

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDOS DE CONTROLE NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO  
EM PRESENÇA DE *KICK* DE GÁS**

**RAFAEL VELOSO PATRÍCIO**

**2016**



**UFRRJ**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDOS DE CONTROLE NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO  
EM PRESENÇA DE *KICK* DE GÁS**

**RAFAEL VELOSO PATRÍCIO**

*Sob a Orientação de*  
**Márcia Peixoto Vega Domiciano**

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências** em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ  
24 de Agosto de 2016

622.3381

P314e

Patrício, Rafael Veloso, 1990-

T

Estudos de controle na perfuração de poços de petróleo em presença de Kick de gás /Rafael Veloso Patrício. - 2016.

xvii,170 f.: il.

Orientador: Márcia Peixoto Veja Domiciano.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2016.

Bibliografia: f. 102-108.

1. Poços de petróleo - Perfuração - Teses. 2. Engenharia do petróleo - Teses. 3. Controle de processo - Teses. I. Domiciano, Márcia Peixoto Vega, 1972- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAFAEL VELOSO PATRÍCIO

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM \_\_/\_\_/\_\_\_\_

---

Márcia Peixoto Vega Domiciano, D. Sc., DEQ/UFRRJ  
(Orientador)

---

Antonio Carlos Vieira Martins Lage, D. Sc., Petróleo Brasileiro

---

Argimiro Resende Secchi, D. Sc., UFRJ

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por guiar a minha vida e me deixar chegar até aqui.

Agradeço à minha família pelo apoio nesse sonho. À minha namorada Caroliny Macedo pelo companheirismo e amor, ainda que à distância.

Deixo aqui o meu agradecimento à minha orientadora Márcia Peixoto Vega Domiciano, por todos os momentos de discussão e aprendizado, pela paciência com minhas teimosias e pela dedicação ao trabalho.

Aos companheiros de laboratório: Gabrielle Fontella, Frederico Martins, Sergio Magalhães, Eduardo Cunha e Elias Pacheco por todas as conversas e cafés, por todo o apoio, compreensão, amizade, ideias e pela ajuda dispendida ao longo do trabalho, em especial aos dois primeiros, meus controleiros preferidos. Aos estagiários: Tamires Souza, Ana Silva e Lisandra Barbosa pela dedicação e prestatividade em todas as tarefas. Aos amigos João Meneses, Andrew Milli, José Messias e Leandro Azevedo, pela amizade e por compartilhar momentos de sofrimento e aflição durante as penosas matérias obrigatórias. Devo agradecer também aos companheiros de república: Olívio Duque, William Wayn, Wagner Scheidt, Beatriz Mendel, Laércio Rocha e Daniela Duarte pelo companheirismo e risadas, e em especial a Vittos Gomes por toda a generosidade.

## RESUMO

PATRÍCIO, Rafael Veloso. **Estudos de controle na perfuração de poços de petróleo em presença de *kick* de gás**. 2016, 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

O controle da pressão anular de fundo é fundamental para que a perfuração de poços de petróleo seja feita de forma segura. Em uma formação permeável, fluidos do reservatório migram para a região anular quando a pressão anular de fundo está abaixo da pressão de poros, caracterizando o distúrbio denominado *kick*. A literatura reporta alguns modelos matemáticos desenvolvidos para prever o comportamento do poço na presença de *kick* de gás, porém poucos são os trabalhos abordando controle e experimentos. A partir desta motivação, foi construído uma planta experimental para estudar o comportamento do sistema durante a entrada de fluido (gás) do reservatório no anular, e assim, buscou-se desenvolver uma estratégia de controle que mitigue tal distúrbio sem a necessidade do fechamento total do poço. Uma estratégia com reconfiguração da lei de controle *feedback*↔*feedforward* foi desenvolvida para rejeitar a perturbação (entrada de gás no anular), visando assegurar a perfuração dentro da janela operacional. Paralelamente, foram desenvolvidos estudos de simulação quais sejam: a construção de um modelo matemático, validado empregando-se a unidade experimental, e a implantação de controle baseado em reconfiguração da lei de controle.

Palavras chave: *Kick* de gás, reconfiguração de controle, controle da pressão anular de fundo, perfuração de poços de petróleo.

## ABSTRACT

PATRÍCIO, Rafael Veloso. **Control study on oil well drilling under presente of gas kick.** 2016, 171p. Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

Controlling of downhole pressure is essential for a safety process of oil well drilling. In a permeable formation, fluids from reservoir come into the annulus region (wellbore) when the downhole pressure is below pore pressure, featuring a disorder called kick. Literature reports some mathematical models developed to predict the behavior of the wellbore in presence of gas kick, however, there are few works reporting control and experiments. By this reason, it was built an experimental plant in order to study system's behavior during fluid inlet (gas) from reservoir to annulus, and then, sought to develop a control strategy able to mitigate this disorder, without shut-in the well. A strategy with reconfiguration of the control law feedback $\leftrightarrow$ feedforward was designed to reject disturbance (gas inlet in the annular), to ensure the drilling within the operating window. Parallely, simulation studies were developed which are: the construction of mathematical model, validated by the employment of the experimental unit, and the implementation of control based on reconfiguration of control law.

**Keywords:** Gas kick, control by reconfiguration, annulus bottom-hole pressure control, oil well drilling.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do controlador por Ziegler & Nichols (1942) .....	25
Tabela 2: Parâmetros do controlador por Cohen & Coon (1953),.....	25
Tabela 3 - Relação entre frequência e vazão – <i>Choke</i> com 95% de abertura.....	60
Tabela 4 - Avaliação do comportamento do gás, em poço aberto e sem circulação, para várias diferenças de pressão Tubo-reservatório/Anular. ....	73
Tabela 5 - Avaliação do comportamento do gás, em poço aberto e com circulação, para várias diferenças de pressão Tubo-reservatório/Anular. ....	75
Tabela 6 - Comparação da velocidade de identificação do <i>kick</i> para as estratégias: <i>Feedback</i> e reconfiguração.....	84
Tabela 7 - Valor dos parâmetros necessários para a implementação da modelagem.....	90
Tabela 8 – Simulação da pressão para diversos diâmetros para projeto do helicoidal.	108
Tabela 9- Vazão máxima de gás para diversas diferenças de pressão (reservatório/ambiente) e diversas aberturas da válvula reservatório. ....	109
Tabela 10 - Tempo (s) que o gás demoraria para atingir o topo do helicoidal para diferentes percentuais de abertura e diferentes vazões.....	110
Tabela 11 - Parâmetros da unidade helicoidal pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy e parâmetros do controlador por Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). Sendo a perturbação a variação do índice de abertura da válvula <i>choke</i> e a variável controlada a pressão anular de fundo. Em todos os testes a bomba se encontrava em <b>20 Hz</b> . ....	114
Tabela 12 - Parâmetros da unidade helicoidal pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy e parâmetros do controlador por Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). Sendo a perturbação a variação do índice de abertura da válvula <i>choke</i> e a variável controlada a pressão anular de fundo. Em todos os testes a bomba se encontrava em <b>25 Hz</b> . ....	115
Tabela 13 - Parâmetros da unidade helicoidal pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy e parâmetros do controlador por Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). Sendo a perturbação a variação do índice de abertura da válvula <i>choke</i> e a variável controlada a pressão anular de fundo. Em todos os testes a bomba se encontrava em <b>30 Hz</b> . ....	116
Tabela 14 - Parâmetros do controlador <i>feedforward</i> . Sendo a perturbação a entrada de gás no helicoidal sob diversas aberturas da válvula reservatório. A perturbação é avaliada pela variação do nível do tanque de retorno. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz. A diferença de pressão entre o reservatório e o anular era de <b>10 psi</b> .....	117
Tabela 15 - Parâmetros do controlador <i>feedforward</i> . Sendo a perturbação a entrada de gás no helicoidal sob diversas aberturas da válvula reservatório. A perturbação é avaliada pela variação do nível do tanque de retorno. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz. A diferença de pressão entre o reservatório e o anular era de <b>20 psi</b> .....	118
Tabela 16 - Parâmetros do controlador <i>feedforward</i> . Sendo a perturbação a entrada de gás no helicoidal sob diversas aberturas da válvula reservatório. A perturbação é avaliada pela variação do nível do tanque de retorno. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz. A diferença de pressão entre o reservatório e o anular era de <b>30 psi</b> .....	119

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho simplificado do sistema de perfuração. Fonte: Adaptado de Godhavn et al., 2011. ....	4
Figura 2 - Janela operacional de pressão durante a perfuração. Fonte: Rocha & Azevedo, 2009. ....	6
Figura 3 - Representação esquemática da ocorrência de <i>kick</i> no fundo do poço. Fonte: Planetforlife, 2010. ....	8
Figura 4 – <i>Blowout</i> no Golfo do México. Fonte: Schwartz, 2014.....	9
Figura 5 - Expansão controlada do gás durante o <i>kick</i> . Demonstração da relação expansão e aumento do nível do tanque. Fonte: Adaptado de Watson, 2015. ....	14
Figura 6 - Métodos de contenção do <i>kick</i> em fluxograma. Fonte: O autor. ....	15
Figura 7 - Pressão no <i>choke</i> para método engenheiro e método sondador. Fonte: Santos (2014). ....	16
Figura 8 - Método volumétrico dinâmico. Fonte: Santos, 2014.....	17
Figura 9 - Esquema de controle <i>feedback</i> . Fonte: O autor. ....	21
Figura 10 - Estimação dos parâmetros do controlador pelo método da curva de reação. Fonte: Freitas, 2013. ....	23
Figura 11 - Método de obtenção dos parâmetros do sistema por Sundaresan & Krishnawamy (1977). Fonte: Freitas, 2013. ....	24
Figura 12 - Controle <i>feedforward</i> . Fonte: O autor. ....	26
Figura 13 - Malha de controle <i>feedforward/feedback</i> . Fonte: Freitas, 2013. ....	26
Figura 14 - Obtenção dos ganhos ( $K_P$ e $K_L$ ) para controlador <i>feedforward</i> . Fonte: O autor. ....	28
Figura 15 - Ilustração da unidade helicoidal com linhas de fluxo líquido em azul e de gás em vermelho sob visão (a) superior e (b) frontal. Fonte: O autor. ....	32
Figura 16 – Fluxograma da unidade helicoidal. Fonte: O autor. ....	33
Figura 17 – Foto da unidade helicoidal. Fonte: O autor. ....	35
Figura 18 - Furação das barras para suporte da helicoidal. Fonte: O autor. ....	36
Figura 19 - Estrutura helicoidal. Fonte: O autor.....	36
Figura 20 – Barras chatas para evitar o caimento da mangueira. Fonte: O autor.....	37
Figura 21 – Conexão prensadas à mangueira e engates rápido. Fonte: O autor.....	37
Figura 22 - Bomba de deslocamento positivo. Fonte: O autor. ....	38
Figura 23 - Tanque de nível. Fonte: O autor. ....	39
Figura 24 – Modificações no tanque de nível. Fonte: O autor. ....	40
Figura 25 - Sensor de nível. Fonte: O autor. ....	40
Figura 26 - Transdutor de pressão. Fonte: O autor.....	41
Figura 27 - Medidor de vazão do tipo coriolis. Fonte: O autor. ....	42
Figura 28 – Tanque reservatório. Fonte: O autor. ....	43
Figura 29 – Instrumentação no tanque de pressão. Fonte: O autor. ....	44
Figura 30 – Conjunto de válvulas que regulam a entrada e saída de ar do reservatório para o controle da pressão. Fonte: O autor. ....	45
Figura 31 – Compressor. Fonte: O autor. ....	46
Figura 32 – Filtros reguladores de ar. Fonte: O autor. ....	47
Figura 33 – Cilindro de ar medicinal comprimido. Fonte: O autor. ....	47
Figura 34 – Válvula reservatório e seu tipo de interno. Fonte: O autor. ....	48

Figura 35 – Tubo-reservatório de volume conhecido (6,5 litros). Fonte: O autor. ....	49
Figura 36 – Válvula <i>choke</i> . Fonte: O autor. ....	50
Figura 37 – Posicionamento da instrumentação na unidade helicoidal. Fonte: O autor. ....	51
Figura 38 – Posicionamento da instrumentação no tanque reservatório. Fonte: O autor. ....	52
Figura 39 – Programa construído em c++ para controle e acompanhamento de variáveis na unidade helicoidal. Fonte: O autor. ....	53
Figura 40 – Fluxograma da modelagem matemática. Fonte: O autor. ....	56
Figura 41 - Não linearidade do sistema para a pressão anular de fundo e no <i>choke</i> . Testes realizados com Bomba em 20 Hz e degraus positivo/negativo de 35%, 25%, 15% de abertura da válvula <i>choke</i> . Fonte: O autor. ....	59
Figura 42 – Teste de identificação variando a abertura do <i>choke</i> e mantendo a bomba em 20 Hz. Fonte: O autor. ....	60
Figura 43 - Ganho inverso. Fonte: O autor. ....	61
Figura 44 – Testes de identificação. Fonte: O autor. ....	62
Figura 45 – Teste servo feito com os parâmetros encontrados por Ziegler-Nichols. Fonte: O autor. ....	63
Figura 46 – Teste servo feito com os parâmetros encontrados por Cohen-Coon. Fonte: O autor. ....	63
Figura 47 – Teste servo com os melhores parâmetros. Fonte: O autor. ....	64
Figura 48 – Controle do <i>kick</i> por estratégia <i>feedback</i> . Perturbação em 1,5 minutos e controle em 2.5 minutos. Fonte: O autor. ....	65
Figura 49 - Teste de identificação antes e após a implementação das mudanças no tanque de nível. Fonte: O autor. ....	66
Figura 50 - Teste regulatório com estratégia <i>feedback</i> . Comportamento das pressões e da variável manipulada. Fonte: O autor. ....	66
Figura 51 – Teste regulatório com estratégia <i>feedback</i> . Comportamento do nível normalizado e da vazão. Fonte: O autor. ....	67
Figura 52 – Controle da entrada e saída de gás do reservatório. Fonte: O autor. ....	68
Figura 53 – Comportamento desejável para o controle do <i>kick</i> de gás. Fonte: O autor. ....	69
Figura 54 – Possibilidade de identificação previa (antes de 2 minutos) do <i>kick</i> de gás para testes em condições mais severas. Fonte: O autor. ....	70
Figura 55 – <i>Kick</i> de gás do tipo pulso (6,5 litros) em poço aberto. Fonte: O autor. ....	72
Figura 56 – Expansão do gás durante um <i>kick</i> no poço aberto. Fonte: O autor. ....	72
Figura 57 – Relação entre pressão inicial no Tubo-reservatório e volume final do gás em poço aberto sem circulação. Fonte: O autor. ....	73
Figura 58 – Pulso com sistema em circulação. Fonte: O autor. ....	74
Figura 59 – Expansão de <i>kick</i> gás com volume inicial de 6,5 L e delta de pressão Tubo-reservatório/anular de 50 psi, em teste com circulação de fluido de perfuração. ....	74
Figura 60 – Identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> – (a) 10 psi, (b) 20 psi, (c) 30 psi. Fonte: O autor. ....	76
Figura 61 – Comportamento do nível e da vazão ao longo dos experimentos de identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> . Fonte: O autor. ....	78
Figura 62 – Comportamento da inclinação do nível em teste em malha aberta. Fonte: O autor. ....	79

