lifting systems Continuous Gas-Lift are used in onshore wells and subsea environments, due to its robustness, simplicity and ability to operate the wide rates range. This method consists of continuous injection of gas at a certain point in the production tubing, causing the flow pressure in the well bottom to decrease and the production rates increase. In order to maintain the well operating by Gas-Lift in optimum operating conditions, electronic controllers have been used to make adjustments in some parameters and optimize the gas injection. In this work, a PI-fuzzy controller to manage the gas injection choke opening was developed in the Continuous Gas-Lift method in order to increase the production rates, having its star of operation after the discharge operation of the well. To validate the control, it was integrated into the code of a dynamic simulation software for wells operating by GLC, the *TraceLiftLaut*, and tested the tool with field data. Thus, it was possible to perform tree tests, each with different casing pressure limits, and it was verified that the control was efficient by increasing the rates production and decreasing the amount of injected gas when compared to the well operating without control.

Keywords: Continuos Gas-Lift, PI-fuzzy controller, choke, production flow rates.

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Manoel e Lene.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela minha saúde, por ter guiado os meus passos e ter me permitido chegar até aqui.

Aos meus pais, que sempre procuraram me dar o melhor, pelo apoio concedido e por acreditarem no meu potencial. Amo vocês!

À minha família, em especial a Família Soares, pelo amor, carinho, compreensão, apoio e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu noivo, Felipe Bruno, pela atenção, amor, carinho e compreensão.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram, incentivaram e torceram para eu chegar até aqui. Obrigada!

A todos da Pesquisa C, por me receberem tão bem e por todo apoio recebido e conhecimentos compartilhados. Em especial agradeço à Eliara, por estar sempre presente e me dando força para continuar nessa jornada.

Agradeço à Equipe do projeto *TraceLift* – melhorias e adequações, em especial a Everton por ter me ajudado e auxiliado no que fosse necessário para a execução desse trabalho.

Ao meu orientador, Dr. André Maitelli, e a minha co-orientadora, Dra. Carla Maitelli, pela paciência, confiança no meu trabalho e pelos conhecimentos compartilhados. Muito obrigada!

Ao Laboratório de Automação em Petróleo - LAUT, pela infraestrutura fornecida e a PETROBRAS pelo apoio financeiro, que possibilitaram a elaboração desse trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. ESTRUTURA DA PESQUISA	4
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo Geral	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	7
2.1. ELEVAÇÃO ARTIFICIAL – <i>GAS-LIFT</i>	7
2.1.1. Vantagens e limitações	9
2.2. <i>GAS-LIFT</i> CONTÍNUO	10
2.3. OPERAÇÃO DE DESCARGA	13
2.4. VÁLVULAS DE <i>GAS-LIFT</i>	14
2.5. VAZÃO DE GÁS VOLUMÉTRICA ATRAVÉS DO <i>CHOKE</i> DE INJEÇÃO.....	17
2.6. FLUXO MÁSSICO ATRAVÉS DO <i>CHOKE</i> DE PRODUÇÃO	18
2.7. SISTEMAS INTELIGENTES	20
2.7.1. Lógica <i>fuzzy</i>	21
2.7.2. Modelo <i>fuzzy</i> Takagi-Sugeno (TS)	23
2.8. ESTRUTURA DO CONTROLADOR <i>PI-FUZZY</i>	24
3. ESTADO DA ARTE	27
4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	31
4.1. SIMULADOR <i>TRACELIFTLAUT</i>	31
4.2. LÓGICA DO CONTROLE	33
4.2.1. Gerenciamento da pressão de revestimento.....	33
4.2.2. Controle da abertura e fechamento do <i>choke</i> de injeção	35
4.3. DADOS DE ENTRADA	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	52
6.1. CONCLUSÕES	52
6.2. RECOMENDAÇÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Curvas de desempenho de <i>Gas-Lift</i>	3
Figura 2.1. Fluxo natural (a) e gás injetado (b).	8
Figura 2.2. Sistema de <i>Gas-Lift</i>	9
Figura 2.3. Gradientes de pressão em poço de <i>Gas-Lift</i> Contínuo.....	11
Figura 2.4. Poço típico de <i>Gas-Lift</i> Contínuo.....	12
Figura 2.5. Processo de descarga de poço de <i>Gas-Lift</i>	13
Figura 2.6. Válvula de <i>Gas-Lift</i> de domo pressurizado.....	14
Figura 2.7. Arquitetura de um controlador <i>fuzzy</i>	22
Figura 2.8. Diagrama de uma regra de Sugeno operando.	24
Figura 4.1. Tela de entrada de dados do <i>TraceLiftLaut</i>	31
Figura 4.2. Tela de acompanhamento da simulação do <i>TraceLiftLaut</i>	32
Figura 4.3. Funções de pertinência da função <i>ErroPr</i>	35
Figura 4.4. Funções de pertinência da função <i>dErroPr</i>	36
Figura 4.5. Resposta ao degrau.....	38
Figura 4.6. Fluxograma do processo de controle desenvolvido.	40
Figura 5.1. Vazão de líquido produzido (Q_l s) x Tempo.....	45
Figura 5.2. Vazão de gás injetado no anular (Q_g a) x Tempo.....	46
Figura 5.3. Diâmetro do Choke Inj. x Tempo.	47
Figura 5.4. (a) Pressão de fluxo no fundo do poço (P_{wf}) x Tempo para o teste1; (b) Pressão de fluxo no fundo do poço (P_{wf}) x Tempo par o teste2; (c) Pressão de fluxo no fundo do poço (P_{wf}) x Tempo para o teste3.	48
Figura 5.5. (a) Pressão do revestimento (P_r) x Tempo para o teste1; (b) Pressão do revestimento (P_r) x Tempo para o teste2; (c) Pressão do revestimento (P_r) x Tempo para o teste3.....	48
Figura 5.6. Vazão de produção com e sem controlador x Tempo.	50
Figura 5.7. Vazão de injeção de gás com e sem controlador x Tempo.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Parâmetros de K_p e T_i para cada tipo de controlador.....	37
Tabela 4.2. Regras para o controlador PI- <i>fuzzy</i>	41
Tabela 4.3. Dados do reservatório.	42
Tabela 4.4. Dados de fluido.....	42
Tabela 4.5. Dados da superfície.....	42
Tabela 4.6. Dados da coluna de produção.	43
Tabela 4.7. Dados das válvulas de <i>Gas-Lift</i>	43
Tabela 4.8. Dados de outras configurações iniciais.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – conjunto;
- a – constante;
- A_b - área efetiva do fole (*bellow*), pol² (m²);
- A_{ch} - área do *choke* aberto ao fluxo, pol² (m²);
- A_p - área da porta da válvula, pol² (m²);
- A_{pe} - área da porta da válvula aberta para o fluxo de gás, pol² (m²);
- A_t - área transversal da seção de tubo, pé² (m²);
- b – constante;
- BCP - Bombeio por Cavidades Progressivas;
- BCS - Bombeio Centrífugo Submerso;
- B_g – fator volume de formação do gás, ft³/scf (m³/m³);
- BHJ - Bombeio Hidráulico a Jato;
- BM - Bombeio Mecânico;
- B_{sr} - constante da mola do fole, lbf/pol (N/m);
- BSW - percentual de água e sedimentos do fluido produzido, adimensional;
- C - coeficiente de distribuição, adimensional;
- c – constante;
- C_d - coeficiente de descarga, adimensional;
- C_L - calor específico de líquido, Btu/ (lbm.°R) (J/ (kg.K));
- CLP - Controlador Lógico Programável;
- CO₂ – Dióxido de carbono;
- C_p - calor específico de gás à pressão constante, Btu/ (lbm.°R) (J/ (kg.K));
- C_v - calor específico de gás à volume constante, Btu/ (lbm.°R) (J/ (kg.K));
- D - profundidade dos canhoneados;
- de - variação do erro;
- DP - diâmetro da porta da válvula, pol;
- du - variação na saída u;
- e – erro;
- ErroPr – erro da pressão de revestimento;
- ErroPwf – erro da pressão de fluxo no fundo do poço;
- F_{cf} - relação de pressão de fluxo crítico, adimensional;
- F_{du} - relação de pressão, adimensional;
- F_T - fator de correção de temperatura para nitrogênio, adimensional;

$F_1(x)$ - função de associação das Entradas 1;
 $F_2(y)$ - função de associação das Entradas 2;
 g - aceleração por gravidade, pé / s² (m/s²);
 G - fluxo mássico, lbm/(pé².s) (kg/(m².s));
 g_c - constante de gravidade, (lbm.pé)/(lbf.s²);
 G_{fa} - gradiente dinâmico médio acima do ponto de injeção de gás;
 G_{fb} - gradiente dinâmico médio abaixo do ponto de injeção de gás;
GLC - *Gas-Lift* Contínuo;
GLI - *Gas-Lift* Intermitente;
 G_n – erro grande negativo;
 G_p – erro grande positivo;
 $G(s)$ - função de transferência;
IA – Inteligência Artificial;
 k - razão de calores específicos (C_p / C_v), adimensional;
 K_i – ganho integrativo;
 k_m – ganho estático do sistema;
 K_p - ganho proporcional;
 L - profundidade da válvula operadora;
MD – profundidade medida, m;
 M_{vs} - movimento da haste da válvula, pol (m);
 n - expoente politópico de gás, adimensional;
 N - número de regras / variação do erro negativa;
negErro – erro negativo;
NovaPwf – novo valor para a pressão de fluxo no fundo do poço;
OD – diâmetro externo (pol);
 P - pressão absoluta, psia / variação do erro positiva;
 P_{bvD} - pressão de fole carregado com nitrogênio na temperatura de fundo, psi (Pa);
 P_{cal} - pressão de calibração da válvula @ 80 °F, psi (Pa);
 P_{cmp} - pressão no compressor, kgf/cm²;
 P_{csg} - pressão de revestimento na profundidade da válvula de operação, kgf/cm²;
 P_{csh} - pressão na cabeça do revestimento, kgf/cm²;
PDG - pressão no reservatório, kgf/cm²;
PI – Proporcional Integral;
 PI_1 – controlador PI agressivo;
 PI_2 – controlador PI original;

PI_3 – controlador PI lento;
 PID – Proporcional Integral Derivativo;
 P_{ioD} - pressão de injeção de gás na profundidade da válvula, psi (Pa);
 P_n – erro pequeno negativo;
 posErro – erro positivo;
 P_p – erro pequeno positivo;
 P_{pFD} - pressão de fluxo no tubo na profundidade da válvula, psi (Pa);
 P_r – pressão do revestimento, kgf/cm²;
 P_{rmax} – valor máximo da pressão de revestimento;
 P_{rmin} – valor mínimo da pressão de revestimento;
 P_{sfc} - pressão de superfície, kgf/cm²;
 P_{tbg} - pressão da coluna na profundidade da válvula de operação, kgf/cm²;
 P_{tro} – pressão da válvula @ 80 °F, kgf/cm²;
 PV – variável do processo;
 P_{vo} - pressão de abertura da válvula na bancada @ 60 °F, psi (Pa);
 P_{wf} - pressão de fluxo no fundo do poço, kgf/cm² (psi);
 P_{wh} - pressão de fluxo na cabeça do poço, kgf/cm² (psi);
 Q_{ga} – vazão de gás injetado no anular, m³/d;
 Q_{gi} - taxa de fluxo de gás em condições padrão, Mscf / d (m³/s);
 Q_{gr} - vazão de gás do reservatório, m³/d;
 Q_{gs} - vazão de produção de gás na superfície, m³/d;
 q_{gsc} - vazão de gás pela válvula de *Gas-Lift* nas condições padrão, Mscf/d (m³/s);
 Q_{gt} - vazão total de gás (gás do reservatório + gás do método *Gas-Lift*), m³/d;
 Q_{gv} - vazão de gás da válvula de *Gas-lift* nas condições de fundo, ft³/s (m³/s);
 Q_{lr} - vazão de líquido do reservatório, m³/d;
 Q_{ls} – vazão de produção de líquido na superfície, m³/d;
 Q_{lv} - vazão de líquido nas válvulas de *Gas-Lift*, m³/d;
 r_b - raio da esfera na haste da válvula, pol (m);
 R_{du} - relação entre as pressões a jusante/montante do orifício, adimensional;
 RGL – razão gás líquido;
 RGO – razão gás óleo, m³/m³;
 r_p - raio da porta da válvula, pol (m);
 r_{if} - raio superior do tronco de cone de ângulo reto, pol (m);
 s - altura do tronco de cone de ângulo reto, pol (m);
 SI – Sistema Inteligente;

SP – valor desejado (*setpoint*);
SP_{Pr} – valor desejado da pressão de revestimento;
SP_{Pwf} – valor desejado da pressão de fluxo no fundo do poço;
T - temperatura do gás, ° R;
T_{gD} – temperatura do gás na profundidade da válvula, °F (°R);
T_i - tempo integral;
T_m – constante de tempo;
T_s – tempo de amostragem, s;
TS - Takagi-Sugeno;
TVD – profundidade vertical, m;
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte;
v - velocidade, pé/s (m/s);
x – variável;
w - fração mássica de gás, adimensional / força de disparo da regra;
y – variável / razão entre as pressões a jusante e a montante do *choke*, adimensional;
y_c – razão crítica entre as pressões a jusante e a montante do *choke*, adimensional;
z – nível de saída / variação do erro zero;
Z – erro zero.

Letras gregas:

α - fração de vazio, adimensional;
 ϕ - volume específico, pé³/lbm (kg/m³);
 μ_A - função de pertinência;
 γ_g - densidade específica do gás, adimensional;
 ρ - peso específico, lbm/pé³ (kg/m³);
 τ_m – tempo de atraso.

Subscritos:

1 - posição a montante do *choke*;
2 - posição a jusante do *choke*;
g – gás;
i – número da regra;
L – líquido;
m - mistura.

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Caso no início da vida produtiva do poço, os fluidos contidos no reservatório cheguem à superfície fazendo uso apenas da energia natural, o poço é chamado de surgente e a elevação dita natural.

Com o passar do tempo, o reservatório de petróleo não consegue mais produzir por elevação natural, pois a pressão diminui e o óleo não chega a superfície. Diante disso, é necessário a adição de energia provinda dos métodos de elevação artificial, sendo alguns dos métodos mais utilizados listados a seguir:

- Bombeio Mecânico (BM);
- Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP);
- Bombeio Centrífugo Submerso (BCS);
- Bombeio Hidráulico a Jato (BHJ);
- *Gas-Lift* Contínuo e Intermitente (GLC e GLI) e
- *Plunger-Lift*.

O percentual de poços que produzem por elevação artificial no Brasil é de aproximadamente 97,6%. Dentre estes, 5,8% operam com *Gas-Lift* (Petrobras, 2018). O método de elevação artificial por *Gas-Lift* Contínuo baseia-se na injeção contínua de gás na parte inferior da coluna de produção, provocando a redução da densidade média dos fluidos dentro dela, reduzindo o gradiente de pressão em seu interior. É possível, com isso, reduzir a pressão de fluxo no fundo do poço (P_{wf}), o que permite aumentar a vazão de líquido produzido pelo reservatório (Q_{lr}). No entanto, a injeção excessiva de gás pode inverter este efeito e diminuir a eficiência do método (Spíndola, 2003).

A Figura 1.1 apresenta as curvas de pressão e vazão, bem como a melhor condição de operação, que ocorre quando se injeta uma vazão ótima de gás resultando uma maior vazão de produção de líquido, ou seja, existe uma razão ideal entre o volume de gás injetado e o volume de líquido produzido.

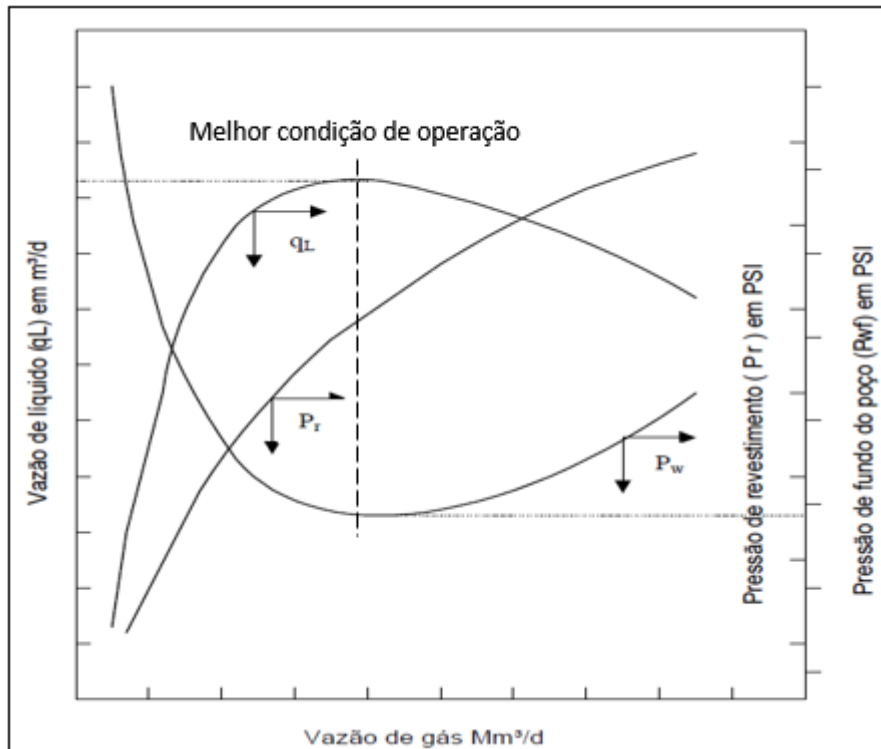


Figura 1.1. Curvas de desempenho de *Gas-Lift*.