Figura 63 – Resposta da variável de saída (pressão de fundo) à perturbação ( <i>kick</i> de gás) (acima) e variável de entrada (variação da inclinação de nível) (abaixo) . Fonte: O autor. ....	80
Figura 64 – Variação da inclinação de nível durante os testes de identificação para 10 psi, 20 psi e 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório. Fonte: O autor. ....	81
Figura 65 – Critério para reconfiguração de controle <i>feedback</i> ↔ <i>feedforward</i> . Fonte: O autor. ....	82
Figura 66 - Teste regulatório com estratégia de reconfiguração da lei de controle. Fonte: O autor. ....	83
Figura 67 – Velocidade de controle do <i>kick</i> de gás na estratégia com reconfiguração. Fonte: O autor. ....	84
Figura 68 – Comparação da variável manipulada para as estratégias: <i>Feedback</i> e reconfiguração. Fonte: O autor. ....	85
Figura 69 – Comparação da variável manipulada para as estratégias: <i>Feedback</i> (esquerda) e reconfiguração (direita). Fonte: O autor. ....	85
Figura 70 – Comparação: modelagem e experimental frente a uma perturbação na abertura do <i>choke</i> . Fonte: O autor. ....	94
Figura 71 Comparação: modelagem e experimental frente a um <i>kick</i> de gás (perturbação). Fonte: O autor. ....	94
Figura 72 – Simulação de teste servo. Fonte: O autor. ....	95
Figura 73 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor. ....	96
Figura 74 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor. ....	96
Figura 75 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	97
Figura 76 - – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	97
Figura 77 – Rotâmetro. Fonte: Omel, 2016. ....	109
Figura 78 - Resultado típico do Caso 1 realizado na unidade utilizada por Russano (2104). Fonte: O autor. ....	111
Figura 79 – Avaliação da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	112
Figura 80 - Resultado típico do Caso 2 realizado na unidade utilizada por Russano (2104). Fonte: O autor. ....	112
Figura 81 – Resultado típico do Caso 3 realizado na unidade utilizada por Russano (2104). Fonte: O autor. ....	113
Figura 82 – Testes de linearidade com perturbações degrau no índice de abertura da válvula <i>choke</i> para a bomba em 20 Hz. Fonte: O autor. ....	120
Figura 83 - Testes de linearidade com perturbações degrau no índice de abertura da válvula <i>choke</i> para a bomba em 25 Hz. Fonte: O autor. ....	121
Figura 84 - Testes de linearidade com perturbações degrau no índice de abertura da válvula <i>choke</i> para a bomba em 30 Hz. Fonte: O autor. ....	121

Figura 85 - Avaliação da não linearidade do sistema através da relação do Ganho estacionário (K) e Variável de entrada (M). Fonte: O autor.....	122
Figura 86 - Avaliação da não linearidade do sistema através da relação do Constante de tempo (t) e Variável de entrada (M). Fonte: O autor.....	122
Figura 87 - Testes de identificação variando a abertura do <i>choke</i> e mantendo a bomba em <b>20 Hz</b> . Fonte: O autor.....	123
Figura 88 - Testes de identificação variando a abertura do <i>choke</i> e mantendo a bomba em <b>25 Hz</b> . Fonte: O autor.....	124
Figura 89 – Testes de identificação variando a abertura do <i>choke</i> e mantendo a bomba em <b>30 Hz</b> . Fonte: O autor.....	125
Figura 90 - Testes servo com $\tau_I=0,1$ e $K_c= -0,0067; 0,01$ e $0,015$ . Bomba em 20 Hz. 126	
Figura 91 - Testes servo com $\tau_I=0,1$ e $K_c=-0,02$ e bomba em 25 Hz (esquerda) e 30 Hz (direita). Fonte: O autor.....	127
Figura 92 - Testes servo com bomba em 20 Hz, $\tau_I=0,15$ e $K_c$ variando. Fonte: O autor.....	127
Figura 93 - Testes servo com bomba em 25 Hz, $\tau_I=0,15$ e $K_c$ variando. Fonte: O autor.....	128
Figura 94 - Testes servo com bomba em 30 Hz, $\tau_I=0,15$ e $K_c$ variando. Fonte: O autor.....	128
Figura 95 - Testes servo com bomba em 20 Hz, $\tau_I=0,2$ e $K_c$ variando. Fonte: O autor.....	129
Figura 96 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	130
Figura 97 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	130
Figura 98 - Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 40 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	131
Figura 99 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 50 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	131
Figura 100 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 100 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	132
Figura 101 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	133
Figura 102 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	134
Figura 103 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	134
Figura 104 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 40 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	135

Figura 105 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 50 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	135
Figura 106 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre <i>kick</i> de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 60 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.....	136
Figura 107 – Identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> para diferença de pressão anular/reservatório de 10 psi e várias aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	137
Figura 108 – Identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> para diferença de pressão anular/reservatório de 20 psi e várias aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	138
Figura 109 – Identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> para diferença de pressão anular/reservatório de 30 psi e várias aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	139
Figura 110 – Comportamento da vazão e nível durante os testes de identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> . 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório e aberturas da válvula reservatório indo de 0% para 30% (esquerda), 40% (meio) e 50% (direita). Fonte: O autor. ....	140
Figura 111 – Comportamento da vazão e nível durante os testes de identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> . 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório e aberturas da válvula reservatório indo de 0% para 30% (esquerda), 40% (meio) e 50% (direita). Fonte: O autor. ....	141
Figura 112 – Comportamento da vazão e nível durante os testes de identificação dos parâmetros <i>feedforward</i> . 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório e aberturas da válvula reservatório indo de 0% para 30% (esquerda), 40% (meio) e 50% (direita). Fonte: O autor. ....	141
Figura 113 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	142
Figura 114 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	143
Figura 115 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	143
Figura 116 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	144
Figura 117 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	144

Figura 118 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	145
Figura 119 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	146
Figura 120 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	146
Figura 121 –Regulatório <i>feedback</i> . $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Novo <i>set-point</i> em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor. ....	147
Figura 122 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	148
Figura 123 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	149
Figura 124 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	150
Figura 125 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	151
Figura 126 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	152
Figura 127 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	153
Figura 128 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	154
Figura 129 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo),	

nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	155
Figura 130 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi. Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	156
Figura 131 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 25psi. Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	157
Figura 132 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 25psi. Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	158
Figura 133 – Regulatório reconfiguração. $\Delta$ Pressão anular/reservatório 25psi. Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor. ....	159
Figura 134 - Simulação de <i>kick de gás</i> em malha aberta com entrada de gás em 1,5 minutos de teste. 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório e diversas aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	160
Figura 135 - Simulação de <i>kick de gás</i> em malha aberta com entrada de gás em 1,5 minutos de teste. 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório e diversas aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	161
Figura 136 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor. ....	163
Figura 137 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 40%. Fonte: O autor. ....	163
Figura 138 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 50%. Fonte: O autor. ....	164
Figura 139 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 20 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor. ....	164
Figura 140 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 20 psi e abertura da válvula reservatório em 40%. Fonte: O autor. ....	164
Figura 141 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 20 psi e abertura da válvula reservatório em 50%. Fonte: O autor. ....	165
Figura 142 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor. ....	165



Figura 143 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 40%. Fonte: O autor. ....	165
Figura 144 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia <i>feedback</i> . Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 50%. Fonte: O autor. ....	166
Figura 145 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	167
Figura 146 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 40% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	167
Figura 147 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	168
Figura 148 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	168
Figura 149 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 40% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	168
Figura 150 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	169
Figura 151 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 30 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	169
Figura 152 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	169
Figura 153 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor. ....	170

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1	Perfuração .....	4
2.2	<i>Kick</i> .....	7
2.2.1	<i>Kick</i> de gás.....	9
2.2.2	Percepção de <i>kick</i> .....	10
2.2.2.1	Problemas associados à percepção do <i>kick</i> de gás .....	12
2.2.3	Expansão.....	12
2.2.4	Controle de <i>kick</i> (métodos tradicionais) .....	14
2.2.4.1	Método do sondador.....	15
2.2.4.2	Método engenheiro.....	15
2.2.4.3	Métodos volumétricos (SANTOS, 2014).....	16
2.3	Modelagem .....	18
2.4	Controle .....	20
2.4.1	Controle por realimentação ( <i>feedback</i> ).....	21
2.4.1.1	Identificação do processo .....	22
2.4.1.2	Método da curva de reação.....	22
2.4.1.3	Método Sundaresan-Krishnaswamy.....	23
2.4.1.4	Estimação dos parâmetros do controlador em malha aberta .....	24
2.4.2	Controle por antecipação ( <i>feedforward</i> ).....	25
2.4.3	Controle <i>Feedforward/Feedback</i> .....	26
2.4.3.1	Estimação dos parâmetros <i>feedforward</i> .....	28
2.4.4	Reconfiguração da lei de controle .....	28
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1	Detalhamento da instrumentação .....	35
3.2	Métodos utilizados .....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.1	Estratégia: <i>Feedback</i> .....	58
4.1.1	Análise da não linearidade do sistema – Anular helicoidal.....	58
4.1.2	Parâmetros <i>feedback</i> – Identificação do sistema .....	59
4.1.3	Validação dos parâmetros do controlador <i>feedback</i> – Teste servo.....	62
4.1.4	Controle de <i>kick</i> de gás – Teste regulatório – Perturbação degrau.....	64
4.2	Estratégia: Reconfiguração de controle .....	71
4.2.1	Avaliação do comportamento do gás no anular - Expansão do gás .....	71

4.2.1.1	Poço Aberto e sem circulação de fluido de perfuração – Perturbação tipo pulso	71
4.2.1.2	Poço Aberto com circulação de fluido de perfuração – Perturbação tipo pulso	74
4.2.2	Parâmetros <i>feedforward</i> – Identificação do sistema.....	75
4.2.3	Controle de <i>kick</i> de gás – Teste regulatório – Perturbação degrau.....	81
4.3	Comparação: Estratégia com reconfiguração de controle x Estratégia <i>feedback</i>	84
4.4	Modelagem .....	86
4.4.1	Validação do modelo matemático .....	93
4.4.2	Simulação de testes servo e regulatório usando o modelo matemático....	95
5	CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
5.1	Conclusões.....	98
5.1.1	Conclusões sobre a estratégia <i>feedback</i> .....	98
5.1.2	Conclusões sobre a estratégia de reconfiguração de controle .....	98
5.1.3	Conclusões sobre a modelagem.....	99
5.2	Trabalhos futuros .....	99
5.2.1	Mudanças estruturais no sistema helicoidal .....	99
5.2.2	Testes regulatório: .....	100
5.2.3	Modelagem: .....	100
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	101
7	APÊNDICE .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda energética e de materiais de consumo da sociedade não é totalmente suprida por recursos renováveis, o que leva à necessidade de insumos como: o gás natural e o petróleo, os quais são formados pela sedimentação e decomposição de material orgânico, que ao longo de milhares de anos são soterrados sob condições de temperatura e pressão ideais. As camadas sobrepostas ao petróleo e gás geram pressão nos insumos (pressão natural), dando estabilidade geológica ao reservatório, o que mantém os fluidos aprisionados no subterrâneo. Para ter acesso a este material é preciso perfurar a formação até a camada que o material se encontra e extraí-lo (ROCHA & AZEVEDO, 2009).

A perfuração é feita pelo atrito de uma broca, que sobre peso e as vezes sobre giro, adentra nas camadas geológicas. A broca é conectada a seções de tubos (coluna de perfuração), que pode incidir peso sobre a broca. Um fluido (fluido de perfuração) é bombeado através do tubo de perfuração, retornando à superfície pelo espaço gerado entre a formação e a coluna de perfuração (região anular). As principais funções do fluido de perfuração são (THOMAS, 2004):

- Manter a pressão no poço próximo das pressões naturais, através da contribuição hidrostática;
- Carrear os cascalhos gerados durante a perfuração;
- Realizar a manutenção da temperatura do sistema;
- Evitar que os cascalhos decantem quando houver necessidade de parar a perfuração.

Durante a perfuração é fundamental que as características geológicas naturais da região perfurada sejam mantidas, evitando o desmoronamento do poço ou a saída dos fluidos pressurizados no subterrâneo (*kick*). Para isso, manipulam-se as características reológicas do fluido e a pressão anular de fundo. A pressão anular de fundo é o somatório das pressões hidrostáticas, causadas pelo fluido de perfuração, e as perdas de carga inerentes do sistema de perfuração. Logo, as principais maneiras de se regular a pressão são:

- Variação da pressão hidrostática, mudando-se a densidade do fluido;
- Manutenção das perdas de pressão por atrito, variando-se a frequência da bomba;

- Manutenção das perdas de pressão por atrito, variando o índice de abertura de válvulas na saída do poço (válvula *choke*).

Faixas de pressão (janela operacional) são estabelecidos para que a pressão não seja tão baixa que os fluidos aprisionados saiam em direção ao poço e nem tão altas que cause a fratura da rocha e o possível desmoronamento do poço. Sendo assim, o controle da pressão anular de fundo se torna primordial para o processo de perfuração. Um controle mais rápido e preciso desta variável, seja pela manutenção da frequência da bomba, controle dos parâmetros físico-químicos do fluido ou pelo índice de abertura da válvula *choke* é primordial para a operação de perfuração. Em algumas plantas o controle do índice de abertura da válvula *choke* ainda é feito manualmente e, conforme Freitas (2013), não é a forma mais eficiente de controle. Para controle de um *kick*, o controle manual pode ser insatisfatório.

A saída de fluidos das camadas geológicas (reservatório) para o anular é indesejada durante o processo de perfuração e, quando não controlado (*blowouts*) pode causar acidentes sérios, causando mortes, prejuízos financeiros e danos ambientais irreversíveis. Quando o fluido invasor é gasoso (*kick* de gás) o quadro se agrava, pois este: muda a pressão hidrostática no poço consideravelmente, se expande ao longo da subida e até se dissolve no fluido de perfuração (quando sintético), causando leituras inexatas de variáveis primordiais para a detecção e contenção do fluido invasor.

O uso de estratégias de controle na perfuração de poços de petróleo a fim de controlar a pressão anular de fundo é de grande relevância em face ao atual cenário, apresentando janelas operacionais cada vez mais estreitas. Desse modo, este trabalho apresenta estudos de modelagem e controle, via simulação e experimentos. Estuda-se a perfuração de poços na presença de *kick* de gás e avalia-se a eficiência de estratégias de controle (*feedback* e reconfiguração da lei de controle  $feedback \leftrightarrow feedforward$ ) no controle da pressão anular de fundo, através da manutenção da abertura da válvula *choke*, quando da ocorrência de *kick* de gás. Pretende ainda estudar o comportamento do gás durante a ascensão pelo poço. Paralelamente uma modelagem matemática é desenvolvida para simular o comportamento do poço.

Nessa dissertação de mestrado, apresenta-se no Capítulo 1 uma introdução sobre a importância do controle da pressão anular de fundo para o processo de perfuração de poços. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre perfuração de poços de petróleo, *kick* de gás, e estratégias de controle, incluído a reconfiguração da lei de

controle. O Capítulo 3 contém as metodologias experimentais utilizadas. Os resultados desta dissertação de mestrado estão dispostos no Capítulo 4, onde são apresentadas as estratégias utilizadas para controlar o *kick* de gás por método não convencional, ou seja, onde não há a necessidade de fechamento prévio do poço, e uma modelagem matemática. O Capítulo 5 descreve as conclusões gerais obtidas com esta dissertação de mestrado e deixa sugestões para trabalhos futuros. O Capítulo 6 apresenta a bibliografia utilizada. O Apêndice contém algumas informações que foram decisivas na definição do projeto da unidade experimental e, por fim, os Anexos contém informações referentes aos testes experimentais e simulações realizados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Perfuração

A perfuração tem sido executada em janelas operacionais cada vez mais estreitas e em profundidades cada vez maiores (Freitas, 2013), o que torna o processo de perfuração cada vez mais complexo e oneroso. Tem-se perfurado a mais de 6.000 metros na bacia de Santos, enquanto na China estudos são realizados para viabilizar perfurações acima de 10.000 (WENJUN et al., 2014).

A perfuração é realizada pelo atrito entre a broca de perfuração e a rocha. Este atrito é forçado pelo peso da coluna de perfuração e rotação imposta à broca de perfuração. No interior da coluna, que é formada por tubos ligados entre si, é bombeado fluido de perfuração (lama) (THOMAS, 2004). O esquema de perfuração é ilustrado pela Figura 1.

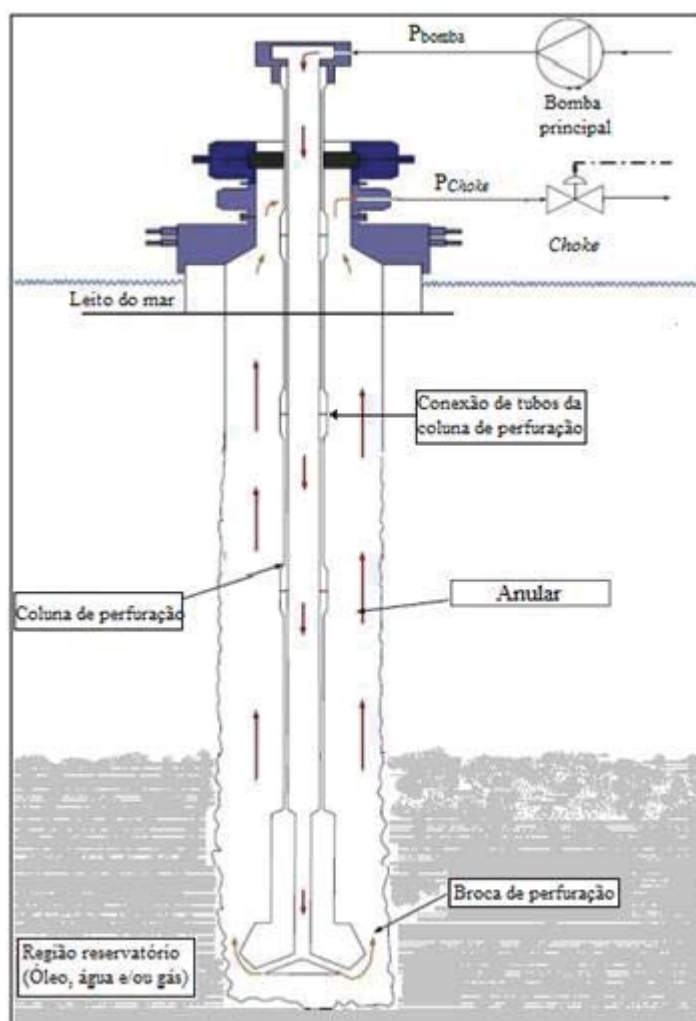


Figura 1 - Desenho simplificado do sistema de perfuração. Fonte: Adaptado de Godhavn et al., 2011.

A lama tem diversas funções: carrear os cascalhos gerados durante a perfuração; resfriar a broca de perfuração e a coluna de perfuração; evitar a precipitação dos sólidos gerados; formar uma torta impermeável na parede do poço que evite a perda de fluido de perfuração para a formação rochosa; e ainda, proporcionar um gradiente de pressão hidrostática ao longo do poço, o que impede a saída de fluidos nativos da rocha porosa (THOMAS, 2004). Buscando atender todas as funções durante a perfuração, muda-se a formulação da lama de perfuração ao longo do processo para que esta tome as propriedades inerentes à etapa de perfuração (JUNIOR; LACHTER & NASCIMENTO 2007).

A coluna formada pelo fluido de perfuração deve tentar imitar as condições físico-químicas impostas pelas camadas geológicas precursoras ao poço. As camadas geológicas sobrepostas geram um gradiente de pressão que aumenta conforme a profundidade, e os fluidos aprisionados nas profundidades são submetidos a essas pressões. Durante a perfuração de um poço, é ideal que se mantenha este estado natural de pressão, logo a pressão anular de fundo deve ser semelhante à pressão natural geológica da formação (pressão de poros) ou próxima desta (ROCHA & AZEVEDO, 2009). A pressão da formação é chamada de normal quando esta for equivalente à pressão hidrostática exercida por uma coluna de água doce ou salgada que se estenda desde a formação até a superfície. Em alguns casos o gradiente de pressão se apresenta acima da pressão hidrostática causada pela coluna de água, nestes casos diz-se que há uma pressão anormal. Diversos fatores são associados ao aparecimento deste tipo de formação como: compactação, movimentos tectônicos, rapidez da taxa de deposição, entre outros (THOMAS, 2004).

Existe uma janela operacional de pressão aceitável para cada etapa da perfuração, sendo que, quanto mais profundo for o poço mais estreita se torna esta janela (FREITAS, 2013). A pressão anular de fundo deve permanecer entre a pressão de poros/colapso e a pressão de fratura. A pressão de poros, também referenciada como pressão de formação ou pressão do reservatório, pode ser definida como a pressão causada pelos fluidos contidos nos espaços porosos da rocha reservatório. A pressão de colapso é a pressão que leva à falha da rocha por cisalhamento, geralmente, quando atingida, causa uma deformação no diâmetro do poço ou até o desmoronamento do mesmo (ROCHA & AZEVEDO, 2009). Pressão de fratura é a pressão que produz a falha mecânica de uma formação com a resultante perda de fluido para o reservatório (SANTOS, 2014). A Figura 2 ilustra os conceitos acima citados.



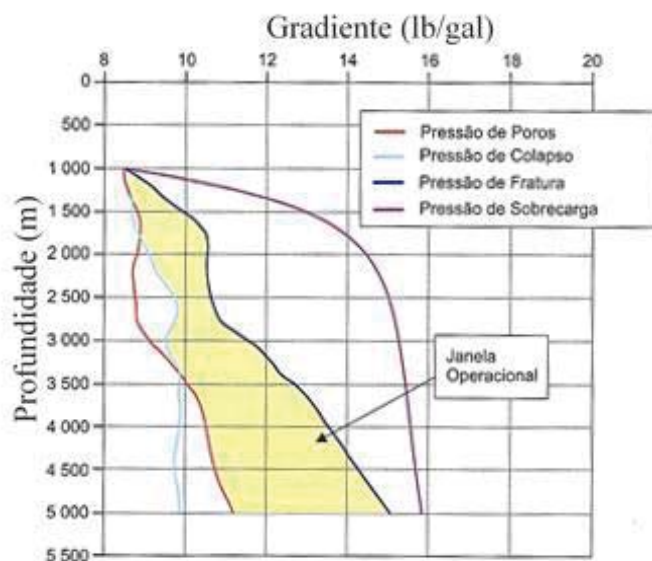


Figura 2 - Janela operacional de pressão durante a perfuração. Fonte: Rocha & Azevedo, 2009.

O controle da pressão anular de fundo é essencial para evitar a troca de fluidos entre anular e reservatório. Esta pressão pode ser manipulada pelo controle dos parâmetros físico-químicos do fluido, pela variação da frequência imposta à bomba que injeta o fluido de perfuração pela coluna de perfuração ou pelo controle da abertura da válvula *choke*, posicionada na saída do anular (FREITAS, 2013). A perfuração onde a pressão anular de fundo é mantida entre a pressão de poros e a pressão de fratura é chamada perfuração *overbalance* (GRACE, 2003; WALDMANN *et al*, 2006). Há outro tipo de perfuração chamada *underbalance*, que acontece quando a pressão anular de fundo está entre a pressão de poros e a pressão de colapso, neste tipo de perfuração é comum o fluxo de fluidos nativos para a região anular do poço (NYGAARD & NÆVDAL, 2006).

Na perfuração convencional a pressão anular de fundo deve ser maior que a pressão dos fluidos presentes na formação e menor que a pressão que provoque a fratura da matriz porosa do poço. Caso a pressão anular de fundo esteja abaixo da pressão de poros, ocorre a migração dos fluidos nativos do reservatório para o poço (*kick*). Caso a pressão anular de fundo esteja maior que a pressão de fratura, haverá a perda do fluido de perfuração para o reservatório (perda de circulação). Neste trabalho de dissertação de mestrado, será estudado o comportamento da pressão anular de fundo durante a migração de gás proveniente do reservatório visando a rejeição deste distúrbio.

A perda de circulação encarece a operação pela perda de fluidos e diminui a produtividade do poço, todavia, a migração de fluidos do reservatório para o anular causa

uma variação nas propriedades do fluido de perfuração ao longo do poço, o que pode levar a uma leitura errada das variáveis de controle do poço e a um possível fluxo descontrolado de fluido nativo ou *blowout* (VIEIRA, 2009).

Faz-se necessário o estudo de estratégias que facilitem o controle desta pressão anular de fundo, prevenindo a ocorrência de sinistros e maiores prejuízos. Boa parte das sondas de perfuração ainda realizam o controle da pressão anular de fundo manualmente (CARLSEN, NYGAARD & NIKOLAOU, 2013). Tendo em vista esse cenário, busca-se o uso de controladores automáticos e diferentes estratégias de controle.

Vieira (2009) controlou a pressão anular de fundo em unidade experimental através de controle clássico empregando a vazão da bomba de lama como variável manipulada. Russano (2014) fez o controle da pressão anular de fundo em unidade experimental na presença de perda de circulação.

A maior parte dos trabalhos presentes na literatura trata da simulação do comportamento da pressão anular de fundo (NYGAARD & NÆVDAL, 2006; ZHOU & NYGAARD, 2011; OLIVEIRA *et al*, 2013; WANG & SUN, 2014). Trabalhos experimentais que tratam do controle da pressão anular de fundo são raros (FREITAS, 2013; RUSSANO, 2014; HAUGE *et al*, 2013). Neste contexto, Nygaard & Nævdal (2006) simularam o controle da pressão anular de fundo em condições de *underbalance* por controle clássico e preditivo. Tais autores compararam os resultados do controle automático com o controle manual e constataram uma maior eficiência do controle automático. Zhou & Nygaard (2011); Wang & Sun (2014); e Oliveira *et al*. (2013) também fizeram trabalhos para simular a pressão anular de fundo.

## **2.2 Kick**

Durante a perfuração é fundamental que o fluido de perfuração apresente uma densidade que produza uma pressão hidrostática no anular capaz de igualar ou vencer a pressão dos fluidos nativos. Quando a pressão no reservatório é maior que a pressão no anular, somada à perda de carga advinda da matriz porosa da rocha, os fluidos do reservatório migram para o anular e ascendem para a superfície. Este fenômeno é chamado de *kick* e geralmente, os fluidos são compostos por óleo, água e/ou gás (THOMAS, 2004; MITCHELL & MISKA, 2011). O *kick* (Figura 3) traz riscos operacionais, como perda do poço e perda de tempo produtivo. Este fenômeno acontece com mais frequência nas etapas de perfuração do poço (AHMED, HEGAB & SABRY, 2015).

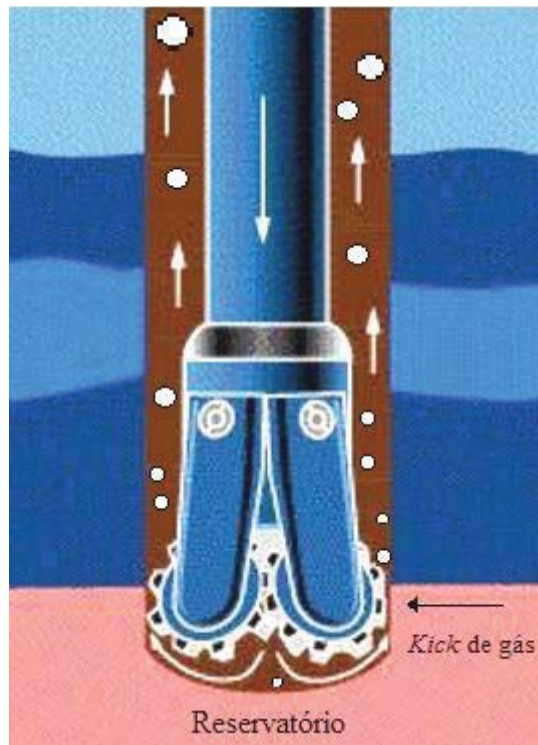


Figura 3 - Representação esquemática da ocorrência de *kick* no fundo do poço. Fonte: Planetforlife, 2010.

O fluxo descontrolado de fluido do reservatório para o poço e deste para a atmosfera ou fundo do mar é conhecida como *blowout*. As sondas de perfuração devem ter planos de contingência para controlá-lo, limitar sua extensão e tratar seus danos colaterais. O *blowout* pode trazer a perda da reserva e de equipamentos, perda de vidas humanas, danos ao meio ambiente, prejuízos financeiros e à imagem da empresa operadora (VAJARGAH & OORT, 2015). A Figura 4 demonstra o potencial destrutivo do evento.



Figura 4 – *Blowout* no Golfo do México. Fonte: Schwartz, 2014

A entrada de fluidos nativos do reservatório no poço durante a perfuração (*kick*) pode acontecer em decorrência de (GRACE, 2003):

- Utilizar-se uma lama de perfuração com baixa densidade, o que causa uma pressão hidrostática insuficiente para conter a pressão do reservatório;
- Perder fluido de perfuração para uma fratura na rocha reservatório, causando uma queda de pressão hidrostática, deixando a pressão no poço menor que a pressão no reservatório;
- Existência de zonas de descontinuidade no fluido de perfuração (corte da lama) causadas por gás, água ou óleo, podem provocar a redução da densidade do fluido, facilitando a ocorrência do *kick*;
- Não deixar o poço totalmente cheio com lama de perfuração pode motivar um *kick*. Acontece, por exemplo, quando se retiram os tubos utilizados para a perfuração, e não se coloca no poço o volume correspondente ao metal retirado.

### 2.2.1 *Kick* de gás

Os influxos gasosos geralmente são de gás natural, composto em sua maioria por metano, ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) ou carbônico ( $CO_2$ ). O metano é um gás inflamável e de densidade menor do que a do ar, logo é necessária cautela em casos de vazamento em ambiente confinado, visto que este gás se acumulará na parte superior do ambiente

(SANTOS, 2014). O ácido sulfídrico apresenta uma toxicidade relevante, logo é preciso que estejam disponíveis equipamentos de segurança de poço e de prevenção específicos.

### 2.2.2 Percepção de *kick*

Vajargah e Oort (2015) afirmaram que a importância de cada parâmetro para a detecção de *kick* depende de vários fatores como: tipo de fluido de perfuração, profundidade do poço, vazão do fluido e formação geológica. Dentre os parâmetros que devem ser observados para a detecção do *kick* estão a velocidade de perfuração, a variação da pressão anular de fundo e antes da válvula *choke* e o aumento do volume do tanque de retorno do fluido (GALVES, 2013). Grace (2003) citou o corte da lama de perfuração por óleo, gás ou água e a variação na pressão da bomba como parâmetros para a percepção de *kick*. Estão discutidos abaixo, mais detalhadamente, os parâmetros para a percepção do *kick* (GRACE, 2003; TELAS, 2008; SANTOS, 2014):

1. A primeira indicação da ocorrência de *kick* é um suave aumento na taxa de perfuração do poço, geralmente este evento é interpretado como a chegada a uma zona de formação porosa;
2. O *kick* acontece durante a perfuração porque encontra-se uma região reservatória de pressão mais alta do que pressão anular de fundo, ou a pressão no anular sofre uma queda, e o equilíbrio de pressões entre o reservatório e o anular é desestabilizado. O desbalanceio entre estas duas pressões, gera um gradiente de pressão entre o reservatório e o anular.
3. Um estado estacionário entre o fluido que é bombeado, através do tubo de perfuração, e o que volta para os tanques, após passar pela válvula *choke* e pelo sistema de separação dos sólidos, é atingido durante a perfuração. A entrada de fluido nativo do reservatório causa o aumento da vazão na região anular, elevando o nível do tanque de retorno. Desta forma, o acompanhamento do nível do tanque de retorno e/ou da variação entre vazões de entrada e saída são extremamente importantes na identificação do *kick*. Porém, o *kick* também pode ser mascarado pela quantidade de sólidos que são carreados pelo fluido de perfuração ao tanque de retorno. No caso, os sólidos mais finos ou solúveis passam pelas peneiras de limpeza, causando o aumento do nível do tanque. Além disso, uma leitura inexata pode ser realizada quando as peneiras se rompem. Para o processo de perfuração real, variações maiores que 10 barris no nível do tanque de retorno devem ser consideradas críticas.
4. Fluxo vindo do anular com as bombas desligadas é um indicativo primário de *kick*.

5. Se o poço comporta menos volume em fluido de perfuração do que o volume de aço retirado em manobra, ou se durante o retorno do tubo de perfuração na manobra, o poço expelir mais volume de fluido do que o volume em aço da coluna de perfuração colocado, provavelmente um *kick* estará acontecendo.
6. Em sondas com sensores para gás, um *kick* pode ser percebido por tal sensor: Uma pequena entrada de gás detectada deve ser levada em conta, pois pode ocasionar uma alteração na massa específica do fluido, diminuindo a pressão anular de fundo, com isso, facilitando a entrada de mais fluido do reservatório para o anular.
7. Quando acontece a entrada de fluidos do reservatório no anular, estes fluidos empurram a coluna de perfuração para cima, provocando uma perda do peso do tubo de perfuração (empuxo), porém provavelmente as indicações acima citadas (1, 2 e 3) acontecerão antes ou simultaneamente à perda de peso do tubo de perfuração.
8. Alteração na salinidade do fluido de perfuração pode indicar um *kick* de água.