Fonte: Adaptado de Spíndola (2003).

Um poço equipado para produzir por GLC deve ser frequentemente monitorado para manter a melhor condição de produção, pois com o passar do tempo ocorrem mudanças no sistema de produção, tais como: alterações da pressão ou do índice de produtividade do reservatório, da fração de água produzida, da temperatura ambiente, do eventual acúmulo de condensado no espaço anular, da redução no diâmetro na coluna de produção (*tubing*) devido a deposição de parafina, estes fatores podem desestabilizar sua condição operacional (Spíndola, 2003). Para a análise e consequente ajuste de algumas dessas variáveis, pode-se usar controladores eletrônicos para obtenção de resultados ótimos, pois, segundo Bergeron; Cooksey; Reppel (1999), controladores eletrônicos têm demonstrado ser eficazes na manutenção otimizada da produção.

Os controladores utilizados nas plantas industriais são na sua maioria do tipo PID mesmo que o processo seja não-linear. A utilização em massa destes controladores deve-se à facilidade de implementação, sintonia e por estarem embutidos em todos os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) industriais e até mesmo em sensores

inteligentes (Campos & Texeira, 2005 *apud* Lacerda, 2009). As não linearidades, em geral, são contornadas através da linearização da planta em torno de um ponto de operação (Ogata, 2003 *apud* Lacerda, 2009).

No entanto uma alteração na composição da matéria-prima ou uma parada ou partida da planta, ocasiona não-linearidades que não são controladas pelos controladores clássicos. Nesta situação, o uso de Sistemas Inteligentes (SI) torna-se primordial, pois a característica principal destes sistemas é tratar as não-linearidades do processo através do uso de uma base de conhecimentos adquiridas pelo operador (Lacerda, 2009). Um dos sistemas que se enquadra na categoria dos SI é a lógica *fuzzy*, que será utilizada neste trabalho.

A lógica *fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos nebulosos desenvolvida por Zadeh (1965). A propriedade fundamental dos controladores *fuzzy* é a de serem baseados em experiência de operadores humanos e em padrões de raciocínio, em vez de utilizarem modelos matemáticos, já que podem ser implementados usando o conhecimento experimental de operadores humanos, já treinados, fazendo com que a ação de controle seja tão boa quanto a deles (Shaw Simões, 1999 *apud* Lacerda, 2009).

Este trabalho apresenta um sistema de controle PI-*fuzzy* para a abertura do *choke* de injeção de gás em um poço com *Gas-Lift* Contínuo, visando otimizar a relação entre o volume de óleo produzido e o consumo de gás injetado. O controle da abertura do *choke* e, conseqüentemente, a quantidade de gás a ser injetada, é feito através do gerenciamento da pressão de revestimento do poço por meio de um algoritmo de controle PI-*fuzzy* especificamente desenvolvido em C++ e acrescentado ao simulador *TraceLiftLaut*.

1.1. Estrutura da pesquisa

O trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo, o conteúdo do trabalho é exposto, assim como os objetivos gerais e os específicos. No segundo, os aspectos teóricos sobre o método de elevação artificial *Gas-Lift* Contínuo, e sobre os sistemas inteligentes, assim como a estrutura de um controlador PI-*fuzzy* são mostrados, facilitando a compreensão dos próximos capítulos. No capítulo três, apresenta-se o estado da arte, que mostra metodologias e técnicas já utilizadas para o desenvolvimento de trabalhos com o mesmo objetivo deste. No quarto capítulo, a metodologia para o desenvolvimento do controle e aplicação no *TraceLiftLaut* é exibida. O quinto capítulo

apresenta os resultados obtidos, e, por fim, no sexto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho desenvolvido.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um controlador PI-*fuzzy* para gerenciar a abertura do *choke* de injeção de gás, para a otimização da vazão de produção. Para isso, o código do controle foi integrado ao código de uma versão atualizada do simulador *TraceLift*, desenvolvido para poços de petróleo equipados com o método de elevação por *Gas-Lift* Contínuo, fruto do Projeto *TraceLift* - melhorias e adequações, uma parceria entre a UFRN e PETROBRAS. Para este trabalho, a nova versão do simulador será denominada de *TraceLiftLaut*.

1.2.2. Objetivos específicos

Assim, a partir do objetivo geral do trabalho tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar vazões de produção para otimização;
- Desenvolver um controlador PI-*fuzzy*;
- Testar com dados de campo.

Capítulo 2

Aspectos teóricos

2. Aspectos teóricos

Nesta seção será apresentado o conteúdo teórico necessário para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho.

2.1. Elevação artificial – *Gas-Lift*

No transcorrer da vida produtiva de um poço, a pressão do reservatório se altera, fazendo com que seja necessário, quase sempre, a aplicação de algum tipo de elevação artificial, um dos métodos utilizados é o *Gas-Lift*. Existem dois tipos de sistemas de *Gas-Lift* usados na indústria do petróleo para deslocamento do óleo: o *Gas-Lift* Contínuo (GLC) e o Intermitente (GLI). O GLI baseia-se na injeção de gás a alta pressão a base de golfadas com tempos bem definidos. O GLC é a forma de elevação artificial que mais se assemelha ao processo de fluxo natural, podendo ser considerado uma extensão do processo de elevação natural (API, 1994).

Essa analogia é feita pois, no fluxo natural, à medida que os fluidos são deslocados até a superfície, a pressão da coluna de fluidos é reduzida e o gás sai da solução. O gás livre gaseifica o óleo, reduzindo a densidade média dos fluidos que fluem na coluna de produção, conseqüentemente reduz ainda mais o peso da coluna de fluidos. Esta redução causa um diferencial de pressão entre o fundo do poço e o reservatório, fazendo com que haja maior fluxo de fluidos no poço. O método em estudo funciona da mesma forma, só que o gás é injetado na coluna de produção para manter a pressão diferencial entre o fundo do poço e o reservatório, corrigindo o aumento da densidade média na coluna de produção. Este é utilizado quando um poço produz água, ou a quantidade de gás livre na coluna é reduzida (API, 1994).

A Figura 2.1 mostra em (a) um poço operando por fluxo natural e em (b) o poço operando por *Gas-Lift* Contínuo.

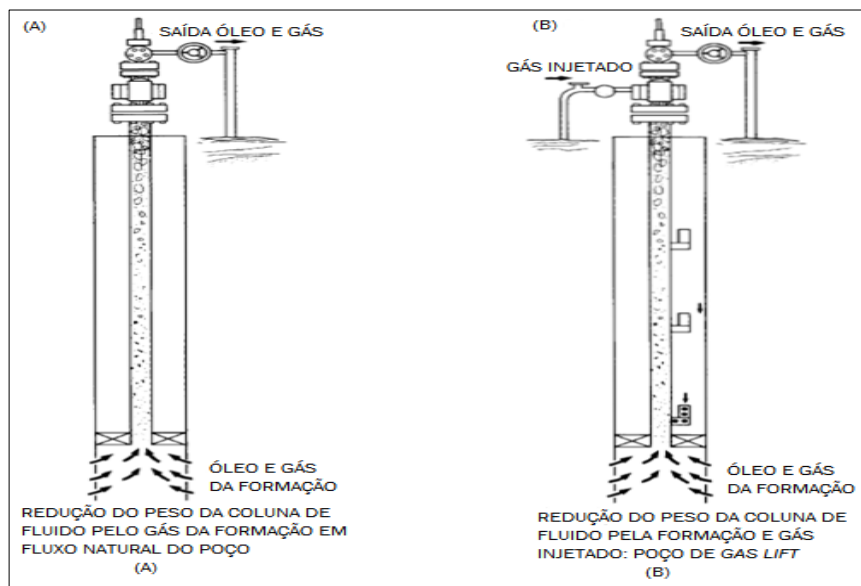


Figura 2.1. Fluxo natural (a) e gás injetado (b).

Fonte: Adaptado de API (1994).

A Figura 2.2 mostra o sistema de poços equipados para produzir por *Gas-Lift*, onde o gás é provindo de uma fonte de gás a alta pressão - (1) compressor e/ou poço de gás de alta pressão - e antes de ser injetado no anular, o gás passa por um controlador de injeção na superfície (2), que para o GLC é um *choke* e para o GLI é um *motor valve*. Para o gás passar do anular para a coluna de produção, utiliza-se um controlador de injeção de subsuperfície, que são as válvulas de *Gas-Lift* (3). Assim, o fluido produzido passa por equipamentos para separação do óleo e gás (4), onde a fase líquida é armazenada em tanques (5) e fase gasosa passa por equipamentos de purificação (6) para retirar as impurezas ainda existentes e por sistema de sucção de baixa pressão (7) para assim ser acondicionado no compressor (1) e ser utilizado no processo de produção de um poço operando por *Gas-Lift*.

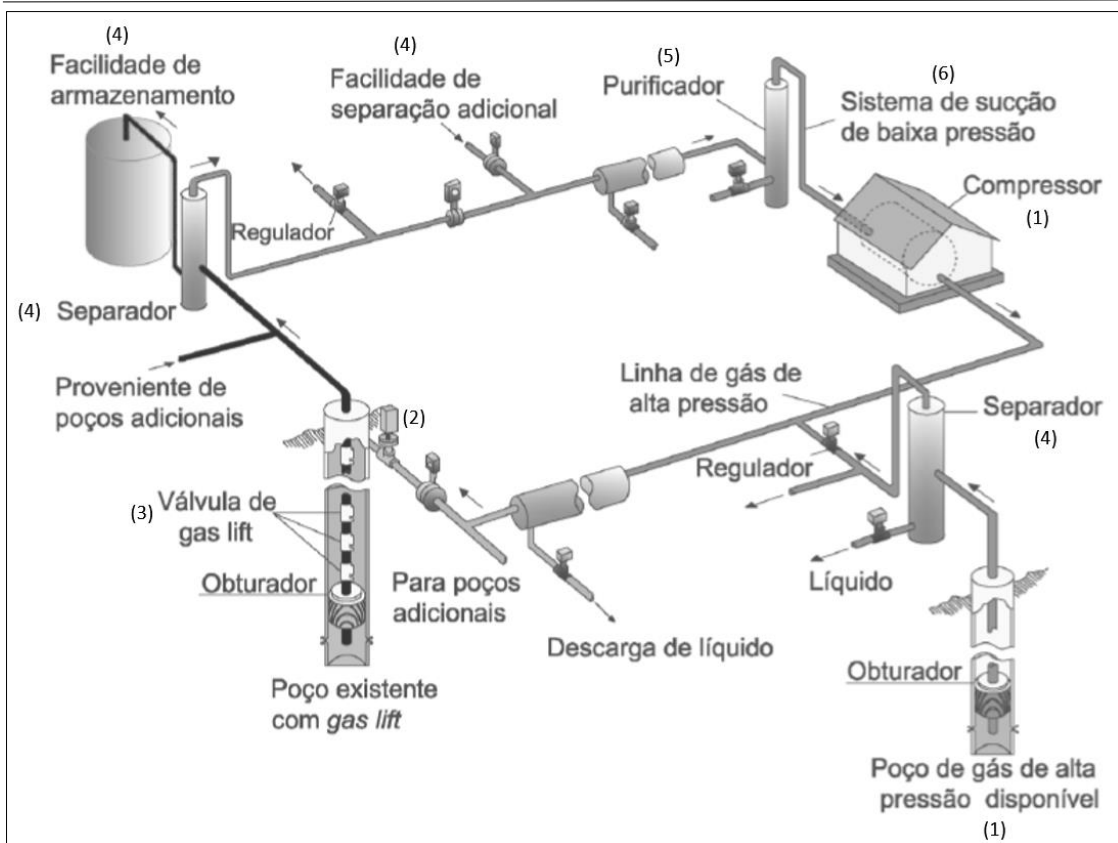


Figura 2.2. Sistema de *Gas-Lift*

Fonte: Adaptado da página PetroLessons.

Disponível em: <<https://petrolessons.com/gl-production-system/>> Acesso em 22 de maio de 2019.

2.1.1. Vantagens e limitações

De acordo com o API (1994), as vantagens e limitações do *Gas-Lift* são listadas abaixo.

Vantagens:

- ✓ O custo inicial do equipamento no poço é geralmente baixo;
- ✓ Em termos de flexibilidade não pode ser comparado com outro método de elevação. As instalações podem ser projetadas para elevar de um a muitos milhares de barris por dia;
- ✓ A taxa de produção pode ser controlada na superfície;
- ✓ Areia no fluido produzido não afeta os equipamentos na maioria das instalações;
- ✓ As poucas partes móveis proporcionam uma longa vida útil quando comparadas a outras formas de elevação artificial;
- ✓ O custo operacional geralmente é relativamente baixo;

- ✓ O principal equipamento (compressor de gás) é instalado na superfície, onde pode ser facilmente inspecionado, reparado e mantido. Este equipamento pode ser acionado por gás ou eletricidade.

Limitações:

- ✗ O gás deve estar disponível. Em alguns casos, CO₂, hélio e nitrogênio têm sido usados, mas estes são geralmente mais caros e mais difíceis de trabalhar do que o gás natural produzido localmente;
- ✗ O amplo espaçamento dos poços pode limitar o uso de uma fonte de gás de alta pressão localizada centralmente;
- ✗ O gás corrosivo pode aumentar o custo das operações se for necessário tratar ou secar o gás antes da utilização;
- ✗ A instalação do sistema, incluindo os compressores, geralmente requer um tempo maior de preparação do que os sistemas de bombeamento de poço. Além disso, a instalação inicial da superfície, às vezes, será mais cara que as instalações equivalentes de bombeamento. No entanto, o custo operacional reduzido do sistema de *Gas-Lift* normalmente pesará muito sobre qualquer custo adicional da instalação inicial. Além disso, se o gás associado for coletado e comprimido, como é geralmente o caso, as provisões para a circulação de alguns dos gases comprimidos para o *Gas-Lift* não aumentarão, na maioria dos casos, significativamente o custo inicial.
- ✗ Em reservatórios de pressão muito baixa, o GLC pode não alcançar um rebaixamento de pressão tão grande quanto o de alguns sistemas de bombeamento. No entanto, quando a pressão de fundo de baixo fluxo é desejada, o uso de formas de elevação intermitente de *Gas-Lift* normalmente pode alcançar reduções de pressão comparáveis aos sistemas de bombeamento.
- ✗ A conversão de poços antigos em poços de *Gas-Lift*, pode exigir um nível mais alto de integridade do revestimento do que seria necessário para sistemas de bombeamento.

2.2. *Gas-Lift* Contínuo

O *Gas-Lift* Contínuo é um método bastante utilizado em produção *offshore* e *onshore*, destacam-se entre suas vantagens: versatilidade, pois atende a larga faixa de vazões, tanto de óleo, quanto de gás, pode ser instalado em qualquer poço independente

da profundidade ou do tipo de fluidos produzidos, e robustez, já que é praticamente imune a problemas mecânicos (Moura, 2004).

A Figura 2.3 ilustra um diagrama de fluxo contínuo e apresenta o comportamento do gradiente médio de pressão abaixo (G_{fb}) e acima (G_{fa}) do ponto de injeção e do gradiente médio de pressão do gás no anular. No método GLC o gás injetado continuamente em um ponto da coluna, promove um aumento da Razão Gás/Líquido (RGL) do fluxo, isto é, acima do ponto de injeção consegue uma diminuição no gradiente de pressão na tubulação (G_{fa}), como pode ser visualizado na Figura 2.4. Isso, acarreta uma redução no valor da pressão de fundo em fluxo (P_{wf}) de modo a se ter maior vazão de líquido do reservatório (Martins, 1991).

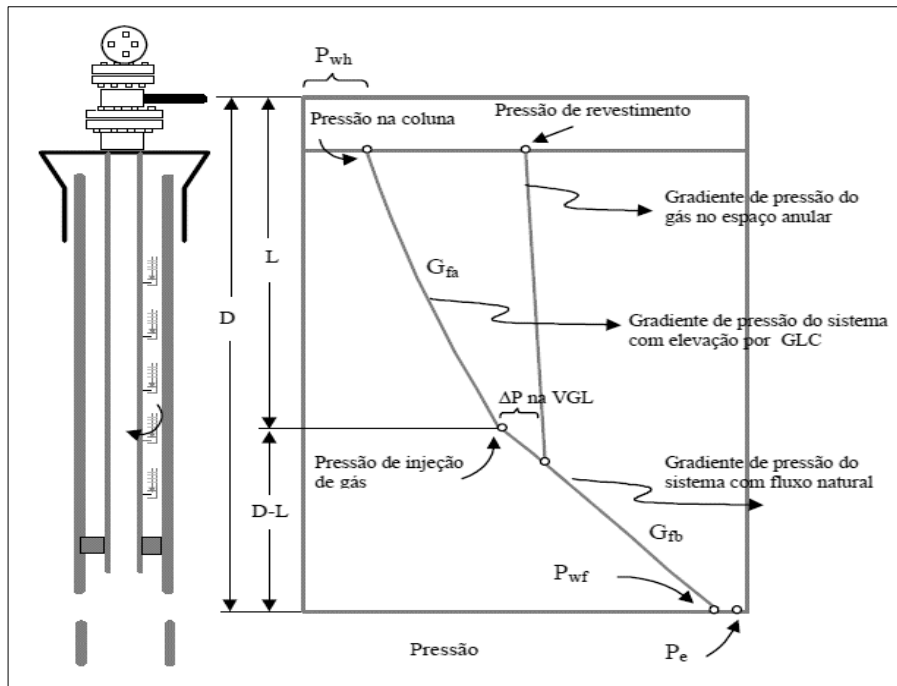


Figura 2.3. Gradientes de pressão em poço de *Gas-Lift* Contínuo.

Fonte: Adaptado de Spíndola (2003).

A Equação (1) é base para o projeto, dimensionamento e análise de uma instalação de *Gas-Lift* Contínuo, e assume um gradiente médio de pressão abaixo do ponto de injeção de gás e um gradiente médio de pressão acima do ponto de injeção.

$$P_{wf} = P_{wh} + G_{fa}L + G_{fb}(D - L) \quad (1)$$

onde:

P_{wf} = pressão de fluxo no fundo do poço;

P_{wh} = pressão de fluxo na cabeça do poço;

G_{fa} = gradiente dinâmico médio acima do ponto de injeção de gás;

G_{fb} = gradiente dinâmico médio abaixo do ponto de injeção de gás;

L = profundidade da válvula operadora;

D = profundidade dos canhoneados.

Observa-se que uma ação eficaz da elevação por GLC reduzirá G_{fa} , reduzindo P_{wf} . Como a vazão do reservatório aumenta com a redução de P_{wf} , a vazão do poço será uma função de como a injeção de gás através da válvula operadora modificará o gradiente do fluido acima dela (Brown, 1977 *apud* Spíndola, 2003).

Como existem limitações nas pressões de injeção de gás, normalmente sendo mais baixas que a pressão estática do reservatório, é necessário a instalação de válvulas de descarga na coluna para que haja a descarga do poço. Assim, a profundidade de instalação da válvula operadora, necessária para a injeção contínua de gás, é estabelecida o mais profundo possível, para se obter melhores resultados e para que o consumo de gás seja mínimo.

A Figura 2.4 apresenta uma instalação típica de GLC com quatro válvulas de descarga, uma válvula operadora e uma válvula controladora de injeção de gás (*choke*).

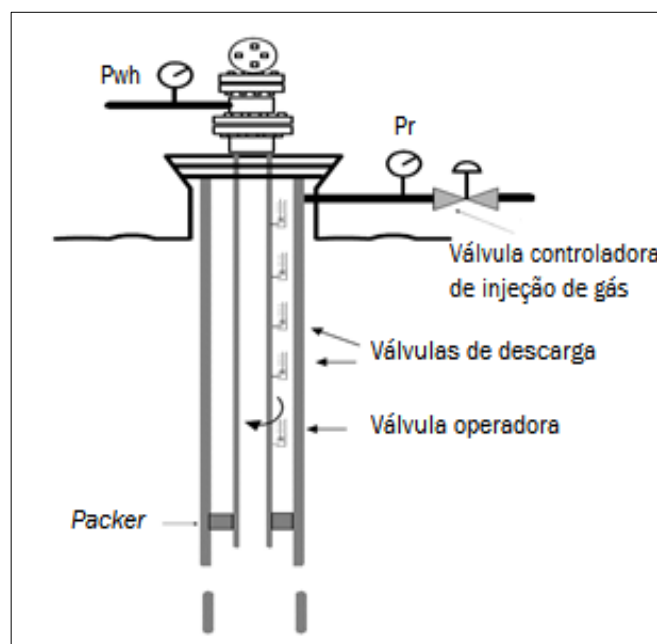


Figura 2.4. Poço típico de *Gas-Lift* Contínuo.

Fonte: Adaptado de Spíndola (2003).

2.3. Operação de descarga

Após a completação de um poço equipado com *Gas-Lift*, há um fluido de densidade controlada que fornece uma contra pressão na formação evitando o fluxo do reservatório para o poço. Dessa forma, para habilitar a injeção de gás pela válvula operadora de *Gas-Lift* é necessário remover o fluido de amortecimento. O processo de retirada desse fluido através da injeção de gás do espaço anular para a coluna é denominado de descarga do poço ou *kick-off* (Spíndola, 2003). A Figura 2.5 apresenta a sequência para o processo de descarga do poço.

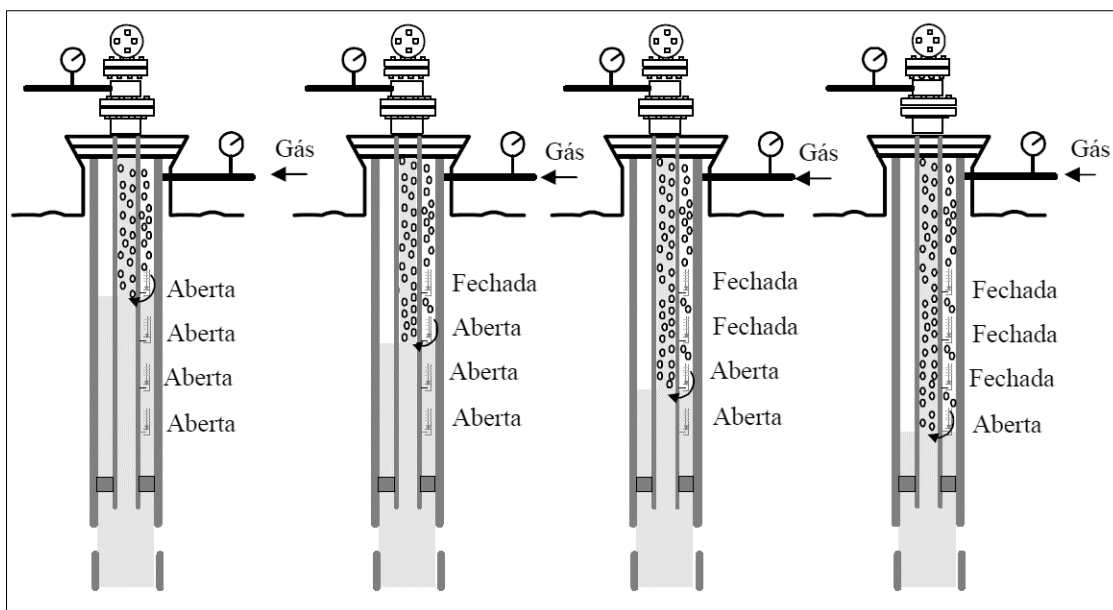


Figura 2.5. Processo de descarga de poço de *Gas-Lift*

Fonte: Adaptado de Spíndola (2003).

A operação se inicia com a injeção de gás no anular através do *choke* e todas as válvulas se encontram abertas. A entrada de gás na coluna de produção ocorre, inicialmente, pela válvula de descarga localizada mais próxima à superfície, que se mantém aberta até que o nível de fluido no anular atinja a válvula imediatamente abaixo. Esta sequência de eventos é obtida através da especificação das válvulas utilizadas, que inclui, diâmetro de fluxo e pressão de abertura e fechamento. A etapa de descarga termina quando se atinge a válvula mais inferior que passa a ser a única válvula a operar e recebe o nome de válvula operadora (Plucenio, 2003).

2.4. Válvulas de *Gas-Lift*

As válvulas de *Gas-Lift* são um dos principais equipamentos do sistema, pois desempenham funções desde a operação de descarga até a produção do poço. São válvulas de pressão alojadas em mandris e localizadas entre a coluna de produção e o revestimento. Quando a válvula está aberta, passa por ela gás ou líquido do anular para a coluna de produção, mas também pode ser arranjada para permitir fluxo do tubo para o anular. A Figura 2.6 ilustra uma válvula de *Gas-Lift*.

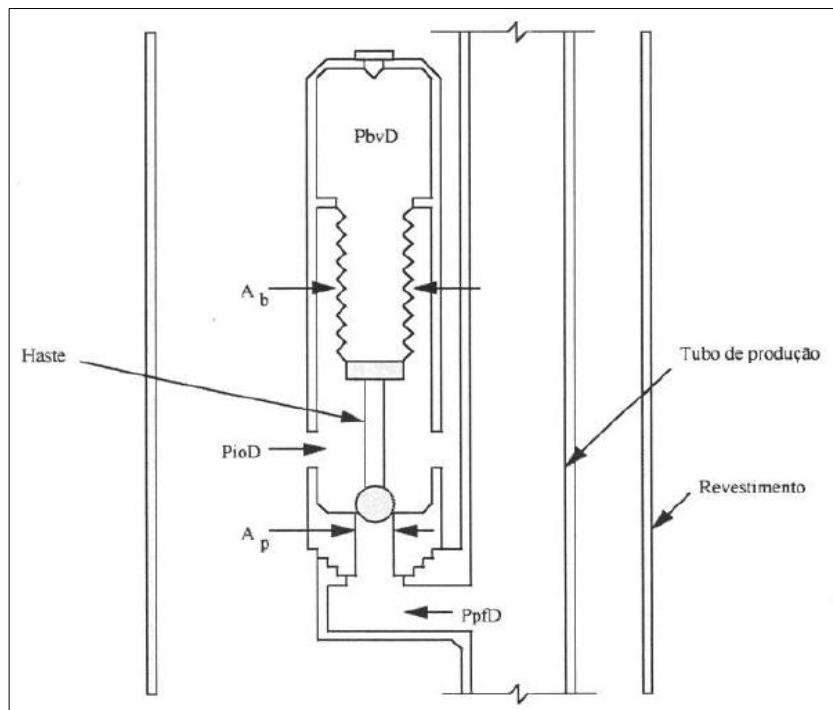


Figura 2.6. Válvula de *Gas-Lift* de domo pressurizado.

Fonte: Choi (1996).

O simulador utilizado neste trabalho, é um protótipo para a reprodução de um *software* da PETROBRAS, o *TraceLift*. Nele o acoplamento entre o espaço anular e a coluna de produção é feito através do modelo de válvula de *Gas-Lift* proposto Winkler et al. (1993). Este modelo permite obter a vazão de gás que fluido espaço anular para dentro do tubo quando as pressões a montante (anular) e a jusante (tubo) da válvula são fornecidas. O modelo é válido tanto para as válvulas do tipo orifício como para as válvulas de domo pressurizado (Choi, 1996).

A sequência de cálculos para obter a vazão de gás através de válvula de *Gas-Lift* é apresentada a seguir. Para o cálculo de movimento da haste da válvula de *Gas-Lift* (M_{vs}) é utilizado a Equação (2):

$$M_{vS} = \frac{(P_{ioD} - P_{bvD})A_b - (P_{ioD} - P_{pfD})A_p}{B_{sr}} \quad (2)$$

onde P_{ioD} é a pressão de injeção de gás na profundidade da válvula (psi), P_{bvD} é a pressão de fole carregado com nitrogênio na temperatura no fundo (psi), A_b é a área efetiva do fole (pol²), P_{pfD} é a pressão de fluxo no tubo na profundidade da válvula (psi), A_p é a área da porta da válvula (pol²) e B_{sr} é a constante da mola do fole (lbf/pol). Sendo P_{bvD} obtido pela Equação (3):

$$P_{bvD} = \frac{P_{vo}(A_b - A_p)}{A_b F_T} \quad (3)$$

sendo P_{vo} a pressão de abertura da válvula na bancada a 60 °F (psi) e F_T o fator de correção de temperatura para nitrogênio (adimensional).

Para o cálculo da área de porta aberta para o fluxo de gás (A_{pe}) utiliza-se a Equação (4):

$$A_{pe} = \pi(r_{tf} + r_p)s \quad (4)$$

sendo r_p o raio da porta da válvula (pol), s a altura do tronco de cone de ângulo reto (pol) e r_{tf} o raio superior do tronco de cone de ângulo reto (pol), obtido pela Equação (5):

$$r_{tf} = r_p r_b / C_2 \quad (5)$$

onde r_b é o raio da esfera na haste da válvula (pol) e C_2 é o coeficiente de distribuição na fronteira superior de uma célula (adimensional), calculado pela Equação (6):

$$C_2 = \sqrt{r_p^2 + (C_1 + M_{vS})^2} \quad (6)$$

onde C_1 é coeficiente de distribuição na fronteira inferior de uma célula (adimensional) e é dado pela Equação (7):

$$C_1 = \sqrt{r_b^2 - r_p^2} \quad (7)$$

e s é obtido pela Equação (8):

$$s = C_2 - r_b \quad (8)$$

Assim, se $A_{pe} > A_p$, então $A_{pe} \Rightarrow A_p$ e o fluxo é pelo orifício fixo.

O cálculo da vazão de gás (q_{gsc}) através de A_{pe} é dado pela Equação (9):

$$q_{gsc} = \frac{2946 A_{pe} P_{ioD} \sqrt{R_{du}^{1,587} - R_{du}^{1,794}}}{\sqrt{T_{gD} + 460}} \quad (9)$$

onde T_{gD} é a temperatura do gás na profundidade da válvula (°F) e R_{du} é a relação entre as pressões a jusante/montante (adimensional), adquirido pela Equação (10):

$$R_{du} = \frac{(P_{pfD} + 14,7)}{(P_{ioD} + 14,7)} \quad (10)$$

se $R_{du} \leq 0,553$, considera-se $R_{du} = 0,553$ e o fluxo é crítico.

A vazão de gás injetado pela válvula nas condições de profundidade da válvula (Q_{gV}) é dada pela Equação (11):

$$Q_{gV} = q_{gsc} B_g \quad (11)$$

sendo B_g o fator volume de formação do gás, ft³/scf.

Antes da instalação da válvula no poço, a pressão de abertura é ajustada na superfície. As condições utilizadas para abertura e fechamento da válvula, dependem das pressões no anular e do fluido na coluna. No simulador utiliza-se as seguintes condições:

Se ($DP > 0$ e ($(P_{cal} > 0$ e $P_{vo} \leq P_{ioD}$) ou $P_{cal} \leq 0$) – a válvula estará aberta

Se ($(P_{cal} > 0$ e $P_{vo} \geq P_{ioD}$) ou $DP=0$) – a válvula estará fechada

onde: DP é o diâmetro da porta da válvula (pol) e P_{cal} é a pressão de calibração da válvula @ 80 °F (psi).

2.5. Vazão de gás volumétrica através do *choke* de injeção

A injeção de gás no anular é feita através do *choke* que fica localizado na superfície. O fluxo através de restrições pode ser subcrítico ou crítico. No fluxo subcrítico, a velocidade do gás através da restrição está abaixo da velocidade do som no gás. A taxa de fluxo dependerá das pressões a montante e a jusante. No fluxo crítico, a velocidade do gás através das restrições é igual à velocidade do som no gás. Uma vez que os distúrbios de pressão viajam à distância do som, uma perturbação a jusante da restrição no fluxo crítico não afetará a pressão a montante ou a taxa de fluxo (Ikoku, 1992).

O fluxo de gás através do *choke* pode ser calculado para o fluxo crítico (sonoro) e subcrítico (subsônico) usando a Equação (12):

$$Q_{gi} = \frac{155,5 C_d (A_{ch}) P_1 \sqrt{2g \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[(F_{du})^{2/k} - (F_{du})^{(k+1)/k} \right]}}{\sqrt{\gamma_g (T_1)}} \quad (12)$$

onde:

Q_{gi} = taxa de fluxo de gás em condições padrão (14.7 psia e 60 ° F), Mscf / d;

C_d = coeficiente de descarga (determinado experimentalmente – $C_d = 0,865$), adimensional;

A_{ch} = área do *choke* aberto ao fluxo, pol^2 ;

P_1 = pressão do gás a montante do *choke*, psia;

P_2 = pressão do gás a jusante do *choke*, psia;

g = aceleração por gravidade, pé / s^2 ;

k = razão de calores específicos (C_p / C_v), adimensional,

C_p = calor específico de gás à pressão constante, qualquer sistema de unidades é conveniente, pois essas unidades se simplificam nas expressões anteriores;

C_v = calor específico de gás à volume constante, idem;

γ_g = densidade específica do gás (ar = 1,0), adimensional

T_1 = temperatura do gás a montante, ° R,

F_{du} = relação de pressão, P_2 / P_1 , unidades absolutas consistentes, adimensional.

Para verificar se o fluxo é crítico ou não, utiliza-se a relação de pressão de fluxo crítico (F_{cf}) que é dada pela Equação (13).

$$F_{cf} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (13)$$

Assim, se $F_{du} \leq F_{cf}$, então $F_{du} \Rightarrow F_{cf}$ e o fluxo é crítico.

2.6. Fluxo mássico através do *choke* de produção

Na superfície é instalada uma restrição, normalmente um *choke* variável, a montante de um sistema de separação líquido-gás. No *software* utilizado neste trabalho, considera-se que a pressão de separação permanece constante como é desejado na prática. Isto significa que a pressão a jusante do *choke* é constante e o modelo para escoamento bifásico utilizado foi o de Sachdeva et al. (1986), aqui descrito. Este modelo foi implementado com sucesso tanto para o fluxo monofásico, líquido ou gasoso, como para bifásico. O diâmetro de abertura do *choke* pode variar de 0,001 até 2 polegadas. Com esta última condição, é possível simular o fechamento do poço usando o mesmo modelo de *choke* ‘em fluxo’ (Choi, 1996).