Freitas (2013) realizou estudos experimentais onde o *kick* de líquido foi constatado através da variação da vazão no anular em planta piloto, mensurada por um medidor de fluxo coriólis. Já a empresa Weatherford oferece sistemas de identificação de *kick*, normalmente caros, que medem vários parâmetros na superfície como: vazão mássica e volumétrica de retorno, densidade, temperatura e peso da lama. O sistema pode ainda identificar o teor de gás contido na superfície. A Weatherford produziu paralelamente um *software* que trabalha estes dados e aponta quando o sistema passa por um *kick* ou influxo (FU *et al*, 2015). Além disso, os pesquisadores Nayeem, Venkatesan & Khan (2016) detectaram o *kick* por uma leitura multiparamétrica de variáveis de superfície: Condutividade elétrica, densidade, pressão anular de fundo e vazão mássica. Vajargah e Oort (2015) propuseram um algoritmo para a detecção e tomada de decisão relativa ao *kick*, baseado em dados e comportamentos observados em simulações, que partem de modelos fenomenológicos. Em uma sonda de perfuração *offshore* localizada no Egito, Ahmed, Hegab & Sabry (2015) estudaram a detecção de *kick* por uma ferramenta chamada “*mud logging*”. Esta ferramenta faz a leitura de variáveis físico-químicas do fluido de perfuração e, através de um profissional em campo, avalia parâmetros geológicos dos cascalhos. O sistema coleta, processa e apresenta o teor de gás presente, a taxa de penetração, o peso sobre a broca, rotação, torque, o peso do fluido e trajetória do poço. Como já discutido acima, essas informações são essenciais para a detecção do *kick*.

O melhor método de detecção é aquele que faz a leitura e interpretação do maior número de variáveis relevantes possíveis, porém os sistemas de detecção são caros. Logo, a companhia deve buscar conciliar custo e segurança em seu processo, realizando um estudo prévio de todas as etapas do processo de perfuração e estipulando quais métodos são viáveis e necessários (SANTOS, 2014).

### **2.2.2.1 Problemas associados à percepção do *kick* de gás**

A detecção do *kick* pode ser retardada pela solubilização do gás invasor no fluido de perfuração, principalmente do gás natural nos fluidos base óleo (GALVES, 2013).

Wang & Sun (2014) retratam problemas associados a formações contendo hidratos. Os hidratos deixam o reservatório vaporizados e, ao atingir uma zona de baixa temperatura e alta pressão, mudam de fase enquanto sobem pelo anular. Geralmente a mudança de fase acontece próximo ao fundo do mar. Este comportamento gera leituras de parâmetros que podem facilmente ser mal interpretados durante o controle de *kick*.

Durante a subida de gás pelo anular o mesmo se expande gerando uma série de problemas. A expansão do gás expulsa fluido de perfuração do poço diminuindo a pressão hidrostática do poço. A queda de pressão facilita a invasão de mais fluido do reservatório para o anular, podendo gerar um evento incontrolável, chamado *blowout* (TELAS, 2008). O volume adicionado pela expansão do gás causa um aumento considerável no nível do tanque de retorno.

### **2.2.3 Expansão**

Por menor que seja o volume de gás que adentra o anular, este deve ser considerado, pois a expansão do gás pode inviabilizar o controle da pressão anular de fundo. O volume ocupado pelo gás diminui a densidade média do fluido no anular, reduzindo a pressão hidrostática, o que dificulta a reposição das pressões responsáveis por manter os fluidos do reservatório na matriz porosa. Para um sistema de perfuração com 4000 metros de profundidade, a entrada de 1 metro cúbico de gás parece desprezível, porém Ahmed, Hegab & Sabry (2015) afirmam que, com a expansão, este 1 metro cúbico pode vir a se tornar 50 metros cúbicos ou mais, na profundidade de 500 metros.

A expansão do gás é comumente calculada por equações termodinâmicas que levam em consideração a compressibilidade do fluido. Lima (2006) propõe a Equação 2.1 para cálculo da expansão do gás quando o poço se encontra fechado.

$$\Delta V = C_{lama} \cdot V_{lama} \cdot \Delta P \quad \text{Equação 2.1}$$

Em que,  $C_{lama}$  é a compressibilidade da lama ( $\text{bar}^{-1}$ );  $V_{lama}$  é o volume de lama ( $\text{m}^3$ ) e  $\Delta P$  representa a variação da pressão em um ponto fixo do poço durante a subida do *kick*. Já a migração natural do gás, isto é, desconsiderando a migração provocada pela expansão, é calculada pela Equação 2.2.

$$X_1 = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad \text{Equação 2.2}$$

Em que,  $X_1$  é a migração do gás (m),  $\rho$  é a densidade da lama ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e  $g$  é a gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ ). A migração que acontece pela expansão do gás é descrita pela Equação 2.3.

$$X_2 = \frac{P_1 - (P_1 + P_{atm}) \cdot \frac{V_{gás, inicial}}{V_{lama}}}{\rho \cdot g} \quad \text{Equação 2.3}$$

Em que:

$P_1$  – Pressão no fundo do anular no início do *kick*;

$V_{gás, inicial}$  – volume de gás no início do *kick*;

$V_{lama}$  – volume de lama presente no anular.

A migração total será a soma de  $X_1$  e  $X_2$ . Desse modo, a velocidade de ascensão do gás será a migração dividida pelo tempo de subida. Quando o poço permanece aberto durante o *kick* de gás, por exemplo, a expansão pode ser medida de maneira indireta, pelo ganho de volume no tanque de nível. A Figura 5 representa a relação entre expansão e variação de nível no tanque. Nesta figura, a expansão do gás é controlada através do aumento da pressão no poço pela variação da abertura da válvula *choke*.



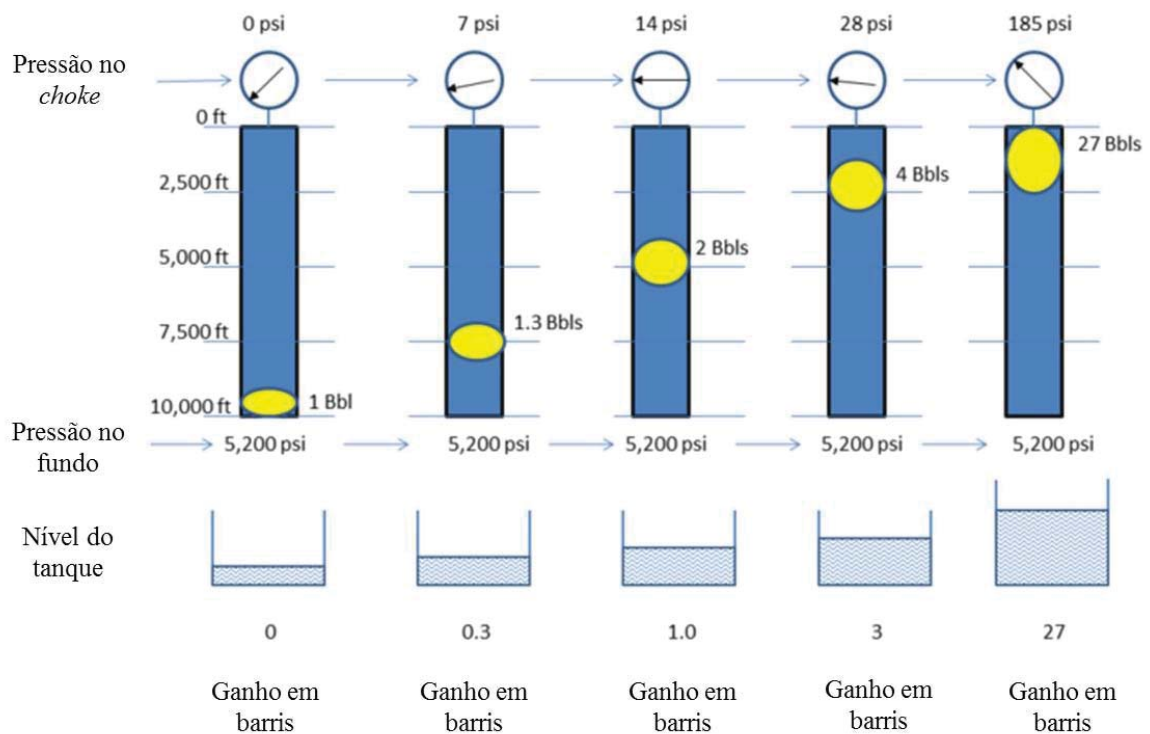


Figura 5 - Expansão controlada do gás durante a *kick*. Demonstração da relação expansão e aumento do nível do tanque. Fonte: Adaptado de Watson, 2015.

Outro meio de calcular a expansão é a Equação 2.4, onde, partindo de um volume inicial pode-se encontrar o volume final do gás (LIMA, 2006).

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \text{Equação 2.4}$$

## 2.2.4 Controle de *kick* (métodos tradicionais)

Galves (2013) ressaltou que é importante evitar ao máximo a ocorrência de *kick*, e, caso este aconteça, deve ser mitigado o mais rápido possível. Supondo que ao levar um *kick* de gás o operador decida deixar o poço fechado, o aumento da pressão, em todo o poço, será proporcional à altura que o gás subir, logo, a pressão tende a aumentar gradativamente. A pressão no poço pode ficar tão alta que cause: a perda, desmoronamento ou fratura excessiva do poço. Por outro lado, deixar o poço aberto por um longo tempo durante o *kick*, causa a expulsão do fluido de perfuração. Assim sendo, a lama é retirada do anular graças a expansão do gás e à ascensão do gás por diferença de densidade, levando ao decaimento da pressão hidrostática necessária para manter os fluidos nativos contidos no reservatório. Isso pode levar a um *blowout*. Neste cenário, a melhor estratégia é permitir uma expansão controlada do gás, variando a abertura da válvula *choke* e a densidade do fluido de perfuração, enquanto o fluido invasor migra, e circulá-lo para fora do poço (SANTOS, 2014).

O fluxograma abaixo (Figura 6) ilustra os principais procedimentos realizados para conter o *kick*. Todos os procedimentos buscam manter constante a pressão anular de fundo.

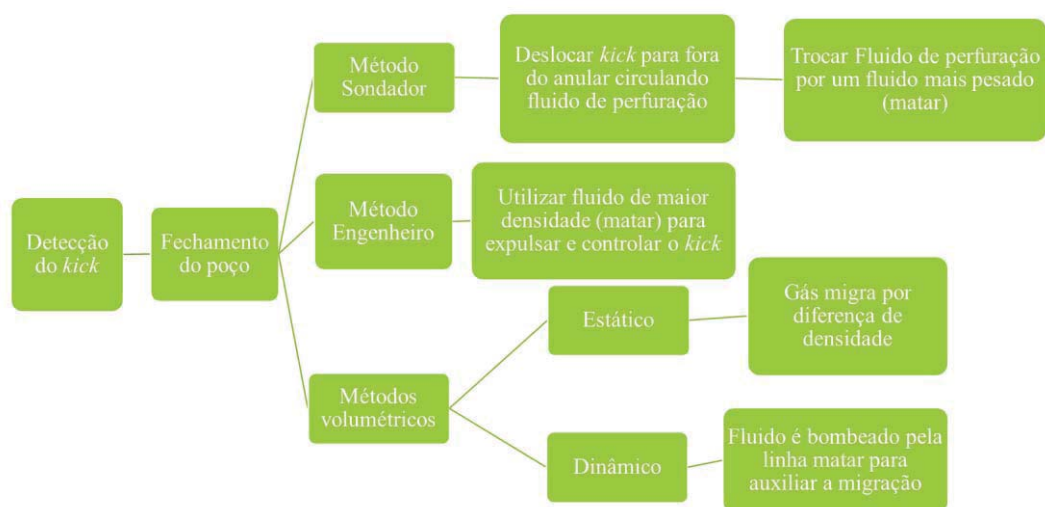


Figura 6 - Métodos de contenção do *kick* em fluxograma. Fonte: O autor.

#### 2.2.4.1 Método do sondador

A bomba é acionada à uma velocidade baixa, mantendo-se a pressão do manômetro instalado antes do *choke* constante. Durante o procedimento é circulado o fluido de perfuração original. Bombeia-se nestas condições um volume equivalente ao volume do anular, desliga-se a bomba e o *choke* é fechado. Verifica-se as pressões do *choke* e da bengala (coluna de perfuração), estas devem estar iguais e constantes. Bombeia-se uma lama mais pesada (fluido de matar), mantendo a pressão no *choke*. Após o bombeio, a bomba é desligada, fecha-se o *choke* e as pressões são observadas. As pressões no *choke* e na bengala devem estar iguais. Após todos os procedimentos, o poço é aberto e verifica-se se o influxo foi sanado (TELAS, 2008).

#### 2.2.4.2 Método engenheiro

O método engenheiro é semelhante ao método sondador, porém é mais rápido. Neste, circula-se diretamente um fluido de maior densidade (fluido de matar), a fim de controlar o *kick*. Deve-se acompanhar a pressão na bengala, já que neste método, o gás sofre uma expansão controlada, e a pressão no *choke* varia ao longo desta expansão e do deslocamento do gás pelo anular.

O método do engenheiro é o método mais rápido de ser aplicado, pois a expulsão do fluido invasor e o amortecimento do poço ocorrem na mesma operação. Este método gera menores pressões no *choke*, conforme mostrado na Figura 7.

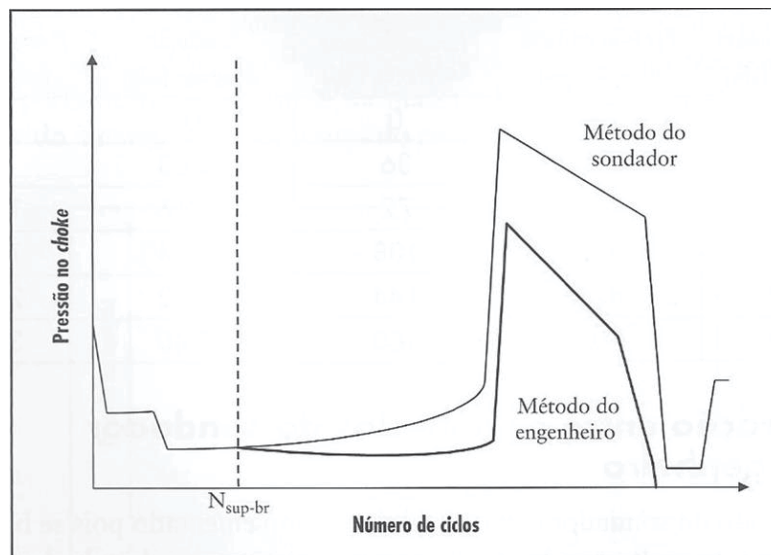


Figura 7 - Pressão no *choke* para método engenheiro e método sondador. Fonte: Santos (2014).

Segundo Santos (2014), durante o tempo que o fluido é adensado para a execução do método engenheiro, o poço está sem circulação, logo a expansão do gás deve ser controlada. A expansão do gás, por apresentar um comportamento inerentemente transiente, prejudica a definição da pressão de poros, tornando difícil o controle do poço sobre *kick* de gás. A parada na operação (bombas desligadas), para adensar o fluido e aplicar o método do engenheiro, aumenta as possibilidades de um entupimento dos jatos da broca e prisão da coluna de perfuração. Durante a circulação do fluido de matar, no método engenheiro, a pressão no *choke* não se mantém constante, já que o gás está se expandindo naquela linha, logo é necessário que se faça uma avaliação e acompanhamento criteriosos da pressão na bengala durante a circulação do *kick*.

Já o método do sondador, baseia-se em manter constante as pressões no tubo bengala e no *choke* durante o deslocamento do fluido de perfuração, logo é um método mais simples de ser implementado. Além disso, trabalha-se apenas com dois fluidos no sistema: fluido de perfuração e fluido invasor, e não com três como acontece no método do engenheiro. Isto diminui a quantidade de erros e facilita o controle operacional. O método do sondador é mais utilizado por sua simplicidade, embora o método engenheiro apresente mais vantagens caso a sonda possua equipamentos para o preparo de fluidos de perfuração que seja eficiente (GRACE, 2003).