O modelo de Sachdeva et al. (1986) é feito em duas etapas. A primeira é obter o ponto de transição crítico-subcrítico resolvendo iterativamente a Equação (14):

$$y = \left\{ \frac{\frac{k}{k-1} + \frac{(1-w_1)\phi_L(1-y)}{w_1\phi_{g1}}}{\frac{k}{k-1} + \frac{n}{2} + \frac{n(1-w_1)\phi_L}{w_1\phi_{g2}} + \frac{n[(1-w_1)\phi_L]^2}{2[w_1\phi_{g2}]^2}} \right\}^{\frac{k}{k-1}} \quad (14)$$

sendo w_1 a fração mássica de gás a montante do *choke* (adimensional), ϕ_L o volume específico do líquido (pé³/lbm), ϕ_{g1} o volume específico do gás a montante do *choke* (pé³/lbm), ϕ_{g2} o volume específico do gás a jusante do *choke* (pé³/lbm), y a razão entre as pressões a jusante e a montante do *choke* (adimensional) e n o expoente politópico de gás (adimensional). O volume específico do gás e do líquido é obtido através da Equação (15), onde o peso específico (ρ) a ser utilizado vai depender de qual fluido se quer obter o resultado.

$$\phi = \frac{1}{\rho} \quad (15)$$

E as variáveis y e n são obtidas pelas Equações (16) e (17), respectivamente:

$$y = \frac{P_2}{P_1} \quad (16)$$

$$n = 1 + \frac{w_1(C_p - C_v)}{w_1 C_v + (1 - w_1)C_L} \quad (17)$$

onde C_L é o calor específico de líquido, qualquer sistema de unidades é conveniente, pois essas unidades se simplificam nas expressões anteriores;

O valor de y após a convergência é a relação crítica de pressões, y_c , na qual ocorre a transição entre o fluxo crítico e subcrítico. Se o valor real de P_2/P_1 for maior que y_c , o fluxo é subcrítico. Se for menor ou igual a y_c , o fluxo é crítico e o valor de $P_2 = P_1 y_c$ deve ser usado como a pressão a jusante do *choke*.

A segunda etapa é calcular o fluxo mássico através do *choke* (G_2) utilizando a Equação (18):

$$G_2 = C_d \left\{ 2g_c 144 P_1 \rho_{m2}^2 \left[\frac{(1-w_1)(1-y)}{\rho_L} + \frac{w_1 k}{k-1} (\phi_{g1} - y \phi_{g2}) \right] \right\}^{0,5} \quad (18)$$

onde g_c é a constante de gravidade (32,17 lbf·pé/lbf /s²), ρ_{m2} é o peso específico da mistura a jusante do *choke* (lbf/pé³) e ρ_L é o peso específico do líquido (lbf/pé³). Em que o volume específico do gás a jusante do *choke* é obtido pela Equação (19) e (20):

$$\phi_{g2} = \phi_{g1} y^{-\frac{1}{k}} \quad (19)$$

e

$$\frac{1}{\rho_{m2}} = w_1 \phi_{g1} y^{-\frac{1}{k}} + (1 - w_1) \phi_L \quad (20)$$

A Equação (18) é utilizada tanto para calcular o fluxo mássico da mistura para fluxo crítico como subcrítico.

De acordo com Choi (1996), esse modelo de *choke* funciona em dois modos no *TraceLift*: 1- Dado o fluxo mássico no montante do *choke*, obtém-se a pressão; 2- Dada a pressão a montante do *choke*, obtém-se o fluxo mássico. O segundo modo é utilizado para situações de abertura do *choke* menor que 0,5 pol., pois o primeiro mostrou-se

instável nessas condições. O fluxo mássico total (G_t) é calculado utilizando a Equação (21):

$$G_t = G_L + G_g \quad (21)$$

onde o G_L e G_g são o fluxo mássico de líquido e gás a montante do *choke*, respectivamente, e são obtidos a partir das Equações (22) e (23):

$$G_L = (1 - \alpha)v_L\rho_L A_t/A_{ch} \quad (22)$$

$$G_g = \alpha v_g \rho_g A_t/A_{ch} \quad (23)$$

sendo A_t a área transversal da seção de tubo (pé^2), v_L a velocidade do líquido (pé/s), v_g a velocidade do gás (pé/s), α a fração de vazio (adimensional) e ρ_g é o peso específico do gás (lbm/pé^3).

2.7. Sistemas Inteligentes

Historicamente, os controladores clássicos têm resolvido grande parte dos problemas de controle em processos industriais, porém quando os sistemas são não lineares, apresentam imprecisões ou possuem modelos complexos e tais controladores apresentam dificuldade. Uma das soluções para o problema de controle em sistemas dessa natureza é o uso dos Sistemas Inteligentes (Silva et al., 2007).

Qualquer aplicação computacional que execute tarefas, consideradas pelos seres humanos como inteligentes pode ser denominada um Sistema Inteligente ou baseada em Inteligência Artificial (IA) (Campos & Saito, 2004 *apud* Lacerda, 2009). Existem diversas definições de IA, mas segundo Rich (1983) *apud* Araújo (2015), IA é o estudo de como fazer os computadores realizarem tarefas que, no momento, são feitas melhor por pessoas.

O conhecimento e a experiência humana, por poderem ser traduzidas em termos linguísticos, determinam a base para o desenvolvimento de novas ferramentas, dentre elas os Sistemas Inteligentes (SI). E estes termos linguísticos são usados pelos SI para serem implementados em computador usando algoritmos (Lacerda, 2009).

A característica principal dos Sistemas Inteligentes é abordar as não-linearidades do processo por meio do uso de uma base de conhecimentos alcançada pelo operador. Segundo Campos & Saito (2004) *apud* Lacerda (2009), os tipos de sistemas que se enquadram na categoria de Sistemas Inteligentes são:

- Sistemas especialistas;
- Sistemas baseados em lógica *fuzzy*;
- Sistemas baseados em redes neurais;
- Sistemas baseados em algoritmos genéticos;
- Sistemas baseados em técnicas de aprendizagem de máquina.

Apenas a lógica *fuzzy* será descrita, por ser utilizada neste trabalho para a realização do controle da abertura do *choke* de injeção.

2.7.1. Lógica *fuzzy*

As técnicas de controles nebulosos ou *fuzzy*, tiveram origem com as pesquisas e projetos de E. H. Mamdani em 1948 – 49 e desde então ganharam espaço em diversas instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento do mundo (Sandri & Correa, 1999). A lógica *fuzzy* se baseia na teoria dos conjuntos nebulosos de Zadeh (1965).

De acordo com Sandri & Correa (1999), a teoria dos conjuntos nebulosos indica o grau de compatibilidade entre o elemento x e o conceito expresso pelo conjunto A , através da função de pertinência $\mu_A(x)$, que podem ser triangular, trapezoidal, gaussiana e *fuzzy-tom*, assim:

- $\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;
- $\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau de $\mu_A(x)$.

O Controle *fuzzy*, então, procura incorporar a forma humana de pensar em sistemas de controle. Os controladores obtidos têm uso em sistemas dinâmicos complexos, de comportamento não-linear (Filho; Gosmann; Bauchspiess, 2002).

Isto permite que o controle nebuloso ou *fuzzy* trabalhe com incertezas e imprecisões e utilize regras lógicas que simulam a experiência humana para controlar um processo. Esse conjunto de regras é do tipo **Se** <premissa> **Então** <conclusão>, que definem ações de controle em função das diversas faixas de valores que as variáveis de estado do problema podem assumir (Sandri & Correa, 1999).

A ação de um controlador *fuzzy* pode ser esquematizada da seguinte forma: fuzzificação, base de conhecimento, inferência e defuzzificação. Na Figura 2.7 visualiza-se a arquitetura para este controlador.

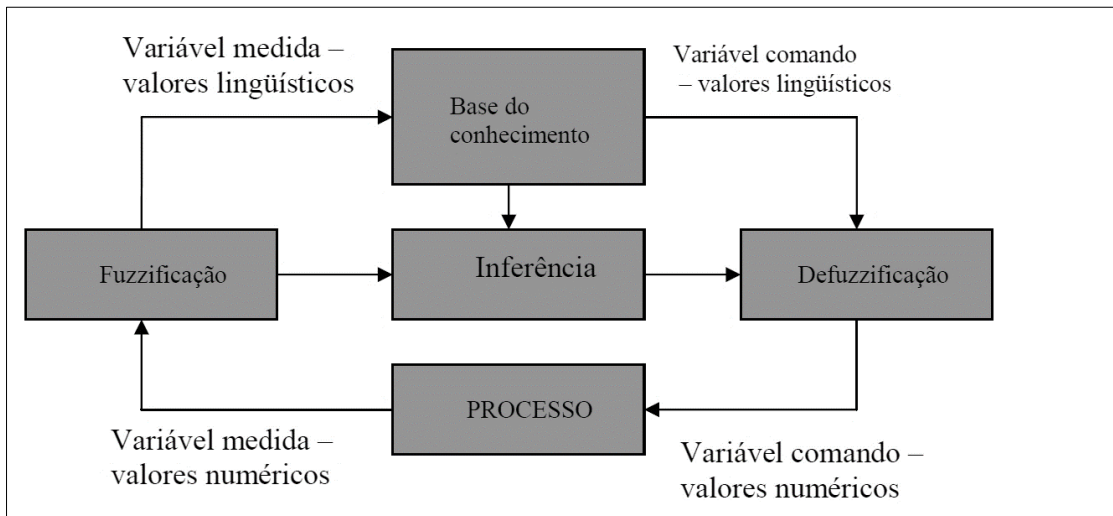


Figura 2.7. Arquitetura de um controlador *fuzzy*.

Fonte: Adaptado de Lacerda (2009).

Segundo Filho; Gosmann; Bauchspiess (2002), essas ações são explicadas da seguinte forma:

- A “fuzzificação” é responsável pelo mapeamento das entradas numéricas em conjuntos *fuzzy*, estes valores são então “fuzificados” para que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas;
- A base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado, consiste de uma base de dados e uma base de regras. A base de dados fornece definições numéricas e a base de regras caracteriza os objetivos do controlador e sua estratégia usada, geralmente fornecida por pessoas especialistas no sistema;
- A “inferência” é realizada alterando-se valores linguísticos de entrada em valores linguísticos de saída com o uso das regras;
- Na “defuzzificação” transforma-se os valores linguísticos de saída em valores numéricos de saída. Esta função é realizada por uma interface de “defuzzificação”, obtendo-se um valor discreto que possa ser usado numa ação de controle no mundo real.

Existem dois modelos de controladores *fuzzy* que se destacam na literatura: o Mandani (1975) e o Takagi-Sugeno (1985). Esses modelos diferenciam-se pelo modo no qual calculam-se as saídas dos controladores para o sistema, ou seja, como cada

modelo transforma um valor do Domínio *Fuzzy* para uma saída matemática aplicável na planta (Vasconcellos; Cavalcante; Araújo, 2016). A seguir, detalha-se o modelo *Fuzzy Takagi-Sugeno* (TS), que será o utilizado neste trabalho.

2.7.2. Modelo fuzzy Takagi-Sugeno (TS)

O método Sugeno ou Takagi-Sugeno-Kang, de inferência *fuzzy* foi introduzido em 1985 e é similar ao método Mamdani em muitos aspectos. As duas primeiras partes do processo de inferência *fuzzy*, fuzzificando as entradas e aplicando o operador *fuzzy*, são exatamente as mesmas. A principal diferença entre Mamdani e Sugeno é que as funções de participação de saída do Sugeno são lineares ou constantes (*Fuzzy Logic Toolbox*TM, 1995–2018). Nesse modelo as regras são da forma:

SE Entrada 1 = x e Entrada 2 = y, **ENTÃO** Saída é z = ax+by+c

Para um modelo Sugeno de ordem zero, o nível de saída z é uma constante (a = b = 0). O nível de saída z_i de cada regra é ponderado pela força de disparo w da regra.

Por exemplo, para uma regra “E” com Entrada 1 = x e Entrada 2 = y, a força de disparo é dada pela Equação (24):

$$w_i = \mathbf{E} (F_1(x), F_2(y)) \quad (24)$$

onde $F_{1,2}(x)$ são as funções de associação das Entradas 1 e 2.

A saída final do sistema é a média ponderada de todas as saídas da regra, calculada pela Equação (25).

$$Saída\ Final = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (25)$$

em que N é o número de regras.

Para ilustra o que foi dito anteriormente, a Figura 2.8 mostra um diagrama com uma regra de Sugeno operando.

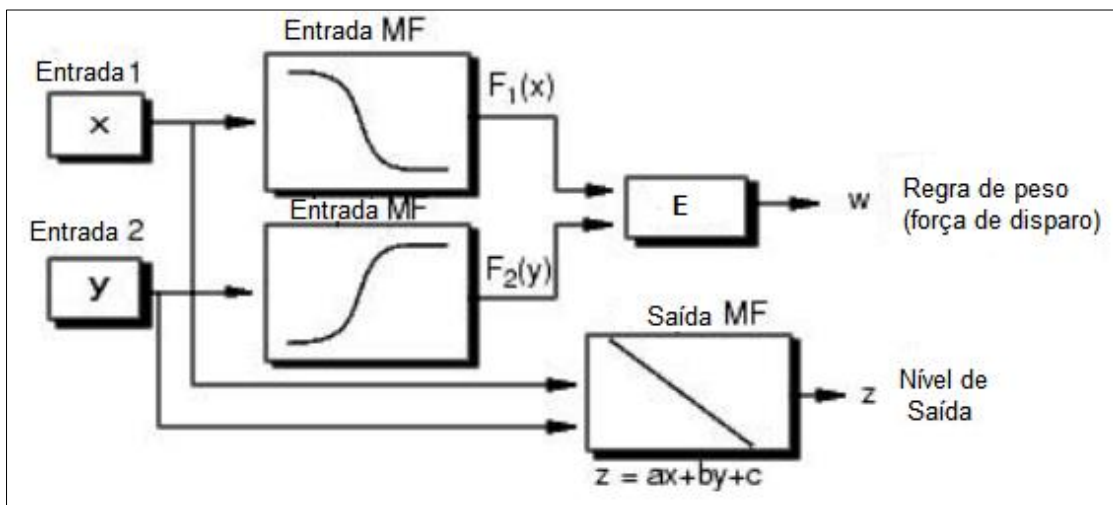


Figura 2.8. Diagrama de uma regra de Sugeno operando.

Fonte: Adaptado de *Fuzzy Logic Toolbox™* (1995–2018).

2.8. Estrutura do controlador PI-Fuzzy

O controlador PI-Fuzzy é bastante similar ao controlador PI, considerando que ambos possuem duas entradas e uma saída. Antes de discorrer sobre o controlador PI-Fuzzy, será feita uma breve introdução sobre o controlador PI.

A atuação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional com uma ação integral. Desta forma pode-se melhorar a resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, enquanto a ação integral corrige o erro de estado estacionário (Araújo, 2007). A Equação (26) mostra o controlador PI, cujo ganho proporcional (K_p) também multiplica o termo integral:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_i} \int e(t) \quad (26)$$

onde $e(t)$ é o erro no tempo contínuo e é definido como sendo a diferença entre a variável de processo (PV) e o *setpoint* (SP). O erro pode ser definido como PV-SP se a ação for direta ou SP-PV se a ação do controlador for reversa. O termo T_i é o tempo integral.

Aplicando a transformada de Laplace à Equação (26) e considerando as condições iniciais nulas, a função de transferência $G(s)$ do controlador PI é obtida e definida pela Equação (27).

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{sTi} \right) \quad (27)$$

Em alguns controladores o ajuste do termo integral será o tempo integral em segundos ou minutos por repetição, outros escolhem o ganho integrativo (K_i) que é dado por $K_i = \frac{Kp}{Ti}$. O grande benefício da sua utilização é a eliminação do erro em regime permanente (Galvão, 2016).

Segundo Lacerda (2009), a diferença entre um controlador PI convencional e um PI-*Fuzzy*, são as regras que avaliam o erro e sua tendência de modo a fornecer o melhor sinal de controle. Um dos méritos deste tipo de controlador é o de se poder definir vários pontos de operação, justamente por ser baseado em regras, podendo ser aplicado a controles não lineares.

O controlador PI-*Fuzzy* utiliza o erro e sua derivada para gerar o sinal de controle, com o objetivo de eliminar o erro em regime permanente. Como mostra a Equação (28), em que: $e(t-1)$ é o erro no tempo anterior, $de(t)$ é a variação do erro, $du(t)$ é a variação na saída u e T_s é o tempo de amostragem, assim:

$$du(t) = K_p de(t) + \frac{K_p}{T_i} e(t-1)T_s \quad (28)$$

Desse modo, o embasamento teórico e o equacionamento apresentado neste capítulo, será de grande importância para o desenvolvimento da metodologia deste trabalho, a qual será exibida no capítulo quatro. Bem como, para a obtenção dos resultados, mostrados no capítulo cinco.

Capítulo 3
Estado da arte

3. Estado da arte

O primeiro interesse em aplicar sistema *fuzzy* foi em 1985 pelos japoneses Seiji Yasunobu e Soji Miyamoto, que apresentaram simulações de sistemas *fuzzy* em uma estrada de ferro de Sendai. Em seguida, em 1987, houve um encontro internacional de pesquisadores de lógica difusa, em Tóquio, Japão, e foram demonstrados diversos trabalhos com tais aplicações. Desde então, em 1988, foi fundado o laboratório internacional de engenharia *fuzzy* (LIFE), uma cooperativa que compreendia 48 companhias para pesquisa nesses sistemas (Albertos, 1992 *apud* Rignel; Chenci; Lucas, 2011).

Posteriormente foram desenvolvidas algumas aplicações de controladores mecânicos/computacionais, segundo (Albertos, 2002 *apud* Rignel; Chenci; Lucas, 2011), tais como:

- Aspiradores de pó Matsushita, que usam controladores de 4 bits rodando ritmos de sensores de pó e ajustam o poder de sucção;
- Máquinas de lavar Hitachi, com controladores *fuzzy* para controle de peso, verificação de tipo de tecido e sensores de sujeira, designando automaticamente os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água e detergente;
- Câmera fotográfica desenvolvida pela Canon, com autofoco capaz de medir a claridade de imagens em seis regiões do campo de visão, usando a informação obtida para determinar se a câmera está no foco;
- Ar condicionado industrial projetado pela Mitsubishi, que usa 25 regras de resfriamento e 25 regras de aquecimento. Comparado ao projeto anterior, o novo ar condicionado aquecia 5 vezes mais rápido, reduzindo o consumo de potência em 24% e usando menos sensores;
- Máquina de lavar pratos baseado em um controlador *fuzzy* e um *one stop sensing module* que combina um teristor (para medida de temperatura), um sensor condutivo (para medir o nível de detergente através dos íons presentes na água), um sensor de turvação que difunde a medida e transmite luz para medir a sujeira na lavagem, e um sensor magnético para ler a taxa de giro.

Desse modo, a lógica *fuzzy* tem sido usada em uma variedade de aplicações na indústria do petróleo, Mata et al. (2003) mostra uma das utilizações em elevação artificial. Em que os princípios mais importantes de uma análise de problemas de *Gas-Lift* e como ela pode ser integrada usando a análise de lógica difusa para lidar com a

complexidade do processo de levantamento e as incertezas dos dados. O objetivo do sistema descrito neste trabalho é determinar qual, dentre todos os possíveis pontos de injeção, é o que mais se ajusta às condições atuais de produção.

Na indústria petrolífera, os sistemas de controle moderno vêm ganhando destaque, pois durante o processo de operação tornou-se possível acompanhar o desempenho produtivo de poços e adequá-lo ao desejado através dos conceitos de controle. As técnicas da área de controle podem proporcionar ganhos, como: o aumento da confiabilidade dos sistemas, aumento no nível de segurança das unidades, a minimização da necessidade de reprocessamento e o aumento do nível de qualidade dos produtos, bem como a liberação de mão de obra de atividades manuais e repetitivas (Galvão, 2016).

Assim, segundo Bergeron; Cooksey; Reppel (1999), controladores de fluxo estão sendo empregados para melhorar a eficiência do processo de injeção em aplicações de *Gas-Lift*, para que a lucratividade dos poços aumente. A seguir apresenta-se alguns trabalhos que utilizam o sistema de controle para maximizar a vazão de produção e diminuir a quantidade de gás injetado em poços operando por *Gas-Lift* Contínuo.

No trabalho de Bergeron; Cooksey; Reppel (1999) são apresentados dois casos de campo para um sistema automatizado de controle de *Gas-Lift* Contínuo, que ilustra como um uso mais eficiente de gás de injeção resulta em menores custos de injeção e, em alguns casos, aumento da produção de petróleo. O caso 1 mostra os benefícios de manter uma taxa de injeção constante, regulando a produção. E também que quando a taxa de injeção de gás ideal para o poço aumenta, a produção não aumenta, diminui. A conclusão foi que sem o controle de taxa constante e monitoramento do controlador eletrônico, a produção de poços e o uso de *Gas-Lift* seriam instáveis e ineficientes. O caso 2 discute uma aplicação remota de um único poço que sofre de perda de produção por causa do congelamento da linha de injeção no *choke* de injeção e ilustra como o uso de controladores eletrônicos de *Gas-Lift* elimina o problema.

Outro trabalho que descreve a sistemática de minimizar o consumo de gás e aumentar a produção é o de Spíndola (2003), que apresenta um sistema de controle automático para o gerenciamento da injeção de gás em um poço com *Gas-Lift*, visando otimizar a relação entre o volume de óleo produzido e o consumo de gás injetado. O gerenciamento da quantidade de gás a ser injetada é feito através do controle da pressão de revestimento do poço por meio de um algoritmo de controle especificamente desenvolvido que permite, também, coleta e armazenamento de dados.

Moura (2004) desenvolveu um simulador computacional, SGALI, que permite a análise do comportamento de poços que operam com o método de elevação por *Gas-Lift* Contínuo. Nele, após as etapas de simulação para alcançar a curva de desempenho do poço, pode-se utilizar algoritmos de controle que usam a curva de desempenho como referência para simular adequadamente ajustes da pressão do revestimento de modo a obter a condição ótima de produção. Ou seja, maximizar a vazão produzida com a menor injeção de gás possível.

Um trabalho mais recente com o mesmo objetivo é o de Campos et al. (2017), que apresenta um algoritmo de controle avançado para a otimização de *Gas-Lift* de poços *offshore* que visa aumentar a produção de petróleo. Este controle usa conhecimento qualitativo de operadores e engenheiros para implementar regras heurísticas para a otimização. Este conhecimento foi representado em uma linguagem de alto nível, que pode executar ações paralelas, etapas de otimização, monitorar variáveis de processo, interagir com as operadoras através de interfaces, modificar os procedimentos de otimização durante os distúrbios, como um desligamento do compressor, etc. Já foi implantado em duas plataformas de produção *offshore* da PETROBRAS, permitindo ganhos de produção de cerca de 1% do potencial dos poços.

Capítulo 4
Metodologia e desenvolvimento

4. Metodologia e desenvolvimento

Neste capítulo será mostrado a estrutura do simulador utilizado, o *TraceLiftLaut*, para implementação do controle, assim como a metodologia empregada para o desenvolvimento do controle PI-fuzzy.

4.1. Simulador *TraceLiftLaut*

O programa *TraceLift* é um simulador de poços de petróleo operando por *Gas-Lift* Contínuo, desenvolvido pelo Eng. Kwon Il Choi. O mesmo é utilizado pela PETROBRAS para simulação, análise dinâmica e dimensionamento de sistemas operando por GLC. Com a finalidade de evolução do *software*, uma parceria entre a PETROBRAS e UFRN foi firmada através de um projeto de pesquisa, “*TraceLift – melhorias e adequações*”, para o desenvolvimento de uma ferramenta baseada na versão do *TraceLift* já existente, sendo denominada de *TraceLiftLaut*. Como essa parceria foi consolidada recentemente, o projeto se encontra em andamento e o programa com ajustes a serem feitos.

A Figura 4.1 apresenta a interface do *TraceLiftLaut*, com a tela de dados de entrada para a configuração do poço. Em cada aba, informações são inseridas sobre: 1- dados gerais; 2- geometria do sistema; 3 - reservatório, fluidos, superfície; 4 - coluna de produção; 5 - linha de fluxo; 6 - linha de injeção; 7 - válvulas de *Gas-Lift*; 8 - outras configurações.

The screenshot shows the 'MainWindow' of the TraceLiftLaut software. The interface includes a menu bar (Arquivo, Ação, Dados) and a toolbar with icons for file operations and simulation control. Below the toolbar is a tabbed interface with the following tabs: 'Dados Gerais', 'Sistema', 'Reservatório/Fluido/Superfície', 'Coluna de Produção', 'Linha de Fluxo', 'Linha de Injeção', 'GasLift', and 'Outras Configurações'. A red box labeled 'Abas' highlights the tab bar. The 'Reservatório/Fluido/Superfície' tab is selected, displaying several data entry sections:

- Dados do Reservatório:** Includes fields for 'Profundidade Média dos Canhoneados' (m), 'Pressão do Reservatório' (kgf/cm²), 'Índice de Produtividade' (m³/d/kgf/cm²), 'Índice de Fluxo Reverso' (x Índ. Produt.), 'Temperatura do Reservatório' (°C), and 'Gradiente Geotérmico' (°C/m).
- Dados de Fluido:** Includes fields for 'Grau API', 'RGO' (m³/m³), 'Densidade do Gás Produzido', 'BSW' (%), 'Densidade da Água', 'Densidade do Fluido de Amortecimento', and 'Densidade do Gás Injetado'.
- Dados da Superfície:** Includes fields for 'Temperatura Ambiente da Superfície' (°C), 'Pressão de Saída' (kgf/cm²), 'Pressão de Injeção do Gás' (kgf/cm²), and 'Vazão Máxima de Injeção de N2' (scf/min).
- Correlações do Fluido:** Includes dropdown menus for 'Pb, Rs', 'Bo', 'Uo', 'Ug', and 'Tensão Superficial' (Baker-Sverdrloff).

Red circles and lines are overlaid on the image to indicate the locations of labels 1 through 8. Label 1 points to the 'Dados Gerais' tab, label 2 to the 'Dados do Reservatório' section, label 3 to the 'Reservatório/Fluido/Superfície' tab, label 4 to the 'Coluna de Produção' tab, label 5 to the 'Linha de Fluxo' tab, label 6 to the 'Linha de Injeção' tab, label 7 to the 'GasLift' tab, and label 8 to the 'Outras Configurações' tab.

Figura 4.1. Tela de entrada de dados do *TraceLiftLaut*.

A Figura 4.2 mostra a tela onde é possível verificar e acompanhar o comportamento do poço no tempo através da saída serial do computador, mostrando todos os valores de vazões e pressões associado ao presente passo de tempo de simulação. Cada item enumerado na Figura 4.2 corresponde a: 1 - Barra de ações do *TraceLiftLaut* composta pelos seguintes botões da esquerda para direita: nova simulação; abrir dados para simulação; salvar simulação; salvar como a simulação; fechar programa; configurar dados do poço; visualizar animação do poço; aplicar dados; iniciar, pausar e parar simulação; 2 - Animação Gráfica do Poço; 3 - Área gráfica das pressões; 4 - Área gráfica das vazões; 5 - Válvulas de *Gas-Lift*.

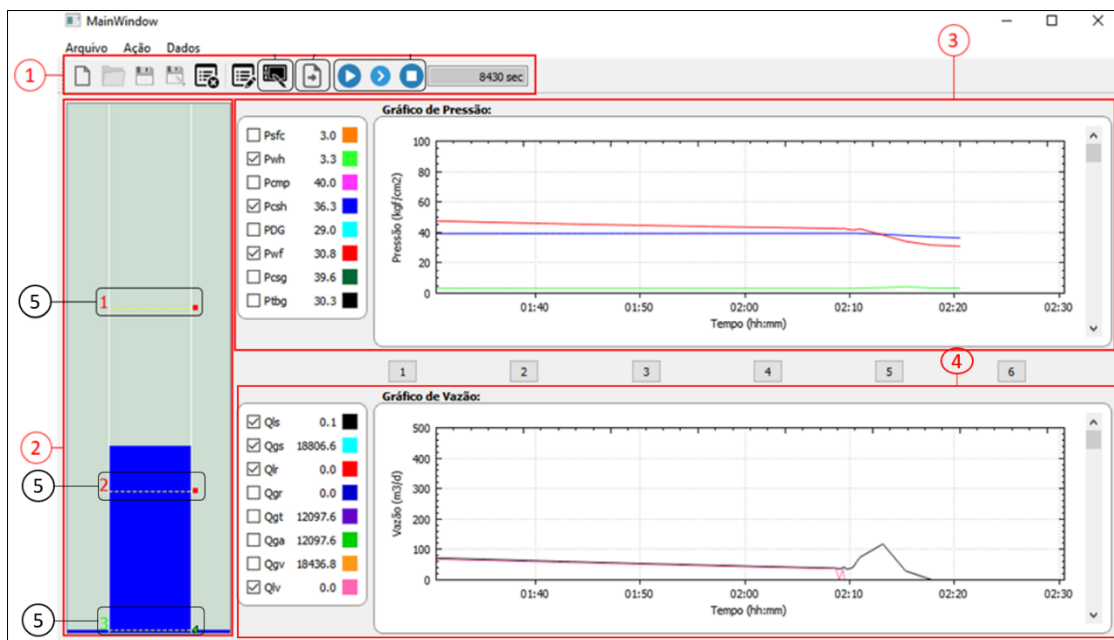


Figura 4.2. Tela de acompanhamento da simulação do *TraceLiftLaut*.

Na Figura 4.2 são apresentadas as seguintes variáveis para o conjunto de pressões (kgf/cm²): pressão de superfície (Psfc), pressão de fluxo na cabeça do poço (Pwh), pressão no compressor (Pcmp), pressão na cabeça do revestimento (Pcsh), pressão no reservatório (PDG), pressão de fluxo no fundo do poço (Pwf), pressão de revestimento na profundidade da válvula de operação (Pcsq), pressão da coluna na profundidade da válvula de operação (Ptbq). E para o de vazões (m³/d) são: vazão de líquido produzido (Qls), vazão de gás produzido (Qgs), vazão de líquido do reservatório (Qlr), vazão de gás do reservatório (Qgr), vazão de gás total (gás do reservatório + gás do método *Gas-Lift*) (Qgt), vazão de gás injetado no anular (Qga), vazão total de gás nas válvulas de *Gas-Lift* (Qgv), vazão total de líquido nas válvulas de *Gas-Lift* (Qlv).

4.2. Lógica do controle

A injeção excessiva de gás em um poço operando por GLC não é a solução para aumentar o volume de líquido produzido, pois a injeção aumenta as forças de atrito ao longo do escoamento. Dessa maneira, verifica-se que existe uma vazão ótima de injeção de gás para cada poço em um determinado momento, para resultar na melhor condição de produção. Para o GLC, o ideal seria que a taxa ótima de injeção pudesse ser constante. No entanto, mudanças no reservatório, na pressão de injeção, na vazão total de gás disponível para injeção e produção de água, são variáveis dinâmicas que afetam a produção (Spíndola, 2003).

Neste trabalho, o controle da quantidade de gás a ser injetado é feito através do gerenciamento da pressão de revestimento do poço. Para tanto, utilizou-se o *TraceLiftLaut*, que permite a coleta/armazenamento de dados tanto da pressão de revestimento (P_r) quanto da pressão de fluxo no fundo do poço (P_{wf}), e comanda, através de um algoritmo de controle *PI-fuzzy*, a abertura e fechamento da válvula controladora de injeção de gás na superfície (*choke*).

4.2.1. Gerenciamento da pressão de revestimento

Para o gerenciamento da pressão de revestimento, utilizou-se uma lógica similar a que Spíndola (2003) utilizou em seu trabalho. O processo de busca e atualização do *setpoint* da P_r e P_{wf} se inicia, utilizando duas estratégias, mas para que elas ocorram inicialmente deve-se atingir a seguinte condição: se o módulo do erro da P_{wf} for maior ou igual 1, o código de atualização dos *setpoints* da P_r e P_{wf} é executado da seguinte forma: se o valor atual da P_{wf} for menor ou igual ao do *setpoint* da P_{wf} , calcula-se um novo valor para o *setpoint* da P_r e o novo *setpoint* da P_{wf} vai receber o valor atual da P_{wf} ; se não, apenas o *setpoint* da P_r é atualizado. Agora, se o módulo do erro da P_{wf} não for maior ou igual 1, os valores anteriores dos *setpoints* da P_r e da P_{wf} são mantidos. A seguir, encontra-se o trecho do código descrito.

SE ($|\text{Erro}P_{wf}| \geq 1$)

SE ($\text{Nova}P_{wf} \leq \text{SP}_{P_{wf}}$)

$\text{SP}_{P_r} = \text{SP}_{P_r} + (\text{Erro}P_{wf}/|\text{Erro}P_{wf}|) \text{ passo}$

$\text{SP}_{P_{wf}} = \text{Nova}P_{wf}$

SE NÃO

$$SP_{Pr} = SP_{Pr} + (Pr - Pr') / 2$$

SE NÃO

Os valores anteriores de SP_{Pr} e SP_{Pwf} são mantidos

onde NovaPwf é o valor atual da Pwf, SP_{Pwf} é o *setpoint* da Pwf, SP_{Pr} é o *setpoint* da Pr, Pr é o valor atual da Pr, Pr' é valor anterior armazenado na memória, o passo, que é um incremento ou decréscimo no novo *setpoint* da Pr é obtido pela Equação (29):

$$passo = \frac{(Pwf - Pwf')}{(Pr - Pr')} \quad (29)$$

onde Pwf é o valor no instante atual da Pwf e Pwf' é valor anterior de Pwf armazenado na memória. O erro percentual da Pwf é obtido pela Equação (30):

$$ErroPwf = \frac{(Pwf - SP_{Pwf})100}{SP_{Pwf}} \quad (30)$$

o sinal do cálculo do erro da Pwf é que dirá o sentido da busca do novo *setpoint* da Pr.