#### 2.2.4.3 Métodos volumétricos (SANTOS, 2014)

Os métodos volumétricos são divididos em estático e dinâmico. Estes métodos são utilizados quando a aplicação dos métodos do sondador e engenheiro não são

possíveis. A situação acontece, por exemplo, quando o fluido de perfuração não pode ser circulado através da bengala, para deslocar o *kick*, por alguma falha operacional. Procura-se manter a pressão em um valor fixo e levemente maior que a pressão de formação.

No método volumétrico estático, o poço é fechado e mantém-se constante a pressão anular de fundo, controlando a subida e expansão do gás através da abertura do *choke*. A perda de pressão hidrostática, causada pela saída de fluido de perfuração empurrado pela subida do gás, é compensada pela pressão gerada por atrito no *choke*. A saída do fluido é controlada, medindo-se constantemente o volume de saída, o que dá nome ao método.

O método volumétrico dinâmico diferencia-se do estático por haver um bombeio de fluido de perfuração na linha de matar para a linha do *choke*. A Figura 8 demonstra o método volumétrico dinâmico.

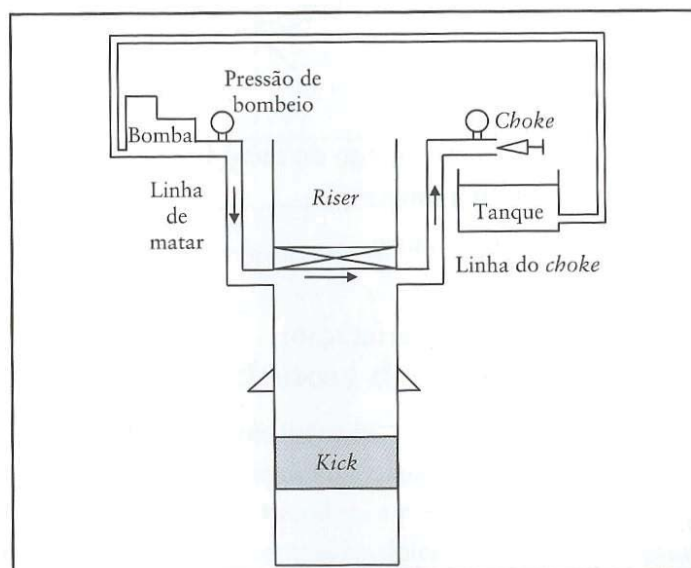


Figura 8 - Método volumétrico dinâmico. Fonte: Santos, 2014.

Voltado para o controle de *kick* há o trabalho de Freitas (2013) que efetuou o controle de *kick* de líquido em unidade experimental, identificando o fenômeno pela variação na vazão do anular. Hauge *et al.* (2013) estudaram o controle do *kick* de gás via simulação, e empregaram uma planta experimental para o estudo da perda de circulação.

Neste trabalho de dissertação de mestrado o *kick* será identificado pela variação do nível do tanque, será mitigado pela ação da válvula *choke* e será expulso sob expansão controlada na unidade experimental, reconfigurando a lei de controle *feedback*↔*feedforward* quando o *kick* for detectado. Sendo assim, a estratégia desenvolvida é classificada como não convencional, não havendo necessidade de fechar

o poço, embora haja necessidade de um *managed pressure control* (MPD) na sonda para sua implementação. Paralelamente pretende-se simular o comportamento do poço construindo-se um modelo matemático.

### 2.3 Modelagem

A necessidade de conhecer o processo é indispensável para conseguir controlá-lo. O conhecimento da relação de causa e efeito entre as variáveis do processo dá clareza do que realmente afeta o sistema e de como o sistema se comporta nas mais variadas situações. Este conhecimento facilita a interpretação das variáveis do sistema, quando em operação, e auxilia na tomada de decisões otimizadas, voltadas para um melhor custo benefício de produção e para um controle mais seguro da planta. A modelagem do processo possibilita o conhecimento do comportamento do sistema, sem a necessidade de a planta estar em operação, auxiliando no projeto da planta, na segurança da planta e na tomada de decisão (LUYBEN, 1996).

A descrição matemática das características dinâmicas do processo são geralmente descritas por equações diferenciais, baseadas em princípios físicos que governam o processo. As leis físicas são gerais e, durante a modelagem, é comum a negligência de variáveis que não afetem significativamente o sistema para a situação modelada (OGATA, 2009).

A modelagem aplicada aos processos de perfuração busca estudar o comportamento da pressão em pontos chave para o controle do poço: Pressão anular de fundo, pressão antes da válvula *choke* e pressão na bengala. Os modelos partem de equações diferenciais baseadas nos princípios fundamentais da conservação e utilizam relações constitutivas para que o grau de liberdade seja zero (STAMNES *et. al.*, 2007; ZHOU & NYGAARD, 2011; CALADO, CARVALHO NETO & SOTOMAYOR, 2011; HAUGE *et. al.*, 2013; MENG *et. al.*, 2015). Aarsnes *et. al.* (2016) fazem uma revisão de literatura dos diversos modelos matemáticos desenvolvidos para simular o processo de perfuração em seus diferentes cenários, sendo classificados como: modelos de alta fidelidade; modelos simplificados com equações diferenciais ordinárias (EDO) e Modelo com derivação de fluxo (com uso de equações diferenciais parciais - EDP). O modelo aqui desenvolvido classifica-se como modelo simplificado com EDO, modificado para modelar fluxo bifásico.

A literatura apresenta diversos trabalhos de simulação da pressão anular de fundo, cada um com suas considerações: Stamnes *et al.* (2007) trataram a densidade e o fator de

atrito como constantes desconhecidas a serem estimadas comparando os resultados simulados com dados da perfuração do mar do norte. Feng *et al.* (2015) simularam o comportamento do poço quando um *kick* de gás ocorre no início do processo de perfuração, onde o poço ainda não tem uma grande profundidade e apresenta um diâmetro considerável. Khezrian, Hajidavalloo & Shekari (2015) consideraram em suas simulações a fuga da idealidade do gás, calculando constantemente o estado físico-químico do gás via equação de estado proposta por Dranchuk & Abu-Kassem (1975). Estes autores compararam seus dados com dados de campo. Lage (2000) estudou modelos de escoamento bifásico para prever parâmetros de fluxo.

Dentre os autores que compararam dados simulados com dados da perfuração real ou de uma planta experimental, destacam-se: Meng *et al.* (2015) que simularam o comportamento da pressão anular de fundo, na ocorrência de *kick* de gás, e compararam os resultados com dados de uma unidade experimental. Enquanto, Avelar, Ribeiro & Sepehrnoori (2009) compararam os dados da simulação com dados da perfuração real na bacia de Santos - Brasil.

Uma análise da literatura revela que poucos trabalhos são voltados para o controle do fenômeno *kick*, principalmente no que diz respeito a *kick* de gás. Dentre os trabalhos que simulam o controle do poço possibilitando o desenvolvimento de novas estratégias de controle, destacam-se: Nygaard & Nævdal (2006) que simularam o controle do poço em perfuração *underbalance* com um modelo fenomenológico, utilizando controle preditivo não linear para o controle do poço, durante parada da bomba para operações de conexão de tubos e afins. Carlsen, Nygaard & Nikolaou (2013) simularam o controle da pressão anular de fundo e do *kick* por meio da manipulação do índice de abertura do *choke* e a frequência da bomba de forma sinérgica por três estratégias de controle: PI, IMC e MPC.

No trabalho de Hauge *et al.* (2013) o *kick* foi identificado por um algoritmo que avalia a variação na vazão do reservatório para o anular e foi controlado manipulando-se a abertura da válvula *choke*. No modelo de Zhou & Nygaard (2011), os autores identificavam o *kick* pela variação do delta entre vazão de entrada e saída e controlaram o *kick* por controlador *feedback* aplicado à uma bomba dentro do oceano. O *kick* não entrava no anular de forma contínua como no trabalho de Nygaard & Nævdal (2006) e era proporcional à diferença entre pressão do reservatório e pressão anular de fundo.

Os estudos em simulação permitem avaliar o comportamento de variáveis que não são lidas no poço pela falta de instrumentação adequada, avaliar o comportamento do

poço em profundidades diferentes, retratar como o poço se comportaria na presença de distúrbios e testar as mais variadas estratégias de controle.

## 2.4 Controle

O processo de implantação de controle produz perguntas como: Quais variáveis precisam ser controladas? Qual o valor desejável para estas variáveis? O que pode ser feito para que estas variáveis atinjam este valor desejado? Como mensurar o valor destas variáveis?

Normalmente a leitura das variáveis é feita por sensores, estes podem se comunicar com computadores ou um operador, que ao realizar a leitura da variável de saída, age a fim de garantir que a variável permaneça o mais próximo possível do valor desejado (*set-point*). Esta ação pode ser o fechamento ou abertura de uma válvula ou até a ligação de um sistema que trabalha em paralelo. A variável que tenta manter a variável controlada em um *set-point*, dá-se o nome de variável manipulada. Já o instrumento que é acionado nesta ação, chama-se de elemento final de controle. Eventualmente, o sistema que se encontra controlado em estado estacionário, pode receber uma perturbação que gere uma modificação na variável controlada, a esta perturbação se dá o nome de distúrbio. Como exemplo de variáveis controladas temos a vazão, a temperatura, a pressão, a densidade, a estabilidade elétrica, dentre outros. Para ilustrar elementos finais de controle podemos citar diversos tipos de válvulas, resistores usados para aquecimento, bombas utilizadas para controlar a vazão ou pressão (VALDMAN; FOLLY; SALGADO, 2008).

O controle automático apresenta maior precisão, quando comparado ao controle realizado por um operador. Neste cenário, variadas estratégias de controle automático vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos para melhorar a precisão do controle das variáveis. Dentre estas estratégias destacam-se: o controlador *feedback*, o controlador *feedforward* e a reconfiguração da lei de controle, as quais serão abordados neste trabalho. Para facilitar o entendimento das técnicas de controle, tornou-se comum a utilização de diagramas, onde classificam-se: Variáveis de entrada como as variáveis que tem potencial de modificar o processo e variáveis de saída como as respostas geradas pelo processo (STEPHANOPOULOS, 1984).

### 2.4.1 Controle por realimentação (*feedback*)

Para explicitar o funcionamento de um controlador *feedback* propõe-se um sistema que representa o processo de perfuração, composto por: um tanque, uma bomba e uma válvula de controle. Tubulações são utilizadas para ligar estes equipamentos em série de forma a representar o sistema de perfuração. Neste sistema pretende-se controlar a pressão em determinado ponto da tubulação, onde é instalado um transdutor de pressão. Este ponto representa o fundo do poço e a válvula (válvula *choke*) está instalada após este ponto, na superfície. Por exemplo, ilustra-se um teste servo (mudança de *set-point*): ao ligar a bomba em 20 Hz, a pressão no fundo do poço é 60 psi alterar a pressão para 80 psi (*set-point*). Para manipular a pressão anular de fundo o índice de abertura da válvula pode ser modificado. O sensor faz a leitura da pressão anular de fundo (60 psi) e informa ao controlador. O controlador compara o valor lido pelo sensor com o valor desejado (80 psi) e, envia um sinal ao elemento final de controle (válvula *choke*), reduzindo seu índice de abertura a fim de aumentar a pressão. Para a implantação de um teste regulatório, supõe-se que no fundo do poço haja um vazamento (perda de fluido), a pressão cairia inesperadamente. O sensor irá identificar esta variação de pressão e irá acionar o elemento final de controle a fim de corrigir a pressão. Há um atraso de tempo até que o sensor identifique a variação na pressão, a este tempo dá-se o nome de atraso ou tempo morto (OGATA, 2009). O esquema é ilustrado pela Figura 9.

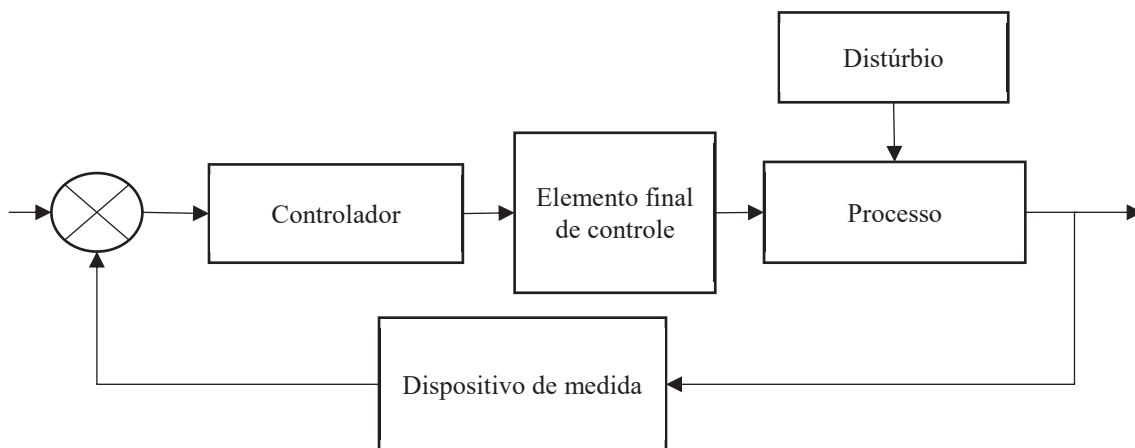


Figura 9 - Esquema de controle *feedback*. Fonte: O autor.

O controlador pode tomar diversos tipos de ações quando recebe o sinal do sensor e o compara com o *set-point*. A ação Proporcional (P) é regida pela Equação 2.5:

$$P(t) = p_s + K_c \cdot e(t) \quad \text{Equação 2.5}$$



Onde  $P(t)$  representa o sinal que a variável manipulada deverá receber,  $p_s$  representa o valor da variável manipulada quando o erro é zero,  $K_c$  é um parâmetro do controlador conhecido como ganho proporcional,  $t$  é o tempo e  $e(t)$  é o erro, diferença entre o *set-point* e o valor da variável controlada (SEBORG *et al.* 2011).

A ação Proporcional Integral (PI) é descrita pela Equação 2.6, também podendo ser representada pela Equação 2.7. A Equação 2.7 é conhecida como equação da velocidade e é mais utilizada, por não ser necessário o cálculo da integral.

$$P(t) = p_s + K_c \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_I} \cdot \int_0^t e(t^*) \cdot dt^* \right] \quad \text{Equação 2.6}$$

$$\Delta P_n = K_c \cdot \left[ (e_n - e_{n-1}) + \frac{\Delta t}{\tau_I} \cdot e_n \right] \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde  $\tau_I$  é o parâmetro do controlador ligado à ação integral.

O processamento do sinal de erro através da ação Proporcional Integral costuma ser eficiente em diversos processos industriais (FREITAS, 2013). Neste trabalho utilizou-se este tipo de ação (PI) para o controlador *feedback*.

#### 2.4.1.1 Identificação do processo

Os parâmetros do controlador PI,  $K_c$  e  $\tau_I$ , são necessários para a implementação da ação de controle. Dentre os métodos existentes na literatura para a obtenção destes parâmetros temos:

#### 2.4.1.2 Método da curva de reação

Uma perturbação degrau de magnitude ( $M$ ) conhecida é aplicada em malha aberta ao processo que está em estado estacionário. A resposta do sistema a esta perturbação é chamada de curva de reação do sistema (Figura 10). A partir da curva de reação é possível estimar os parâmetros do sistema (ganho ( $K$ ), tempo morto ( $t_d$ ) e constante de tempo ( $T$ )), e posteriormente, os parâmetros do controlador.