O controlador inicia com o *setpoint* da Pr (SP_{Pr}) igual a Pr inicial e o *setpoint* da Pwf (SP_{Pwf}) igual Pwf inicial. Nesse momento o passo será zero, pois, o valor anterior da Pwf e da Pr que se tem armazenado na memória é praticamente o mesmo valor atual da Pwf e da Pr. Assim, não há atualização do *setpoint* da Pr e da Pwf. Em seguida, aguarda-se um tempo de espera (600s) para que seja realizada a leitura da Pwf, com isso, efetua-se uma nova análise e tomada de decisão. A partir de então, SE ($ErroPwf \geq 1$) ENTÃO executa-se o código de atualização dos *setpoint* (SP_{Pr} e SP_{Pwf}), SENÃO os valores anteriores de SP_{Pr} e SP_{Pwf} são mantidos.

Existem limites mínimos e máximos da Pr (Pr_{min} e Pr_{max}) que servem como limites de cálculo para o *setpoint* da Pr, ou seja, caso em algum instante o cálculo do SP_{Pr} ultrapasse um desses limites, o valor do SP_{Pr} será o valor de um dos limites. Onde Pr_{min} é a mínima pressão no revestimento necessária para manter o poço “vivo”, ou seja, manter o poço em condições de produção. E Pr_{max} , é a máxima pressão a ser injetada no revestimento do poço. É geralmente, limitada pela capacidade dos compressores.

4.2.2. Controle da abertura e fechamento do *choke* de injeção

A abertura e fechamento da válvula controladora de injeção de gás na superfície (*choke*) é feita através de um algoritmo de controle PI-*fuzzy*, o qual possui duas variáveis de entrada (erro da pressão de revestimento e variação do erro da pressão de revestimento) e uma de saída (variação no comando da abertura do *choke* de injeção).

4.2.2.1. Variáveis de entrada

Duas variáveis de entrada foram utilizadas, erro da pressão de revestimento ($SP_{Pr} - Pr$) e variação do erro da pressão de revestimento ($Erro_{Pr}$ (erro atual da Pr) - $Erro_{Pr}'$ (erro anterior da Pr)), codificadas como: $Erro_{Pr}$ e $dErro_{Pr}$, respectivamente. Como foram definidas duas variáveis de entrada será aplicado o operador mínimo (w) no cálculo da saída final.

4.2.2.1.1. Variável erro da pressão de revestimento

A função $Erro_{Pr}$ possui duas funções de pertinências trapezoidal e três triangular, com as seguintes variáveis linguísticas: G_n (Erro Grande Negativo), P_n (Erro Pequeno Negativo), Z (Erro Zero), P_p (Erro Pequeno Positivo), G_p (Erro Grande Positivo). A Figura 4.3 mostra as funções de pertinência da função $Erro_{Pr}$.

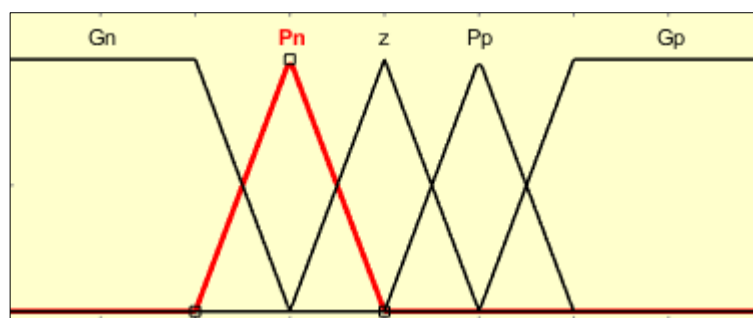


Figura 4.3. Funções de pertinência da função $Erro_{Pr}$.

Fonte: Autor (2019).

Para as funções de pertinência no formato triangular, os seus limites de atuação são dados pelos parâmetros $\{a, b, c\}$, onde “ b ” é o ponto central, onde $\mu=1$ e “ a ” e “ c ”, são os extremos, onde $\mu=0$. Já para as funções do tipo trapezoidal, os valores dos termos

são dados pelos parâmetros $\{a, b, c, d\}$, onde “a” e “d” são os limites inferiores, quando $\mu=0$ e “b” e “c” são os limites superiores, quando $\mu=1$.

Alguns dos limites utilizados nas funções de pertinência neste trabalho não são fixos, pois cada vez que ocorre uma nova atualização do *setpoint* da Pr esses valores se ajustam. Os limites de cada função de pertinência são: Gn $\{-1000, -999, \text{negErro}, \text{negErro}/2\}$, Pn $\{\text{negErro}, \text{negErro}/2, 0\}$, Z $\{\text{negErro}/2, 0, \text{posErro}/2\}$, Pp $\{0, \text{posErro}/2, \text{posErro}\}$ e Gp $\{\text{posErro}/2, \text{posErro}, 999, 1000\}$. Assim, sendo configuradas para sempre ficarem centralizadas e os limites não fixos são calculados a partir de uma variável *negErro* (erro negativo) ou *posErro* (erro positivo), que são dadas pelas Equação (31) e (32), respectivamente.

$$\text{negErro} = Pr_{\min} - SP_{Pr} \quad (31)$$

$$\text{posErro} = Pr_{\max} - SP_{Pr} \quad (32)$$

Porém, quando o *setpoint* da Pr fosse igual a um dos limites da Pr, as funções de pertinências ficariam sobrepostas, o que não é correto. Então, foi necessário adicionar uma condição de parada, ou seja, o *setpoint* só pode ir até 0,1 de diferença dos limites, para assim manter a estrutura das funções de pertinência.

4.2.2.1.2. Variável variação do erro da pressão de revestimento

A função *dErroPr* possui uma função de pertinência triangular e duas trapezoidal, com as seguintes variáveis linguísticas: N (variação do Erro Negativa), z (variação do Erro Zero), P (variação do Erro Positiva). A Figura 4.4 ilustra as funções de pertinência da variável de entrada *dErroPr*.

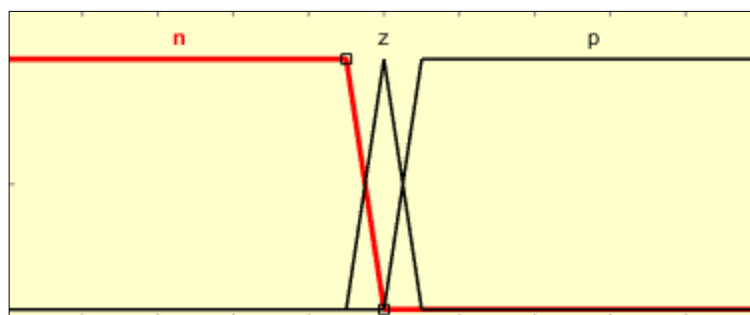


Figura 4.4. Funções de pertinência da função *dErroPr*.

Fonte: Autor (2019).

Os limites das funções de pertinência dessa função são fixos. Para a função N os limites são $\{-1000, -999, -1, 0\}$, para z são $\{-1, 0, 1\}$ e para P são $\{0, 1, 999, 1000\}$.

4.2.2.2. Variáveis de saída

Para calcular a saída do controlador *PI-fuzzy* foram utilizadas três funções lineares, com as seguintes variáveis linguísticas: PI_1 (controlador agressivo), PI_2 (controlador operacional) e PI_3 (controlador lento). Cada uma delas corresponde a um controlador PI com seus conjuntos de K_p e T_i . Assim, cada função de saída ativada terá um valor para K_p e T_i diferente, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros de K_p e T_i para cada tipo de controlador.

Tipo do Controlador	K_p	T_i	Nomenclatura utilizada para o conjunto de K_p e T_i
Agressivo	0,5 K_p	2 T_i	PI_1
Original	0,05 K_p	20 T_i	PI_2
Lento	0,005 K_p	200 T_i	PI_3

Com o intuito de encontrar uma regra de sintonia para o controle, aplicou-se o método do degrau ao sistema real e aproximou-o a um de primeira ordem com atraso através da Equação (33):

$$G_m(s) = \frac{K_m e^{-s\tau_m}}{1+sT_m} \quad (33)$$

onde K_m é o ganho estático do sistema dado pela diferença entre o valor inicial e o valor final da variável em estudo (Pr), T_m é a constante de tempo encontrada pela diferença entre o tempo para atingir 63% do valor final da variável em estudo e o tempo que o sistema começa a reagir após o degrau, e τ_m é o tempo de atraso dado pela diferença entre o tempo que o sistema começa a reagir após o degrau e o tempo que começa o degrau.

Através da Figura 4.5, percebe-se que o modelo estimado possui o mesmo comportamento que o sistema real.

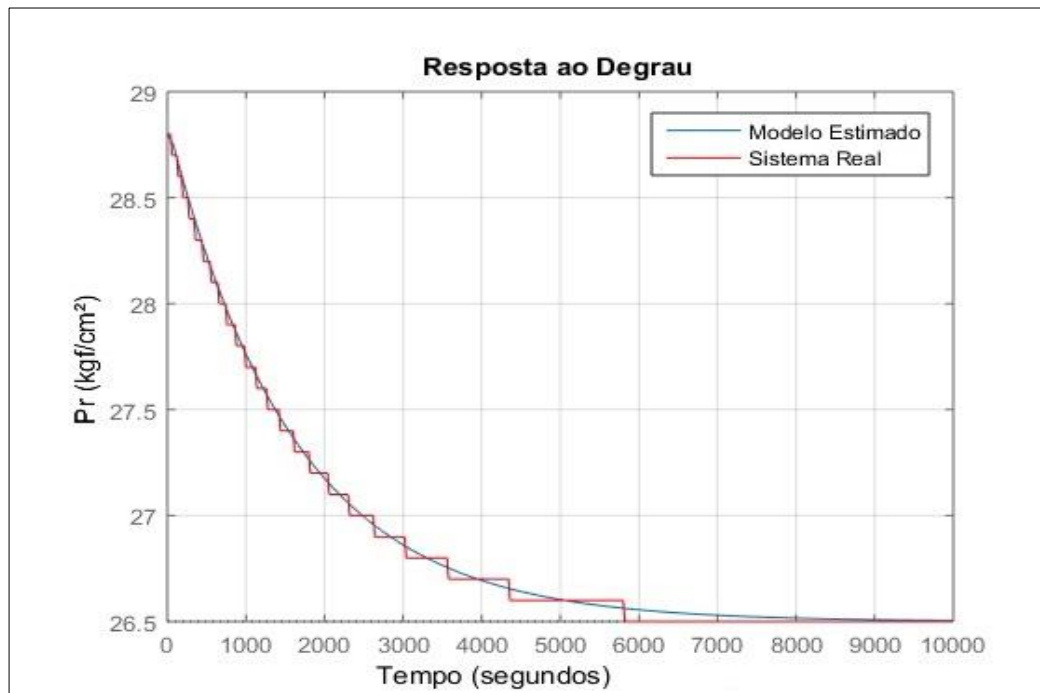


Figura 4.5. Resposta ao degrau.

Fonte: Autor (2019)

Com isso, encontrou-se os seguintes valores das constantes: $K_m = 2,3$; $T_m = 1.600$ e $\tau_m = 40$. Assim, K_p e T_i são calculados a partir do método do mínimo ISTSE de Fukura & Tamura (1983). Em que, são obtidos pelas Equação 34 e 35, respectivamente:

$$K_p = \frac{1}{K_m} \left[0,56 \frac{T_m}{\tau_m} + 0,2 \right] \quad (34)$$

$$T_i = T_m + 0,36\tau_m \quad (35)$$

De posse dos valores de K_m , T_m e τ_m , os resultados de K_p e T_i foram 9,8 e 1.614,4, respectivamente.

Com isso, é possível obter os valores de K_p e T_i de cada regra e calcular a saída através da Equação (28), onde o tempo de amostragem (T_s) para este trabalho é 600s. O valor encontrado corresponde ao z_i da Equação (25), a qual retorna a saída final do sistema, ou seja, a variação da abertura ou fechamento do *choke*. A variável w_i que se encontra na Equação (25) corresponde a força de disparo das funções de entrada, como

são duas, escolhe-se o menor valor correspondente a cada uma delas. Caso no controlador *fuzzy* mais de uma regra for ativada em determinado momento, deve-se encontrar a saída do controlador PI e a força de disparo de cada função e assim fazer o somatório como mostra a Equação (25), assim encontrando a saída final do controlador PI-*fuzzy*.

Desse modo, o algoritmo verifica o valor do diâmetro do *choke* anterior e soma com o resultado da saída final, caso a variação seja negativa, o diâmetro do *choke* irá diminuir e se for positiva, irá aumentar. Internamente o algoritmo trabalha com valores reais do diâmetro do *choke*, porém quando vai retornar esse valor de saída como entrada para o simulador para novos cálculos, o valor é arredondado e passa a ser um valor inteiro.

Porém para que o simulador receba a nova abertura do *choke*, é necessário passar por uma condição:

SE ($|\text{ErroPr}| \geq 2$)

Recebe a saída final do controlador PI-*fuzzy*

SE NÃO

Mantém o último valor da saída do controlador PI-*fuzzy*

onde o erro percentual da Pr é obtido pela Equação (36):

$$\text{ErroPr} = \frac{(Pr - SP_{Pr})100}{SP_{Pr}} \quad (36)$$

A Figura 4.6 apresenta um fluxograma com a sequência de cálculos utilizado no desenvolvimento do controle. Em que, inicialmente aguarda-se um tempo de amostragem de 600s para verificar se o erro da Pwf é ou não maior ou igual a 1: se não, irá analisar a condição do erro da Pr maior ou igual a dois; se sim, irá verificar se o *setpoint* da Pwf é maior ou igual ao novo valor da Pwf: se sim, os *setpoints* da Pr e da Pwf serão atualizados; se não, atualiza apenas o *setpoint* da Pr. O próximo passo será conferir se o *setpoint* da Pr é menor que o limite mínimo da Pr: se sim, o *setpoint* da Pr irá receber o valor do limite mínimo da Pr; se não, irá examinar se o *setpoint* da Pr é maior que o limite máximo da Pr: se sim, o *setpoint* da Pr irá receber o valor máximo do limite da Pr; se não, irá atualizar as funções de pertinência de acordo com os valores do *setpoint*

da Pr. Com isso, verifica-se se o erro da Pr é maior igual a dois, se for, irá atualizar o diâmetro do *choke*; se não, mantém o diâmetro anterior do *choke*.

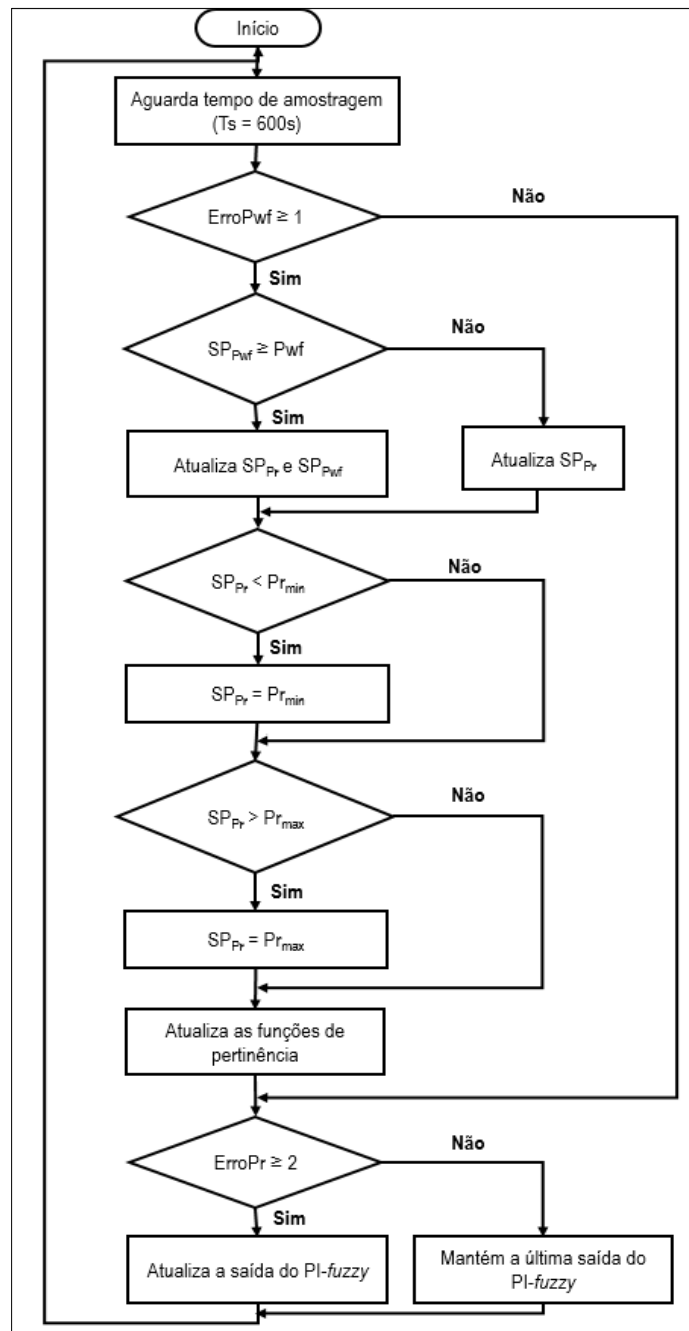


Figura 4.6. Fluxograma do processo de controle desenvolvido.