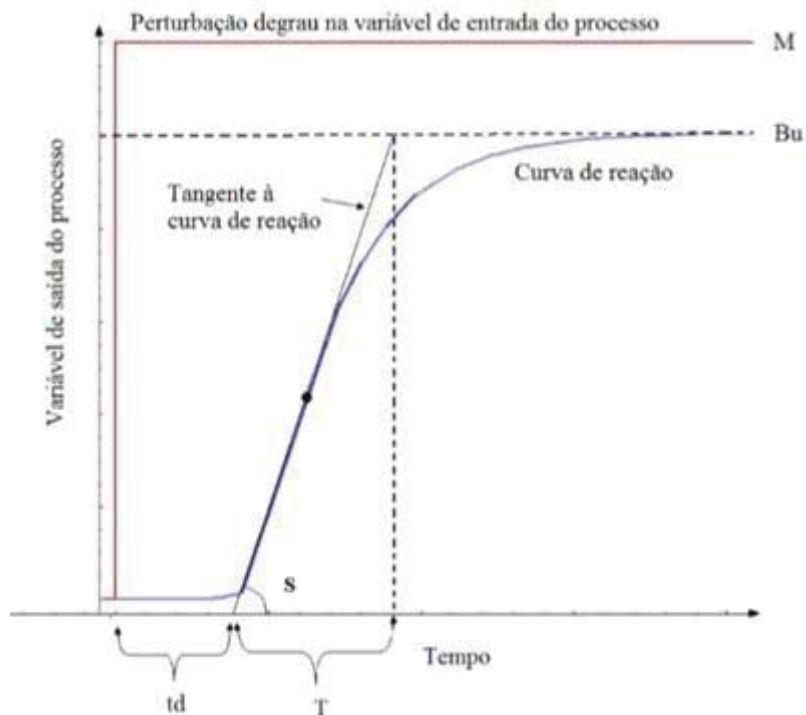


Figura 10 - Estimação dos parâmetros do controlador pelo método da curva de reação.  
 Fonte: Freitas, 2013.

Conforme observa-se na Figura 10, a perturbação degrau é definida como sendo uma perturbação de magnitude conhecida e constante ao longo do tempo. Tempo morto ( $t_d$ ) é o tempo que a variável de saída leva para responder a uma perturbação degrau na variável de entrada. O tempo contado após o tempo morto ( $t_d$ ) até a reta R é chamado constante de tempo ( $T$ ). A tangente à curva no ponto de inflexão (ângulo  $\alpha$ ) será chamada S. O ganho do sistema ( $K$ ) será a razão entre a magnitude da resposta ( $Bu$ ) pela do degrau ( $M$ ) (Equação 2.8) e o  $T$  será a razão entre a magnitude da resposta do sistema ( $Bu$ ) e a tangente do ângulo  $\alpha$  ( $S$ ) (Equação 2.9):

$$K = \frac{Bu}{M} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$T = \frac{Bu}{S} \quad \text{Equação 2.9}$$

### 2.4.1.3 Método Sundaesan-Krishnaswamy

Boa parte dos processos industriais são passíveis de ruídos eletromagnéticos ou ruídos de processo. Estes ruídos dificultam a definição do ponto de inflexão, e consequentemente, dificulta a implementação do método da curva de reação. Sendo assim, Sundaesan & Krishnaswamy (1977) desenvolveram uma metodologia empírica para a obtenção dos parâmetros do sistema: Quando a variável de saída atinge 35,3% e

85,3% do seu valor final, dois instantes de tempo,  $t_1$  (35,3%) e  $t_2$  (85,3%), são registrados respectivamente. O tempo, para a obtenção de  $t_1$  e  $t_2$ , é contado a partir do momento da perturbação. A Figura 11 ilustra a metodologia.

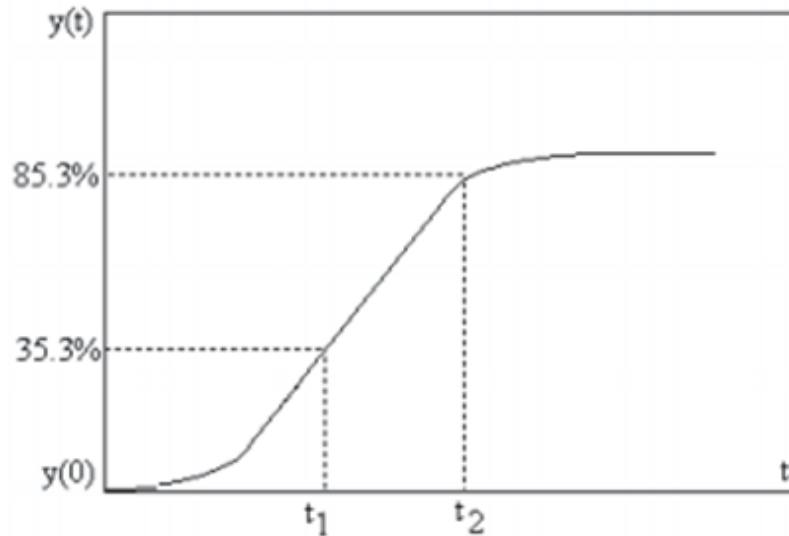


Figura 11 - Método de obtenção dos parâmetros do sistema por Sundaresan & Krishnawamy (1977). Fonte: Freitas, 2013.

A partir dos valores  $t_1$  e  $t_2$ , as Equações 2.10 e 2.11 são utilizadas para o cálculo dos parâmetros do sistema ( $t_d$  e  $T$ ):

$$t_d = 1,3 \cdot t_1 + 0,29 \cdot t_1 \quad \text{Equação 2.10}$$

$$T = 0,67 \cdot (t_2 - t_1) \quad \text{Equação 2.11}$$

No método de Sundaresan & Krishnaswamy (1977) o ganho é encontrado da mesma maneira que no método da curva de reação.

#### 2.4.1.4 Estimação dos parâmetros do controlador em malha aberta

Ziegler & Nichols (1942) e Cohen & Coon (1953) desenvolveram métodos que serão utilizados neste trabalho para a obtenção dos parâmetros do controlador. Nestes métodos, os parâmetros do controlador são estimados a partir dos parâmetros do sistema.

A Tabela 1 apresenta as relações propostas por Ziegler-Nichols (1942) para obtenção dos parâmetros do controlador.

Tabela 1 - Parâmetros do controlador por Ziegler &amp; Nichols (1942)

Controlador	Parâmetros		
	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
P	$\frac{1}{t_d \cdot S^*}$	-	-
PI	$0,9 \frac{1}{t_d \cdot S^*}$	$3,33t_d$	-
PID	$1,2 \frac{1}{t_d \cdot S^*}$	$2t_d$	$0,5t_d$

$S^* = S/M$

Fonte: Ziegler & Nichols, 1942.

A Tabela 2 mostra as relações propostas por Cohen & Coon (1953) para a obtenção dos parâmetros do controlador.

Tabela 2: Parâmetros do controlador por Cohen &amp; Coon (1953),

Controlador	Parâmetros		
	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
P	$\frac{1}{K} \frac{T}{t_d} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{t_d}{T}\right)$	-	-
PI	$\frac{1}{K} \frac{T}{t_d} \left(0,9 + \frac{1}{12} \frac{t_d}{T}\right)$	$t_d \frac{\left(30 + 3 \frac{t_d}{T}\right)}{9 + 20 \frac{t_d}{T}}$	-
PID	$\frac{1}{K} \frac{T}{t_d} \left(1,33 + \frac{1}{4} \frac{t_d}{T}\right)$	$t_d \frac{\left(32 + 6 \frac{t_d}{T}\right)}{13 + 8 \frac{t_d}{T}}$	$t_d \frac{4}{11 + 2 \frac{t_d}{T}}$

Fonte: Cohen & Coon, 1953.

#### 2.4.2 Controle por antecipação (*feedforward*)

O controle *feedforward* baseia-se na leitura da perturbação e tomada da ação corretiva (usando a variável manipulada) antes que a perturbação atinja o sistema. Este tipo de controle é muitas das vezes inviável, operacional e/ou financeiramente, devido à necessidade da realização de leitura da perturbação em linha (*online*), sendo justificável apenas para perturbações frequentes e que afetem consideravelmente o sistema. O controle *feedforward* depende de um modelo matemático que diga como cada magnitude de perturbação irá afetar o sistema. Esta informação entra no modelo matemático que diz qual será o valor da variável controlada quando a perturbação chegar ao sistema. O controle *feedforward* compara o valor da perturbação medida com o *set-point*, produzindo um sinal de erro. Este erro entra na equação do controlador, a fim de regular a variável

controlada. O controle *feedforward* é tão preciso quanto o modelo associado a ele. Entretanto, nem sempre um modelo matemático está disponível, o que dificulta a utilização deste tipo de controle (SEBORG *et al*, 2011). A Figura 12 apresenta um diagrama de blocos que explica de maneira simplificada o controle *feedforward*.

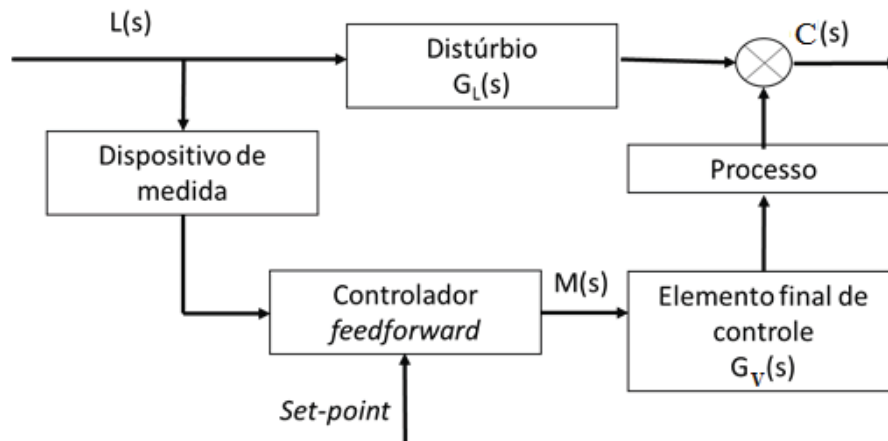


Figura 12 - Controle *feedforward*. Fonte: O autor.

A função de transferência para o controle *feedforward* pode ser encontrada através de um modelo matemático ou experimentalmente, implementando-se testes de identificação do sistema via perturbação em malha aberta. Desse modo, aproximam-se os resultados à uma função de transferência de primeira ou segunda ordem linear ( $G_L$ ) (LUYBEN, 1996):

### 2.4.3 Controle *Feedforward/Feedback*

O controle *feedforward* algumas vezes é aplicado em conjunto com a estratégia *feedback*. A Figura 13 apresenta o esquema de controle:

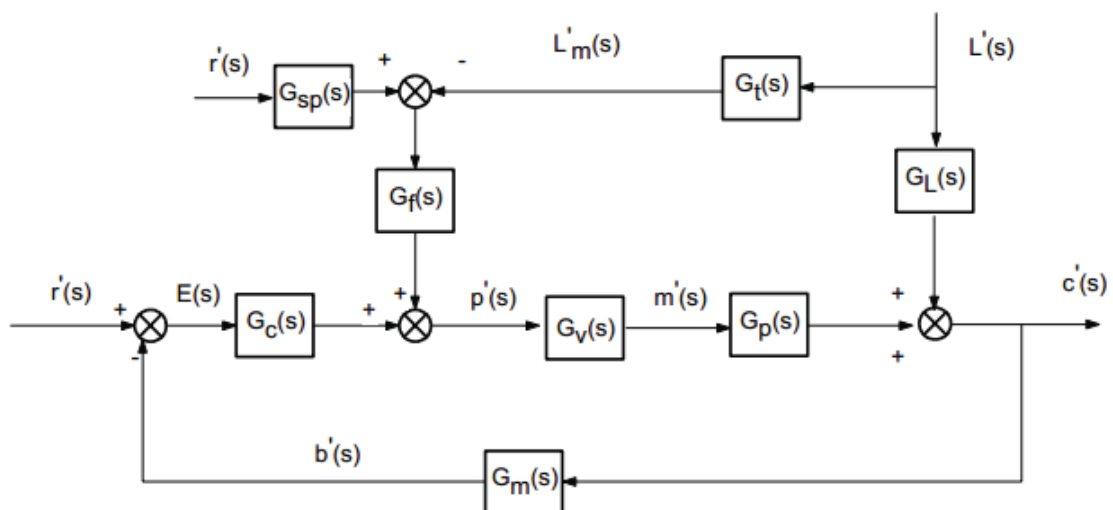


Figura 13 - Malha de controle *feedforward/feedback*. Fonte: Freitas, 2013.

A função de transferência que descreve matematicamente o diagrama de blocos da Figura 13 é descrita pela Equação 2.12.

$$\frac{C(s)}{L(s)} = \frac{G_L + G_t G_f G_v G_p}{1 + G_c G_v G_p G_m} \quad \text{Equação 2.12}$$

Sendo:

C(s) - Variável de saída;

L(s) - variável distúrbio;

G<sub>p</sub> - função de transferência (FT) do processo;

G<sub>c</sub> - FT do controlador;

G<sub>m</sub> - FT da medição e transmissão do elemento;

G<sub>L</sub> - FT do distúrbio;

G<sub>f</sub> - FT do *feedforward*;

G<sub>t</sub> - FT do transmissor;

G<sub>v</sub> - FT do elemento final de controle.

Os dois últimos elementos (G<sub>t</sub> e G<sub>v</sub>) são geralmente descritos apenas por um ganho estacionário (K<sub>t</sub> e K<sub>v</sub>, respectivamente). Os parâmetros K<sub>t</sub> e K<sub>v</sub> podem ser determinados a partir das características estacionárias do elemento final de controle e do transmissor.

Para um controle ideal, quando a variável perturbação (L(s)) for diferente de zero, a variável C deve ser igual a zero, sendo que as variáveis são apresentadas como variáveis desvio. Impondo esta condição à Equação 2.13, chega-se a Equação 2.14:

$$G_f = \frac{G_L}{G_t G_v G_p} \quad \text{Equação 2.13}$$

Considerando as funções de transferência do distúrbio e do processo como funções de transferência de primeira ordem, e as funções de transferência do transmissor e elemento final de controle como ganho estacionário temos a Equação 2.14:

$$G_f = \frac{G_L}{G_t G_v G_p} = \frac{\frac{K_L}{\tau_2 s + 1}}{K_t K_v \frac{K_p}{\tau_1 s + 1}} = \frac{K_L}{K_p K_t K_v} \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1} = K_f \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1} \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde K<sub>f</sub> é a união de todos os ganhos estacionários, τ<sub>1</sub> e τ<sub>2</sub> são as constantes de tempo do processo e da perturbação respectivamente.

### 2.4.3.1 Estimação dos parâmetros *feedforward*

Uma estimativa inicial dos parâmetros relacionados à função de transferência da perturbação ( $G_L$ ) e do processo ( $G_P$ ) pode ser obtida por um modelo matemático, quando disponível, ou por identificação do fenômeno em malha aberta (SEBORG *et al*, 2011). A identificação do processo já foi discutida no Item 2.4.1.1 A identificação da perturbação é feita de forma semelhante: Deve-se manter a variável de saída em estado estacionário e causar um distúrbio na forma de um degrau na variável de carga (perturbação). Após, deve-se esperar até que o sistema entre em um novo estado estacionário. Desse modo, produz-se a curva de reação do sistema quando este sofre uma perturbação de magnitude conhecida. A Figura 14 ilustra a obtenção dos ganhos  $K_P$  e  $K_L$  nas curvas de reação obtidas para a variável manipulada e perturbação, respectivamente.

A identificação dos parâmetros  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , assim como os atrasos do processo e da perturbação, podem ser obtidos pelo método de Sundaresan & Krishnaswamy (1977), discutido no Item 2.4.1.3.

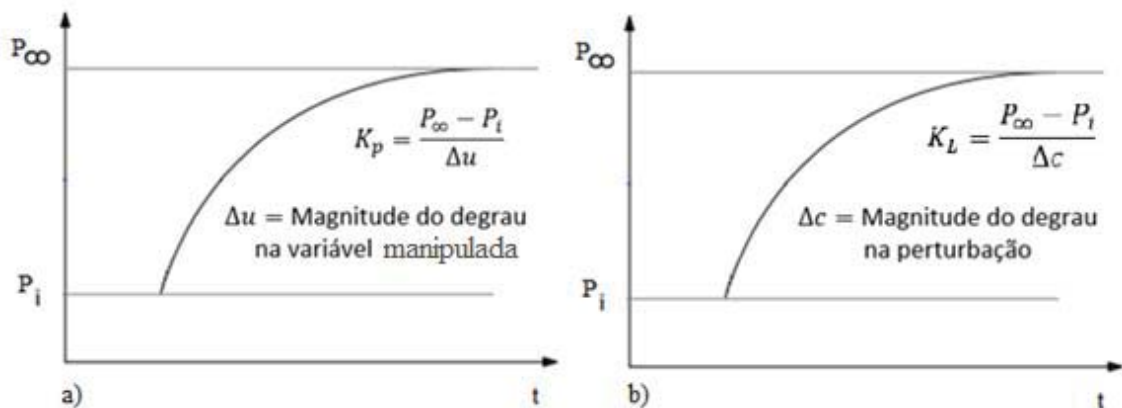


Figura 14 - Obtenção dos ganhos ( $K_P$  e  $K_L$ ) para controlador *feedforward*. Fonte: O autor.