Fonte: Autor (2019).

4.2.2.3. Regras fuzzy

A partir das cinco funções de pertinência da função erro da Pr e das três funções de pertinência da função variação do erro da Pr, foi possível criar 15 regras para a lógica fuzzy, como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Regras para o controlador PI-fuzzy.

		Erro da Pr				
		Gn	Pn	Z	Pp	Gp
Variação do erro da Pr	N	PI ₃	PI ₃	PI ₂	PI ₁	PI ₁
	z	PI ₃	PI ₂	PI ₂	PI ₂	PI ₃
	P	PI ₁	PI ₁	PI ₂	PI ₃	PI ₃

Desse modo, essas regras vão funcionar da seguinte maneira:

- Se Gn e N então PI₃ - isso significa que o erro está muito grande negativo e tende cada vez mais para esquerda, ficando assim mais negativo, então optou-se por um controlador lento para evitar que o erro fique mais negativo.
- Se Gn e z então PI₃ - significa que o erro está muito negativo, porém não tem muita variação do seu valor, ou seja, está “parado”. Assim, preferiu-se colocar o PI₃, fazendo com que fique mais lento e permaneça nessa região.
- Se Gn e P então PI₁ - significa que o erro está muito negativo, porém está saindo dessa região, então optou-se por um PI₁ que é para forçar a sair mais rápido da região negativa.
- Todas essas regras descritas anteriormente, ocorre ao contrário para o limite superior do erro (Gp) em relação a variação do erro.
- Se Pn e N então PI₃ – significa que o erro está pequeno negativo, mas tendendo cada vez mais para o limite inferior, então preferiu-se deixar o sistema lento.
- Se Pn e z então PI₂ – o erro se encontra pequeno negativo e não tem muita variação no seu valor, ou seja, está “parado”. Então deixou-se agir naturalmente.
- Se Pn e P então PI₁ – o erro pequeno negativo e está saindo dessa região, então optou-se por um controlador mais agressivo para que saia mais rápido.
- Essas três regras ditas acima acontecem também para o lado pequeno positivo do erro (Pp), só que ao contrário em relação a variação do erro.
- Dentro da região do zero, ou seja, próximo ao *setpoint* da Pr, o erro pode se “mover” para qualquer lado, então pode-se escolher qualquer controlador, mas escolheu-se um PI₂.

4.3. Dados de entrada

Para testar o controle desenvolvido, foram utilizados dados de um poço terrestre operando por *Gas-Lift* Contínuo. A Tabela 4.3 mostra os dados de entrada do reservatório.

Tabela 4.3. Dados do reservatório.

Prof. Média dos canhoneados (m)	Pressão do reservatório (kgf/cm²)	Índice de Produtividade (m³/d/kgf/cm²)	Temperatura do reservatório (°C)
926	29	0,23	52

A Tabela 4.4 apresenta os dados de entrada utilizados do fluido.

Tabela 4.4. Dados de fluido.

Grau API	RGO (m³/m³)	Densidade relativa do gás produzido	BSW (%)	Densidade relativa da água	Densidade relativa do fluido de amortecimento	Densidade relativa do gás injetado
41	300	0,82	1	1,01	1	0,75

A Tabela 4.5 exibe os dados usados da superfície.

Tabela 4.5. Dados da superfície.

Temperatura ambiente da superfície (°C)	Pressão de Saída (kgf/cm²)	Pressão de injeção do gás (kgf/cm²)
30	3	40

A Tabela 4.6 mostra os dados de entrada da coluna de produção.

Tabela 4.6. Dados da coluna de produção.

Comp. (m)	MD (m)	Ângulo (°)	TVD (m)	Diâm. Externo (pol)	Diâm. Interno (pol)	Rugosidade (pol)	Diâm. Int. do revestimento (pol)
926	926	90	926	2 3/8	1,995	0,0018	6,366

A Tabela 4.7 exhibe os dados de entrada sobre as válvulas de *Gas-Lift*.

Tabela 4.7. Dados das válvulas de *Gas-Lift*.

Nº	MD (m)	Tipo	OD (pol)	Port Size (pol)	Ptro (kgf/cm ² @ 80 °F)	Status
1	360	BK	1	1/8	38	Ativa
2	680	BK	1	1/8	37,4	Ativa
3	921	Venturi	1	1/4		Ativa

A Tabela 4.8 apresenta os dados de entrada utilizados de outras configurações iniciais necessárias para a execução da simulação.

Tabela 4.8. Dados de outras configurações iniciais.

Passo de tempo (s)	<i>Choke</i> de produção *(1/64 pol)	<i>Choke</i> de Inj. Gás *(1/64 pol)	Pressão a montante da linha (kgf/cm ²)	Pressão a jusante da injeção (kgf/cm ²)	Nível do fluido na tubulação (m)	Nível do fluido no anular (m)
20	64	16	7	36	600	600

Com esses dados de entrada será possível observar o comportamento do poço com o controle *PI-fuzzy* a partir da análise de algumas variáveis: vazão de produção, vazão de injeção de gás no anular, diâmetro do *choke* de injeção, pressão de fluxo no fundo do poço e pressão de revestimento. Os resultados obtidos encontram-se no próximo capítulo, de resultados e discussões.

Capítulo 5
Resultados e discussões

5. Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da vazão de produção de líquido na superfície, a vazão de injeção de gás no anular, diâmetro do *choke* de injeção, pressão de fluxo no fundo do poço e pressão de revestimento, com os dados mostrados no capítulo anterior quando o controlador começa a atuar, sendo possível a construção de tabelas e gráficos que mostram a eficiência do controle.

Para o poço descrito no capítulo anterior, fez-se três testes (teste1, teste2 e teste3), cada um com os limites da Pr diferentes. No primeiro teste os limites foram iguais a $Pr_{min} = 12 \text{ kgf/cm}^2$ e $Pr_{max} = 40 \text{ kgf/cm}^2$ e no segundo, os limites foram $Pr_{min} = 13 \text{ kgf/cm}^2$ e $Pr_{max} = 40 \text{ kgf/cm}^2$ e no terceiro, foram $Pr_{min} = 14 \text{ kgf/cm}^2$ e $Pr_{max} = 40 \text{ kgf/cm}^2$. Assim, foram obtidos os seguintes resultados da vazão de produção de líquido na superfície (Qls) para os três testes, mostrado na Figura 5.1.

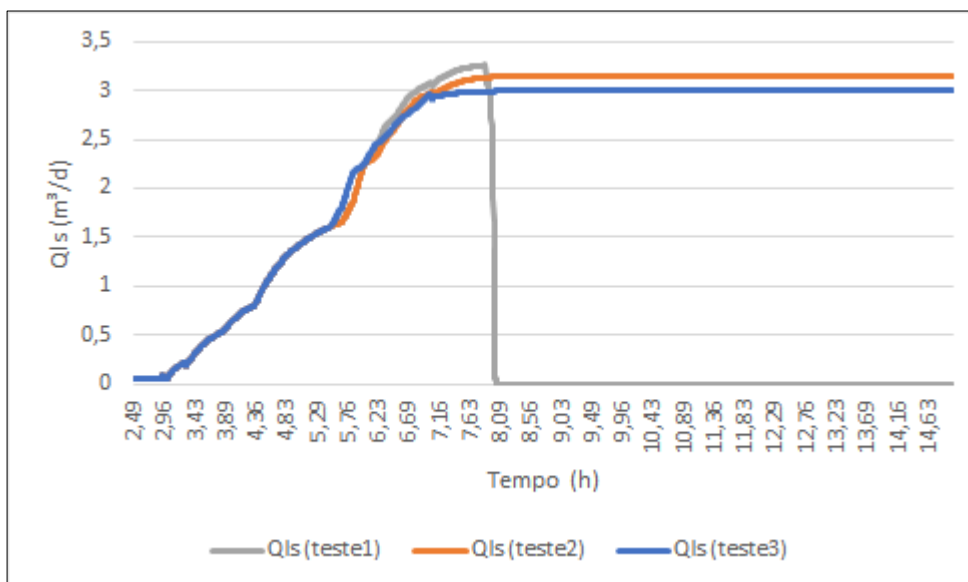


Figura 5.1. Vazão de líquido produzido (Qls) x Tempo.

Fonte: Autor (2019).

Através da Figura 5.1 percebe-se que inicialmente o comportamento da vazão é o mesmo para os três testes, porém nota-se que para o teste1 a vazão de produção cai para zero em determinado momento. Percebe-se ainda que, para o teste2 e teste3 o poço consegue produzir e estabilizar a vazão, sendo que para o teste3 o poço tende a estabilizar mais rápido, porém o poço com o teste2 produz mais. Desse modo, através da Figura 5.2, que mostra o comportamento da vazão de injeção de gás no anular em função do tempo para os três testes, percebe-se que para o teste1, a quantidade de gás

injetada é bem baixa em determinado momento, ocasionado assim a não produção do poço, mostrada na Figura 2. Ainda na Figura 3, percebe-se que para o teste3 injetou-se uma quantidade maior de gás do que para o teste2, mesmo assim, o poço produziu uma quantidade menor do que quando se injetou menos gás, caso do teste2. Assim, nota-se que não é uma injeção maior da quantidade de gás que vai fazer o poço produzir mais, mas sim uma injeção ótima em cada instante de tempo.

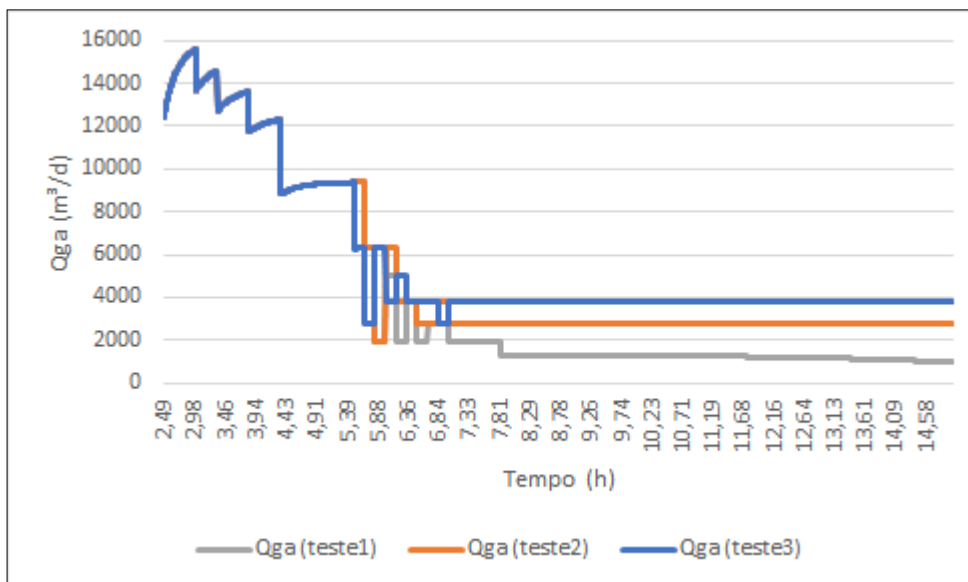


Figura 5.2. Vazão de gás injetado no anular (Qga) x Tempo.

Fonte: Autor (2019).

A quantidade de gás injetado está relacionada com a abertura do *choke* de injeção de gás, assim nota-se através da Figura 5.3 que com o teste1 não foi possível controlar o diâmetro do *choke*, chegando a abertura ficar quase fechada, o que ocasionou a pouca injeção de gás e conseqüentemente a não produção do poço. Para os limites do teste2 e teste3 conseguiu-se controlar a abertura do *choke*. Para o teste2, a partir do momento que a vazão de produção estabiliza o diâmetro do *choke* permanece em 6/64 pol., o que fornece uma quantidade de gás injetado ótima para o poço conseguir produzir uma quantidade maior de líquido. Já no teste3, o diâmetro permanece em 7/64 pol., fazendo com que mais gás seja injetado e assim o poço não consiga a maior vazão de produção possível.

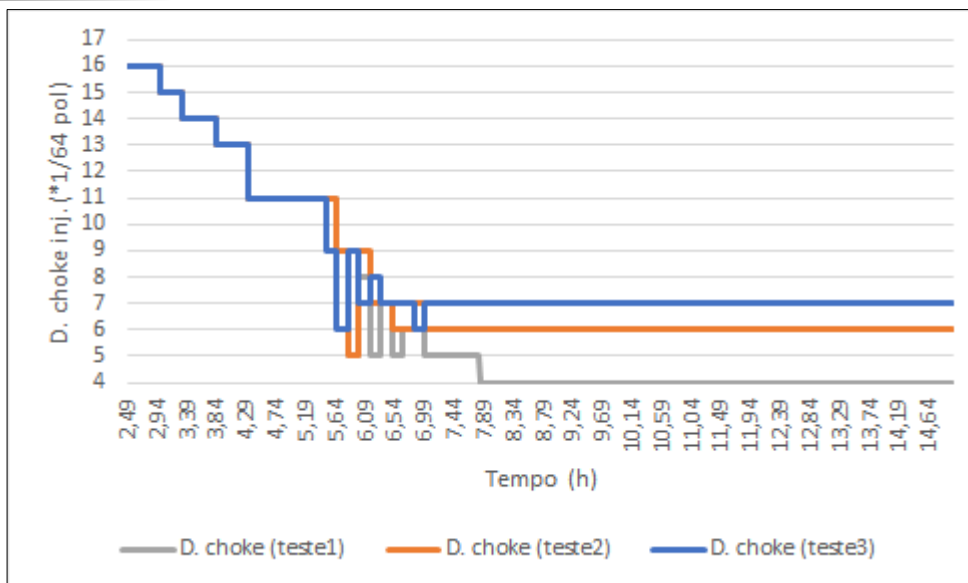


Figura 5.3. Diâmetro do Choke Inj. x Tempo.

Fonte: Autor (2019).

Analisou-se também o comportamento da pressão de fluxo no fundo poço ao longo do tempo, como mostra a Figura 5.4. Assim, verifica-se que para o teste1, Figura 5.4 (a), em um determinado momento a pressão de fluxo no fundo do poço começa a aumentar muito, isso ocorre a partir do instante que o diâmetro do *choke* diminui muito, assim ocasionando a pouca injeção de gás, aumento da P_{wf} e conseqüentemente diminuição na vazão de produção. Além disso, percebe-se que os valores do *setpoint* da P_{wf} e o valor da P_{wf} , possuem comportamentos diferentes, isso ocorre quando o valor do módulo do erro da P_{wf} não é maior que um, assim mantendo os valores dos *setpoints*, ou quando o novo valor da P_{wf} passa a ser maior que o $SP_{P_{wf}}$, assim atualizando apenas o *setpoint* da P_r e mantendo o mesmo valor para o *setpoint* da P_{wf} . Já para o teste2 e teste3 (Figura 5.4 (b) e (c), respectivamente), nota-se que os valores do *setpoint* da P_{wf} e o valor da P_{wf} , possuem praticamente o mesmo valor e comportamento da curva, além disso, o valor da P_{wf} estabiliza, o que ocasiona a estabilização da vazão de produção de líquido na superfície. Também se verifica que para o teste2 o poço consegue atingir valores menores de P_{wf} do que para o teste3, quando a vazão estabiliza, isso comprova o fato do poço com o teste2 produzir mais do que com o teste3, pois quanto menor o valor de P_{wf} maior vazão de produção.

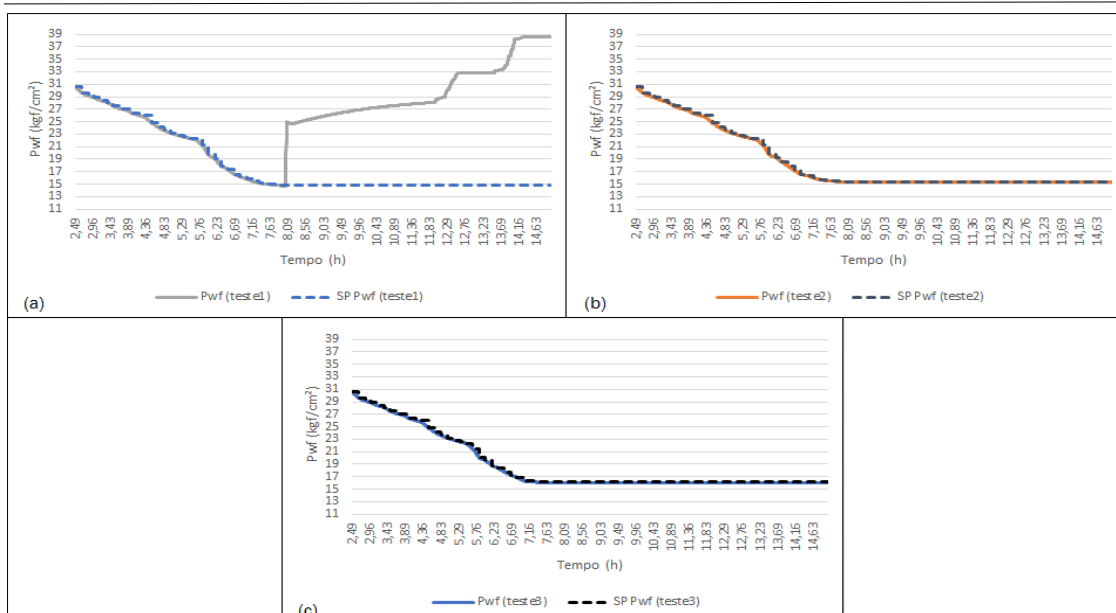


Figura 5.4. (a) Pressão de fluxo no fundo do poço (Pwf) x Tempo para o teste1; (b) Pressão de fluxo no fundo do poço (Pwf) x Tempo par o teste2; (c) Pressão de fluxo no fundo do poço (Pwf) x Tempo para o teste3.