### 2.4.4 Reconfiguração da lei de controle

A complexidade e grande escala da indústria química moderna está sujeita a variações significativas no ambiente em que se encontra inserida. Impulsionadas pela alta competitividade do mercado, necessidade de cada vez mais excelência em qualidade, exigências ambientais e de segurança, estas plantas são obrigadas a operar em vários estados estacionários (modos de operação) e constantemente trafegam entre estes estados operacionais (SRINIVASAN & QIAN, 2006; ZAKHAROV *et al*, 2015). A necessidade de tecnologias e configurações de controle que atendam aos diversos cenários de operação faz-se evidente. Paradas para manutenção, transição de matéria prima ou mudança de *set-point* são situações que podem acontecer no dia a dia industrial produzindo estados

operacionais que um controlador linear não foi inicialmente projetado para atuar. A falta de maleabilidade, se combinada a qualquer erro ou mínima alteração não planejada em diversos setores como: Petróleo e gás, aviação, área aeroespacial, usinas nucleares e fábricas de produtos químicos nocivos podem causar acidentes sérios (ZHANG & JIANG, 2008). Portanto, faz-se necessário estudar todos os múltiplos cenários operacionais da planta e quais as estratégias de controle e/ou parâmetros do controlador que melhor se adequam a cada estado operacional, construindo uma estrutura de controle holístico que se adequa a cada patamar operacional (DUTRA, 2012). A adequação exigirá uma mudança na lei de controle ou nos parâmetros do controlador, ou seja, uma reconfiguração. Steffen (2005) define a reconfiguração como sendo uma estrutura mutável que se adapta às necessidades do processo quando as mesmas não podem ser atendidas pela configuração anterior.

A reconfiguração de controle contém diversas estruturas criadas por arranjos entre as variadas estratégias de controle existentes, sendo exponenciais as possibilidades de conformação. Dentre elas podemos citar: a modelagem do problema como autômatos híbridos, ferramentas de monitoramento do processo, projeto de estruturas de controle descentralizado, controle robusto, controle adaptativo, controle preditivo, reconfiguração do sistema, implementação de algoritmos de otimização global, detecção de falhas e análise de estabilidade de sistemas (DUTRA, 2012).

A literatura ainda não dispõe de uma quantidade substancial de trabalhos que usam estruturas com reconfiguração de controle, principalmente com modificação da lei de controle, evidenciando o caráter inédito deste trabalho de dissertação de mestrado em Engenharia Química. A maioria das aplicações são encontradas nas áreas de robótica, aviação e engenharia aeroespacial, áreas que trabalham no estado da arte da teoria de controle pelo alto risco inerente aos seus processos.

As dificuldades ligadas à reconfiguração baseiam-se em estabelecer quais estratégias de controle escolher para a reconfiguração, pautadas na complexidade de implementação e custo benefício. Outra dificuldade é definir o momento ótimo para a transição da estratégia de controle, a fim de garantir o monitoramento e controle do processo frente a perturbações, transição de estados operacionais, manutenção do processo próximo ao ótimo econômico e manutenção da segurança operacional (DUTRA, 2012).

A literatura reporta alguns trabalhos que vêm sendo desenvolvidos visando o controle de influxos durante a perfuração de poços de petróleo: A partir de um esquema



de reconfiguração da lei de controle (*feedback*↔*feedforward*), Freitas (2013) controlou o *kick* de líquido no anular de uma unidade piloto com eficiência através de reconfiguração da lei de controle. A autora avaliou ainda o método tradicional (Sondador) e verificou que este tem um controle mais demorado. Russano (2014), pela mesma estratégia (reconfiguração), implementou o controle de perda de circulação em uma unidade piloto. Zhou & Nygaard (2011) e Hauge *et al.* (2013) atenuaram efetivamente o *kick* por controle adaptativo *feedback* em simulação computacional. Dutra (2012) atuou no controle de processos químicos, utilizando reconfiguração de controle em coluna de destilação e reator de polimerização através de simulação dinâmica.

Este trabalho de dissertação de mestrado usará reconfiguração da lei de controle (*feedback*↔*feedforward*) para controlar um evento (perturbação) durante a perfuração de poço de petróleo, o *kick* de gás. Pretende-se controlar a pressão anular de fundo (variável controlada) pela manipulação da abertura da válvula *choke* (elemento final de controle) pela estratégia *feedback*. O *kick* de gás será aqui detectado pelo sensor de nível, localizado no tanque de retorno. Quando este distúrbio for detectado haverá a reconfiguração da lei de controle para *feedforward*, que fará a rejeição da perturbação (variação da inclinação de nível). Vale ressaltar que o aumento do nível do tanque é produzido pela entrada de gás no anular, que expulsa a lama do anular para o tanque.

Uma análise dos trabalhos da literatura revela que o *kick* de gás é um dos distúrbios mais severos que ocorrem durante a perfuração de poços de petróleo, por se tratar de uma perturbação cuja natureza é inerentemente transiente, em virtude de o gás sofrer expansão durante a migração em direção à superfície. Observa-se uma lacuna na literatura sobre estudos de controle de *kick* de gás empregando simulação e experimentos. Desse modo, o presente trabalho de dissertação de mestrado apresenta o uso da técnica de reconfiguração de controle para rejeitar *kick* de gás, através da alteração da lei de controle (*feedback*↔*feedforward*), e estimar o novo *set-point* de operação para a pressão anular de fundo, assegurando operação em *overbalance*.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo destina-se a caracterizar o aparato experimental e detalhar a metodologia utilizada durante a realização dos experimentos nesta dissertação de mestrado.

Fazendo-se um histórico sobre os trabalhos anteriores desenvolvidos no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) no Instituto de Tecnologia (IT) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), vale ressaltar que a região anular da unidade utilizada por Freitas (2013) e Russano (2014) possuía 5,73 m de altura. Pode-se detectar que há entrada de gás pelo aumento de nível no tanque de retorno, já que o gás empurra o líquido presente no anular ao entrar no sistema. Porém, quando uma variação perceptível no nível do tanque acontecia, o gás já tinha atingido o topo do anular, não dando tempo hábil para que fosse tomada uma ação de controle para rejeitar o *kick* de gás. Para viabilizar o controle dos fluxos provenientes do reservatório seria necessário aumentar o tempo de ascendência do gás pelo anular. Sendo assim, no presente trabalho de dissertação de mestrado foi construída uma unidade com um anular maior, no intuito de fornecer mais tempo para realizar o controle do *kick* de gás. Além disso, a unidade é operada em baixas vazões.

Vale ressaltar ainda que dispondo de maior tempo de avaliação do comportamento do gás subindo pelo anular, novos fenômenos como a expansão do gás puderam ser estudados.

Uma característica importante para a estrutura hidráulica do novo anular é o fato de ser ascendente, evitando-se que o gás ficasse aprisionado em algum ponto da unidade e portanto, representando fielmente o fenômeno real. Optou-se pelo formato helicoidal e por construir a parte hidráulica em mangueira flexível. Especificações do projeto da unidade estão disponíveis no APENDICE deste trabalho. A área disponibilizada para a construção do novo anular, com 343 metros de comprimento, tem 1 m<sup>2</sup> de base e 6 m de altura. A Figura 15 a) e b) apresenta ilustrações esquemáticas da unidade helicoidal em visão superior e frontal, respectivamente.

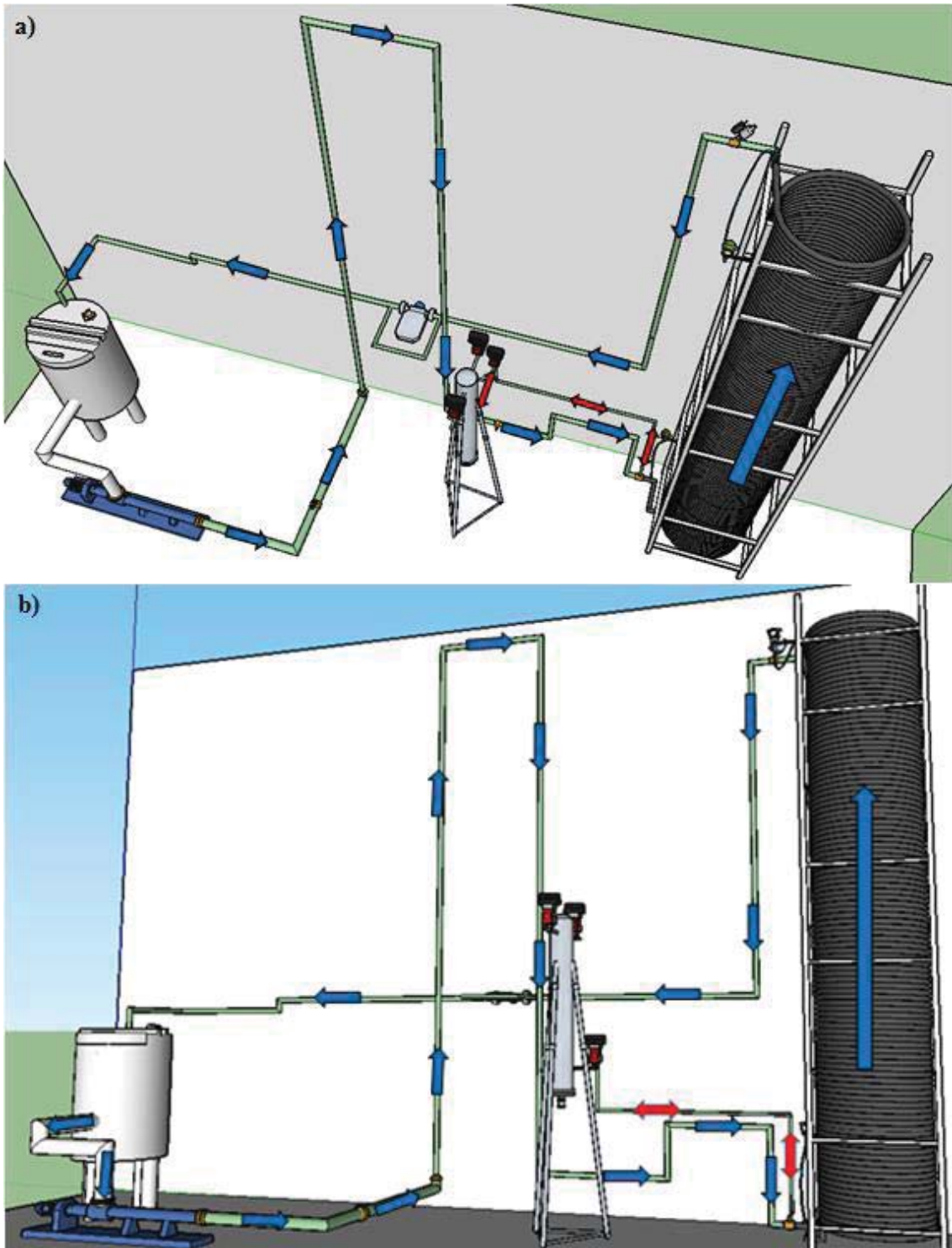


Figura 15 - Ilustração da unidade helicoidal com linhas de fluxo líquido em azul e de gás em vermelho sob visão (a) superior e (b) frontal. Fonte: O autor.

A unidade realiza um ciclo contínuo (indicado pelas setas azuis) que sai do tanque de nível à esquerda e retorna para o mesmo. As setas em vermelho representam a ligação do tanque de pressão (região do reservatório) à unidade helicoidal. O desenho da Figura 15 foi feito em escala a fim de facilitar o entendimento da unidade. É importante ressaltar que anexo à unidade helicoidal, utilizada para esta dissertação, existem outras unidades

com anulares de baixa e alta pressão e a unidade de cimentação. A planta, com anular helicoidal, é apresentada em fluxograma na Figura 16:

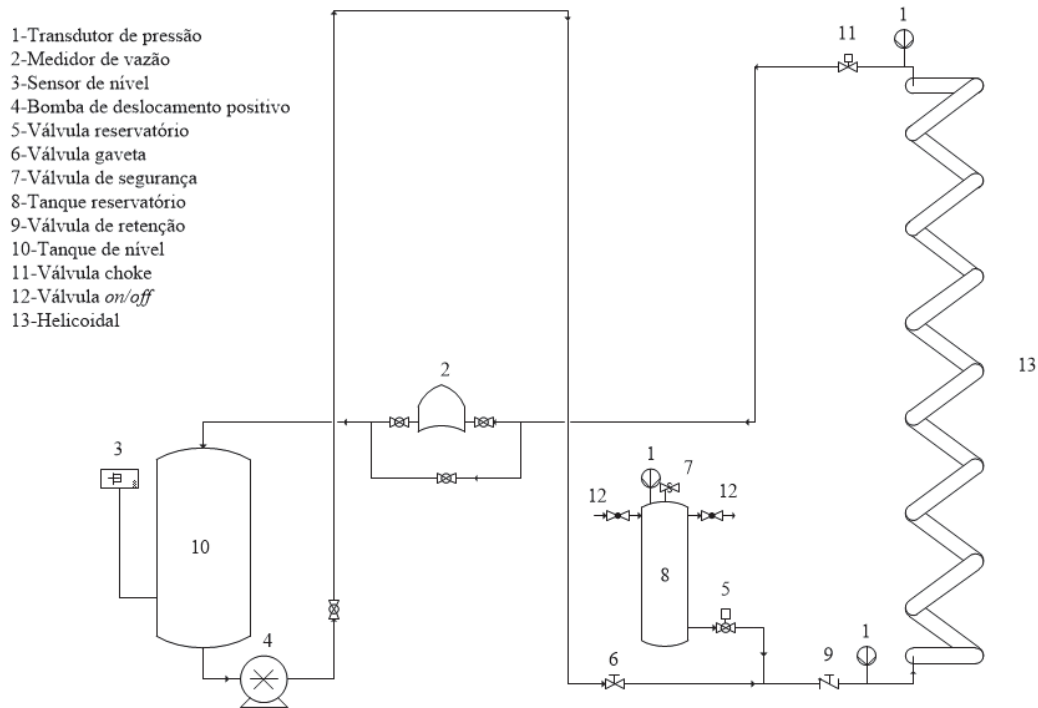


Figura 16 – Fluxograma da unidade helicoidal. Fonte: O autor.

A Figura 16 mostra o posicionamento da instrumentação presente na unidade helicoidal. A fim de representar com fidelidade os fenômenos inerentes ao processo de perfuração, a unidade dispõe de uma bomba helicoidal de deslocamento positivo (número 4 no fluxograma), chamada de bomba de água neste trabalho. Este equipamento fará a injeção do fluido de perfuração no sistema como ocorre na perfuração real. A válvula gaveta (número 6 no fluxograma) representa a perda de carga em decorrência da broca durante a perfuração. A tubulação à esquerda da válvula gaveta representa o tubo de perfuração (bengala), ou coluna de perfuração, e a tubulação à direita desta válvula representa a região anular de perfuração, tubo helicoidal. Após a válvula gaveta está a ligação entre o anular e o reservatório. Posterior à ligação, tem-se instalado uma válvula de retenção (número 9 no fluxograma) para garantir que o anular esteja sempre cheio de fluido, conforme acontece na perfuração real. O anular foi instalado após a válvula de retenção e consiste de uma mangueira flexível em hélice (número 13 no fluxograma). Na saída do helicoidal está instalado a válvula *choke* (número 11 no fluxograma), que faz o controle da pressão no poço. Neste trabalho de dissertação de mestrado o *kick* de gás foi controlado pelo fechamento da válvula *choke*. A pressão é aferida no fundo do anular e antes da válvula *choke* por transdutores de pressão (número 1 no fluxograma). Os dados

de pressão adquiridos por esta instrumentação são utilizados como variável de saída neste trabalho.