Fonte: Autor (2019).

Além disso, avaliou-se o comportamento da pressão do revestimento, como pode-se visualizar na Figura 5.5. Como o limite mínimo da Pr para o teste1 é de 12 kgf/cm², para o teste2 de 13 kgf/cm² e para o teste3 é 14 kgf/cm², nota-se na Figura 5.5 que os *setpoints* da Pr não ultrapassam esses limites mínimos, pois foram programados para isso.

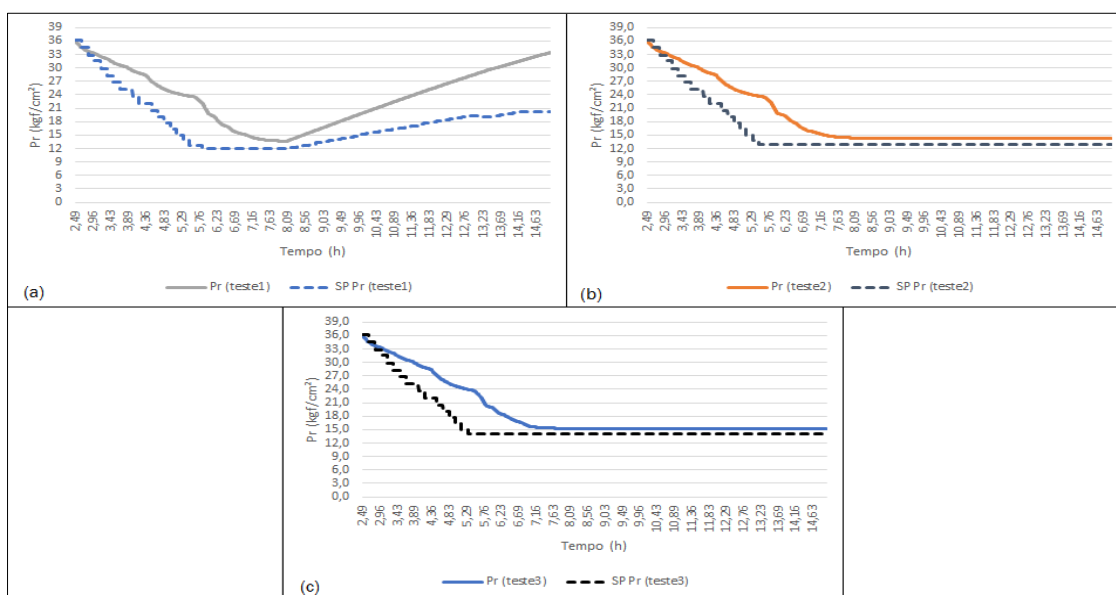


Figura 5.5. (a) Pressão do revestimento (Pr) x Tempo para o teste1; (b) Pressão do revestimento (Pr) x Tempo para o teste2; (c) Pressão do revestimento (Pr) x Tempo para o teste3.

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se ainda, que para esse caso, o controlador PI-*fuzzy* funciona para os limites do teste2 e teste3, pois consegue controlar a abertura do *choke*, fazendo com que o poço produza. Isso ocorre porque, quando se utiliza o limite mínimo da Pr de 12 kgf/cm², como pode ser visto na Figura 5.5 (a), o *setpoint* da Pr fica mais distante do valor atual da Pr, porém tenta retornar para o mais próximo possível mas não consegue, assim se afastando novamente, aumentando a diferença. Assim, o valor do erro da Pr utilizado será maior que o anterior, o que ocasiona a redução do diâmetro do *choke* de injeção de gás até uma abertura mínima. Consequentemente, a vazão de injeção de gás diminui, acarretando assim o aumento da Pwf e consequente diminuição da produção de líquido na superfície.

Já para o teste2 e teste3, percebe-se através da Figura 5.5 (b) e (c) que quando os *setpoints* da Pr atingem os limites mínimo, permanece nesse valor até o final da simulação. Isso ocorre pois, provavelmente o módulo do erro da Pwf não é maior ou igual 1, assim os valores anteriores dos *setpoints* da Pr são mantidos. Além disso, nota-se na Figura 5.5 que o valor real da Pr para o teste2 estabiliza e chega a valores mais próximos do SP_{Pr} um pouco mais rápido do que no teste1. Assim, a partir do momento que o erro da Pr não é maior ou igual a dois, o último valor do diâmetro do *choke* de injeção é mantido, assim estabilizando a vazão de injeção de gás e a produção do poço. Como com o teste2 o controle consegue atingir valores menores do diâmetro do *choke* do que com o teste3, menor quantidade de gás é injetado, consequentemente maior vazão de produção.

Assim, resolveu-se fazer uma comparação dos melhores resultados obtidos das principais variáveis do sistema: Qls e Qga, com o poço operando com um controle PI e sem nenhum controle. Obteve-se o seguinte gráfico da vazão de produção (Qls), visualizado na Figura 5.6. No qual, percebe-se que o poço produz mais com o controlador PI, porém demora muito a estabilizar a vazão. Assim, o PI - *fuzzy* é mais eficiente no controle, pois além de aumentar a vazão de produção, o poço estabiliza mais rápido quando comparado com o poço operando sem controle e com o controle PI.

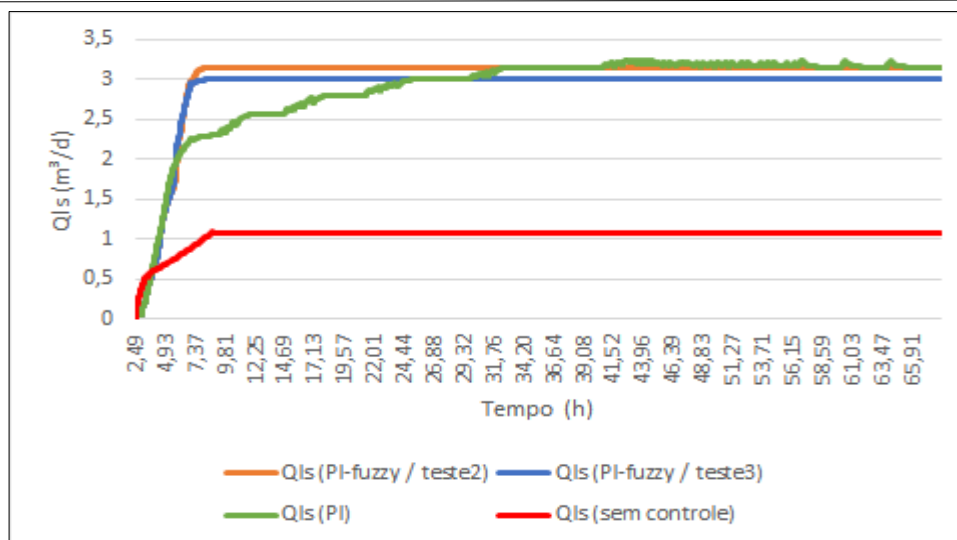


Figura 5.6. Vazão de produção com e sem controlador x Tempo.

Fonte: Autor (2019).

A Figura 5.7 apresenta a comparação da vazão de injeção de gás no anular (Q_{ga}). Percebe-se, que os controladores agiram de forma a diminuir a quantidade de gás injetado. Já quando o poço opera sem o controle, verifica-se que a vazão de injeção de gás é bem maior. No PI utiliza uma quantidade um pouco menor do que no PI – *fuzzy*, porém tarda a chegar no menor valor, assim influenciando no retardamento da estabilização da vazão de produção do poço.

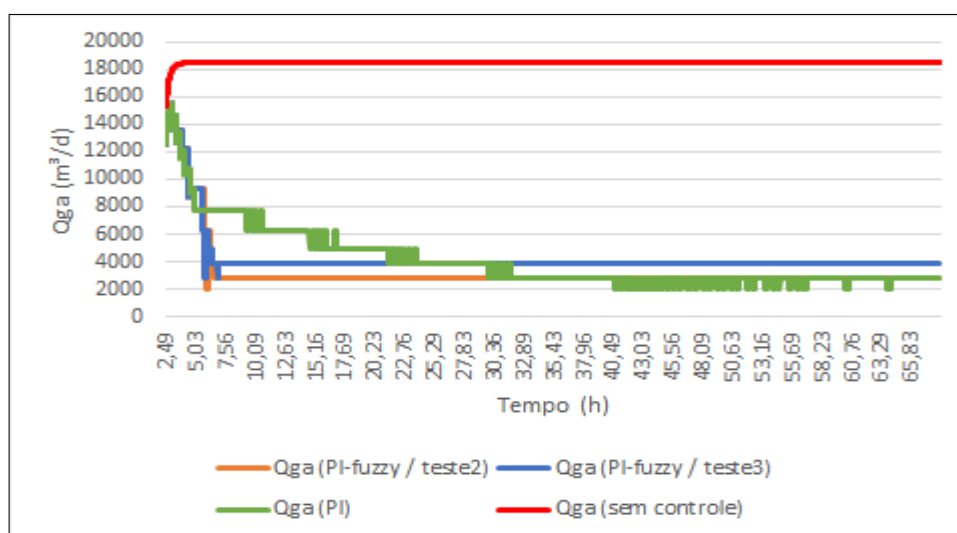


Figura 5.7. Vazão de injeção de gás com e sem controlador x Tempo.

Fonte: Autor (2019).

Desse modo, comprava-se que o controle PI-*fuzzy* atua muito bem para o caso em estudo, pois minimiza o consumo de gás injetado e otimiza a produção.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações

6. Conclusões e recomendações

6.1. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um algoritmo de controle PI-fuzzy aplicado ao programa *TraceLiftLaut*, que é um simulador de poços de petróleo atuando pelo método de elevação artificial, *Gas-Lift* Contínuo. Com o controle desenvolvido é possível controlar a abertura do *choke* de injeção de gás visando produzir um maior volume de líquido, injetando menor quantidade de gás.

O código do controle foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e implementado ao algoritmo do *software TraceLiftLaut*. O primeiro passo do controle é verificar se a operação de descarga já terminou. Após isso, verifica a condição se o erro da Pwf é menor ou igual a 1, se sim, é executado o código de atualização do *setpoint* da Pr e Pwf, se não mantém os valores anteriores. Com os valores atuais da Pr, Pwf e seus devidos *setpoints* e também com os valores dos limites mínimo e máximo da Pr, o controlador PI-fuzzy entra em ação com as suas duas variáveis de entrada (erro da Pr e variação do erro da Pr) e uma de saída. Com isso, criou-se quinze regras para a lógica fuzzy que será possível obter a variação da abertura do *choke* de injeção, que somada ou subtraída a abertura anterior do *choke*, dará o valor inteiro do novo diâmetro do *choke* que será utilizado para os novos cálculos do simulador. Mas para receber esse novo valor da abertura, antes passa por uma condição que se o erro da Pr for maior que 2, recebe a saída do controlador, se não, mantém o valor anterior.

A fim de se testar o controle desenvolvido, três simulações com os mesmos dados do poço foram realizadas para efeito de análise, com o limite mínimo da pressão de revestimento iguais a 12, 13 e 14 kgf/cm² e com o limite máximo de 40 kgf/cm². Com os resultados obtidos foi possível observar o comportamento da vazão de líquido produzido, da vazão de injeção de gás, do diâmetro do *choke* de injeção, da pressão de fluxo no fundo do poço e da pressão de revestimento. Através dos resultados obtidos, verificou-se que o controle teve uma atuação satisfatória para o segundo e terceiro teste. Porém, para o teste2 conseguiu-se controlar melhor a abertura do *choke* do que no teste3, assim injetando a quantidade de gás necessária e aumentando ainda mais a produção de óleo. Enquanto para o primeiro teste, não se conseguiu controlar a abertura do *choke*, isso porque, através dos limites da pressão de revestimento utilizados não foi possível gerenciar a Pr de forma adequada, assim ocasionado: uma abertura mínima do *choke*,

pouquíssima injeção de gás, aumento da Pwf e conseqüentemente redução na vazão de produção. Isso prova, que economizar ou injetar muito gás não trará bons resultados, e sim, a quantidade certa de gás injetada em cada momento.

Assim, comparou-se os resultados, das variáveis: vazão de produção e de injeção de gás, com os do simulador sem está acoplado ao controle e com o controlador PI. Percebeu-se que os controladores atuaram de forma satisfatória ao aumentar a vazão de produção e diminuir a quantidade de gás injetado, para o poço em estudo. Além disso, nota-se que o controle PI-*fuzzy* tem um desempenho melhor nesse processo, pois além de aumentar a vazão de produção e diminuir a quantidade de gás injetado, o tempo de estabilização é menor quando comparado com o poço operando sem e com o controle PI. Desse modo, apesar do controlador ter obtido resultados satisfatórios para o caso em estudo, é necessário a realização de novos testes para validação.

6.2. Recomendações

Assim, a partir do estudo realizado pode-se recomendar algumas atividades para melhorias e validação do controle:

- Realizar novos testes com dados de campo;
- Testar o controlador com novas regras *fuzzy* para que assim possa ir se ajustando ao melhor resultado final.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

API. Gas Lift Book 6 of the Vocational Training Series. Third, 1994.

ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. Controle Inteligente. Natal, 2015.

ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. Sistemas de Controle. Natal, 2007.

BERGERON, T., COOKSEY, A. e REPPPEL, J.S. New Automated Continuous Gas-Lift Control System Improves Operational Efficiency, Society of Petroleum Engineers – SPE, 1999.

CAMPOS, Mario C. M. M., LIMA, Marcelo L., TEXEIRA, Alex F., MOREIRA, Cristiano A., STENDER, Alberto S., MEIEN, Oscar F. V. e QUARESMA, Bernardo. Advanced Control for Gas-Lift Well Optimization, Offshore Technology Conference – OTC, 2017.

CHOI, Kwon Il. Modelo Computacional Dinâmico Lagrangiano-Euleriano para Escoamento Bifásico em Poços de Petróleo. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1996.

FILHO, F. M. L.; GOSMANN, H. L. e BAUCHSPIESS, A. (2002). Controle Fuzzy Para Sistema de Nível Líquidos. XIV Congresso Brasileiro de Automática, 2002.

FUKURA, S. and TAMURA, H. PI controller tuning of second order lag plus dead time processes subject to a reference input, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Japan, 1983.

FUZZY Logic Toolbox™ User. MathWorks, Inc, 1995-2018.

GALVÃO, Hannah Lícia Cruz. Desenvolvimento e Aplicação de uma Estratégia de Controle para o Método de Elevação por Bombeio Mecânico. 58 f. Dissertação

(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

IKOKU, Chi U. Natural Gas Production Engineering, Editora Malabar, 1992.

LACERDA, Geraldo de Moura. Detecção de Interface em Tanques de Petróleo Usando Transmissores de Nível e Controladores Fuzzy. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MARTINS, Sérgio Vasconcellos. Efeitos Transientes no Projeto e Análise de Gas-Lift Contínuo. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1991.

MATA, Daniel; HERNANDEZ, Ali; CHIRINOS, Nicolas; MONTOYA, Diego; STREFEZZA, Miguel. Gas Lift Trouble Shoot Analysis Using Fuzzy Logic. VIII LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE, Trinidad e Tobago. SPE 81166, 2003.

MOURA, Ewerton A. P. Simulador Computacional do Comportamento em regime Permanente de Poços de Petróleo Equipados com Gas-Lift Contínuo. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

PETROBRAS, Ouvidoria Geral da. Serviço de Informação ao Cidadão (SIC), 2018.

PLUCENIO, Agostinho. Automação da Produção de Poços de Petróleo Operando com Elevação Artificial por Injeção Contínua de Gás. 106f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

RIGNEL, Diego Gabriel de Souza; CHENCI, Gabriel Pupin; LUCAS, Carlos Alberto. Uma Introdução a Lógica Fuzzy. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica (RESIGeT), vol. 01, p. 25-26, 1 mar. 2011.

SACHDEVA, R., SCHMIDT, Z., BRILL, J. P. e BLAIS, R. M. Two-Phase Flow Through Chokes, Society of Petroleum Engineers – SPE, 1986.

SANDRI, S. e CORREA, C. (1999). Lógica Nebulosa. V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais, 1999.

SILVA, P. R. A.; SOUZA, A. V.; HENRIQUES, L. F. e COELHO, P. H. G. (2007). Controle de Nível em Tanques Acoplados Usando Sistemas Inteligentes. I Simpósio Brasileiro de Inteligencia Computacional, 2007.

SPÍNDOLA, Rafael Barbosa. Controle Automático para Injeção Otimizada de Gás em Poços de Petróleo Equipados para Funcionamento com Gas Lift Contínuo. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

VASCONCELLOS, B. S.; CAVALCANTE, M. S. F. F. e ARAÚJO, F. U. M. (2016). Controle de Sistemas de Tanques Acoplados Multivariável Utilizando a Lógica Fuzzy. XVI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial, 2016.