O tanque reservatório (número 8 no fluxograma) se liga ao anular através de uma válvula de controle aqui nomeada válvula permeabilidade (número 5 no fluxograma). A válvula permeabilidade tem um tipo de interno característico (Porta tipo fenda customizada), que busca na variação de sua abertura representar a perda de carga das diferentes permeabilidades da matriz rochosa. O tanque reservatório contém um transdutor de pressão e válvulas *on/off* (número 12 no fluxograma) para entrada e saída de ar pressurizado, para controlar a pressão do reservatório. Uma válvula de segurança (número 7 no fluxograma) também está instalada no tanque reservatório, e se a pressão no tanque exceder 300 psi, esta abrirá, aliviando a pressão no tanque. Tem-se um medidor de vazão mássica instalado após a válvula *choke* (número 2 no fluxograma). Após o medidor de vazão, o fluido retorna para o tanque de nível (número 10 no fluxograma), fechando o ciclo hidráulico. O tanque de nível possui um sensor de nível (número 3 no fluxograma), instalado em um vaso comunicante, cujos dados captados são determinantes na definição da estratégia de controle do *kick* de gás.

A Figura 17 mostra uma foto da unidade helicoidal montada no Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF/IT/DEQ/UFRRJ).



Figura 17 – Foto da unidade helicoidal. Fonte: O autor.

### 3.1 Detalhamento da instrumentação

A infraestrutura para suporte do prolongamento do anular em helicoidal foi construída em uma armação de andaime que foi soldado peça a peça, tendo o aparato 5 andares (6 metros de altura). O montante dispõe de duas peças de amarração. Uma destas peças foi soldada no 3º andar e a outra no 4º andar, para conferir firmeza à estrutura. Sapatas foram soldadas à base do esqueleto e chumbadas ao chão. Barras chatas de 6 metros com furos paralelos na distância de uma abraçadeira em “u” de 1” foram soldadas em quatro extremidades da estrutura montada, para possibilitar a aderência entre o esqueleto metálico e a estrutura hidráulica do anular. A furação das barras é mostrada na Figura 18:

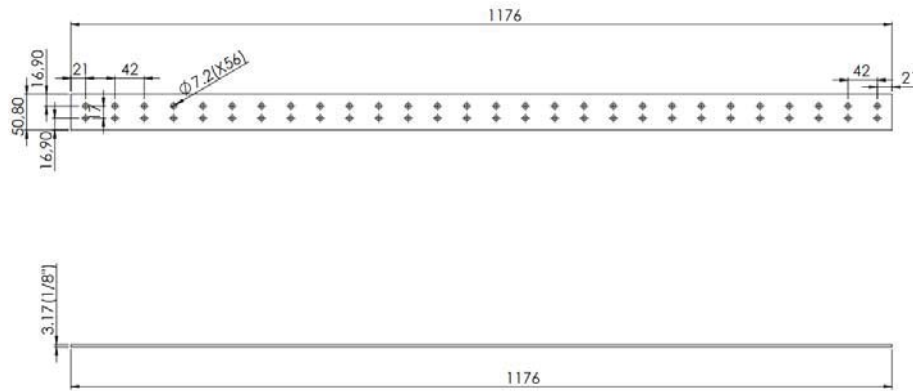


Figura 18 - Furação das barras para suporte da helicoidal. Fonte: O autor.

A estrutura helicoidal é apresentada na Figura 19:



Figura 19 - Estrutura helicoidal. Fonte: O autor.

A mangueira foi fixada por abraçadeiras em “u” às barras chatas furadas, conforme evidenciado na Figura 19. Para auxiliar no suporte da estrutura hidráulica,

instalaram-se barras ortogonais às barras chatas furadas e abraçadeiras hellermann foram utilizadas para sustentar a mangueira entre um ponto da abraçadeira em “u” e o próximo. O esquema com a barra chata é mostrado na Figura 20.



Figura 20 – Barras chatas para evitar o caimento da mangueira. Fonte: O autor.

O aparato hidráulico helicoidal conta com 343 metros de mangueira de 1” de diâmetro interno (120 voltas). A mangueira é fabricada em lances de 100 metros em borracha de acrilonitrilo butadieno, também conhecida como borracha nitrílica. A borracha possui reforço de material têxtil trançado. A pressão recomendada para trabalho é de até 300 psi e pressão de ruptura 1200 psi. A temperatura do fluido pode variar de -35°C a 85°C. O material suporta trabalhar com água, óleo e gás. As conexões entre os lances de mangueira são do tipo engate rápido, o que facilita qualquer tipo de manutenção futura. As conexões foram prensadas à mangueira como mostrado na Figura 21.



Figura 21 – Conexão prensadas à mangueira e engates rápido. Fonte: O autor.



A bomba do sistema é apresentada na Figura 22. Trata-se de uma bomba helicoidal de deslocamento positivo com volume por ciclo de 0,512 litros e pressão de recalque igual à 170 psi. Foi montada pela Bombas GEREMIA, modelo SA112. O motor da bomba é da Metalcorte motores, trabalha com indução trifásica, frequência máxima de 60 Hz, possui 4,5 kW de potência e tem 86% de rendimento. As demais partes da bomba foram fabricados pela Weatherford.



Figura 22 - Bomba de deslocamento positivo. Fonte: O autor.

O tanque com sensor de nível utilizado possui 5 saídas de diâmetros diferentes, sendo uma no fundo, e três entradas, sendo uma utilizada para a instalação do sensor de nível. O tanque possui 96 cm de diâmetro e 130 cm de altura (500 litros), sendo fabricado em polipropileno pela GRABE (Figura 23).



Figura 23 - Tanque de nível. Fonte: O autor.

O tanque foi adaptado para minimizar os ruídos provocados nas leituras de nível quando o gás (proveniente do *kick*) chega no mesmo. A chegada do gás provoca turbulência quando atinge a superfície do fluido presente no tanque, logo algumas implementações foram necessárias: A instalação de uma barreira que contivesse as ondas provocadas pela chegada do gás; a instalação de uma malha na saída do tubo para o tanque para dispersar as bolhas; instalação da leitura de nível em um vaso comunicante ligado ao tanque; e a mudança na direção de saída de fluxo para cima, para evitar que o gás sob grandes vazões passasse a barreira inicial instalada. As modificações são ilustradas pela Figura 24.

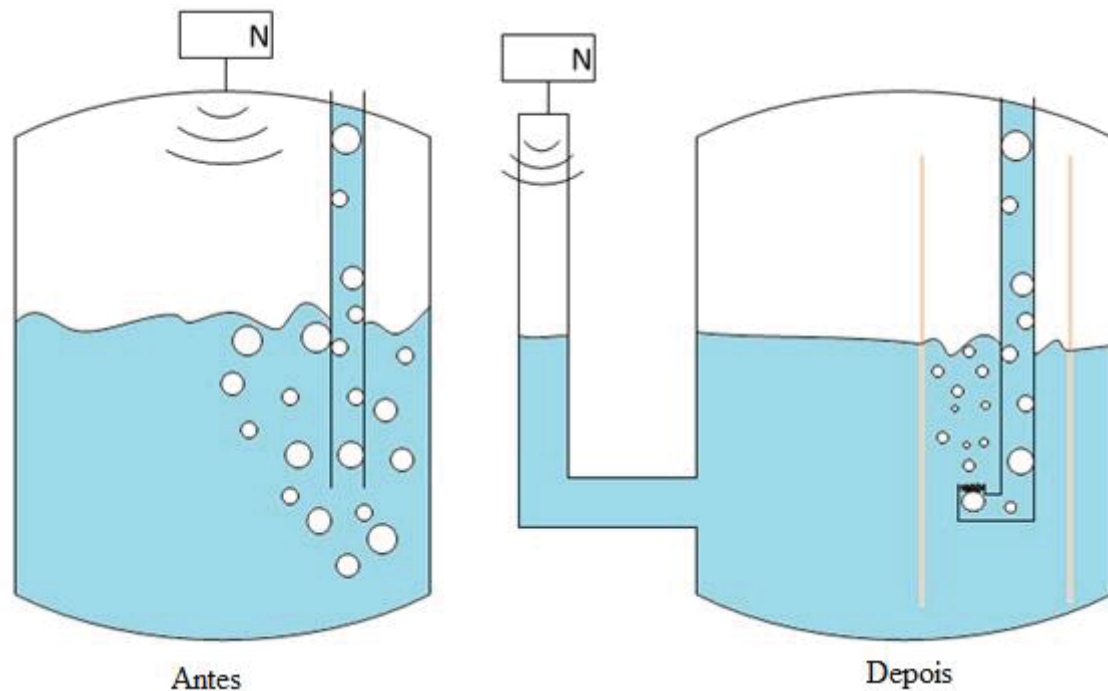


Figura 24 – Modificações no tanque de nível. Fonte: O autor.

O sensor de nível mostrado na Figura 25 é ultrassônico da marca Siemens, modelo SISTRANS Probe LU 7ML5221-28A11. O sensor foi instalado no vaso comunicante do tanque, trabalha com sinal passivo 4 a 20 mA, em temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $80^{\circ}\text{C}$  e é alimentado por 24 V DC.



Figura 25 - Sensor de nível. Fonte: O autor.

Um dos transdutores de pressão foi instalado na entrada para o helicoidal e o outro na saída do helicoidal, antes da válvula *choke*. Os transdutores são da Yokogawa, modelo

EJA530E. O transdutor posicionado antes da *choke* tem range que varia de 0 a 300 psi. O transdutor posicionado na entrada do helicoidal trabalha com range que varia de 0 a 1400 psi. Ambos trabalham com sinal passivo 4 a 20 mA e são alimentados por 24 V DC. A Figura 26 mostra o equipamento:



Figura 26 - Transdutor de pressão. Fonte: O autor.

O medidor de vazão mássica foi instalado após a válvula *choke*. O instrumento, fabricado pela Metroval, possui um sensor RHEONIK, modelo RHM20-3FS1PN que funciona por efeito coriolis. O modelo do transmissor é CMM01-290DACDCB. O equipamento é indicado para pressões de trabalho de até 170 psi e pode chegar até 250 psi, trabalha com sinal ativo 4 a 20 mA, temperatura de -20°C à 117°C e suas possibilidades de vazão de trabalho variam de 0 a 10 m<sup>3</sup>/h. A Figura 27 apresenta o equipamento:



Figura 27 - Medidor de vazão do tipo coriolis. Fonte: O autor.

O tanque de pressão representa a região da rocha reservatório com fluidos nativos pressurizados. Com a ligação reservatório/anular pode-se estudar o comportamento do sistema em eventos como o *kick* de gás, óleo e água, assim como a perda de fluidos para a matriz porosa (perda de circulação), expressa aqui pelo tanque reservatório. O tanque de pressão possui volume máximo de 50 L com 5 entradas/saídas de ½” no topo do tanque, 2 entradas/saídas de ½” na base e uma entrada/saída com flange de 1” no fundo, suportando até 300 psi. O tanque é apresentado na Figura 28.



Figura 28 – Tanque reservatório. Fonte: O autor.

Nas entradas superiores do tanque há um manômetro e um transdutor de pressão instalados para o monitoramento e controle da pressão no tanque reservatório, via *software*, e uma válvula de segurança que é acionada caso o tanque atinja pressões superiores a 300 psi (Figura 29):



Figura 29 – Instrumentação no tanque de pressão. Fonte: O autor.

Dois aparatos (Figura 30) que contam com uma válvula de controle proporcional (esquerda da Figura 30 com detalhes em vermelho) e uma válvula solenoide (direita da Figura 30 com corpo dourado) foram instalados nos acessos superiores do tanque reservatório para reger a entrada e saída de ar comprimido, controlando a pressão do tanque reservatório.



Figura 30 – Conjunto de válvulas que regulam a entrada e saída de ar do reservatório para o controle da pressão. Fonte: O autor.

As válvulas solenoides são marca ASCOVAL, tem diâmetro de  $\frac{1}{4}$ ", são do tipo *on/off*, suportam até 284,47 psi de pressão diferencial (mínimo 4,84 psi) e podem trabalhar em temperaturas que vão de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $80^{\circ}\text{C}$ , com acionamento elétrico (220V) e são normalmente fechadas (NC).

Os posicionadores das válvulas proporcionais que fazem o controle do tanque de pressão são da marca BRAY, trabalham com sinal ativo 4 a 20 mA e alimentação 24 V DC. O corpo da válvula é da FLOW TEK, suporta até 1000 psi para água, óleo ou gás (WOG). A configuração da válvula é normalmente fechada (NC). Durante os testes desta dissertação a válvula de controle foi posicionada em 50% de abertura e a válvula *on/off* solenoide fez o controle da pressão no tanque reservatório.



Todas as válvulas de controle proporcional presentes na unidade têm posicionadores pneumáticos alimentados por pressão média de 6 bar, trabalham com sinal ativo 4 a 20 mA, são normalmente fechadas (NC), e são alimentadas por 24 V DC.

O ar comprimido que alimenta o tanque reservatório durante os testes vem de um compressor instalado em uma gaiola localizada na parte externa do LEF/DEQ/IT/UFRRJ (Figura 31).



Figura 31 – Compressor. Fonte: O autor.

O compressor tem capacidade de 350 L, potência de 7,5 HP, vazão máxima de 50,97 m<sup>3</sup>/h e pressão máxima de 175 psi. O instrumento está configurado para começar a pressurizar quando a pressão em seu interno estiver próxima à 130 psi.

Filtros reguladores foram instalados com o propósito de fixar uma pressão máxima que chegará aos equipamentos e reduzir a humidade do ar. A Figura 32 mostra um destes instrumentos.



Figura 32 – Filtros reguladores de ar. Fonte: O autor.

Caso o tanque de pressão (reservatório) necessite de uma pressão superior à fornecida pelo compressor, tem-se disponível um cilindro de ar comprimido conectado a um regulador pistão alta/baixa, Figura 33.



Figura 33 – Cilindro de ar medicinal comprimido. Fonte: O autor.

A válvula de controle proporcional que efetua a ligação do tanque reservatório com o anular helicoidal (válvula reservatório ou válvula de permeabilidade) é apresentada na Figura 34. Esta possui as mesmas especificações das válvulas de controle proporcional que fazem o controle da pressão no tanque reservatório (Figura 30), com diferenciações no tipo do interno, e no diâmetro interno, sendo neste caso ½". A válvula é apresentada na Figura 34, onde o tipo de interno está do lado direito destacado em vermelho.



Figura 34 – Válvula reservatório e seu tipo de interno. Fonte: O autor.

Um tubo (Tubo-reservatório) com volume conhecido (6,5 litros) foi instalado entre o reservatório e o anular. Válvulas foram instaladas antes e após o tubo, e este foi utilizado para testes de injeção de gás na forma de pulso em malha aberta. Para realizar os testes tipo pulso, a válvula que liga o tubo-reservatório ao anular era fechada e pressurizava-se o tanque reservatório juntamente com o tubo-reservatório. Quando a pressão desejada era atingida, fechava-se a válvula que liga o reservatório ao tubo-reservatório. Sendo assim, tinha-se um tubo com volume conhecido e pressão conhecida. O tubo-reservatório é apresentado na Figura 35.



Figura 35 – Tubo-reservatório de volume conhecido (6,5 litros). Fonte: O autor.

A válvula *choke*, apresentada na Figura 36, é uma válvula de controle proporcional GEMÜ. Tal válvula possui um posicionador inteligente modelo 1434  $\mu$ Pos. O corpo é desenvolvido em  $y$  com diâmetro  $\frac{1}{2}$ ". O índice de abertura deste instrumento influencia diretamente a pressão anular de fundo. Neste trabalho de mestrado, a válvula *choke* foi utilizada como elemento final de controle para regular a pressão anular de fundo e, conseqüentemente, do fenômeno *kick* de gás. Caso seja necessário aumentar a pressão anular de fundo, deve-se diminuir o índice de abertura da válvula *choke*. Da mesma forma, para diminuir a pressão anular de fundo, basta aumentar o índice de abertura da válvula *choke*.



Figura 36 – Válvula *choke*. Fonte: O autor.

A Figura 37 procura esclarecer ao leitor o posicionamento dos principais instrumentos descritos na unidade helicoidal:

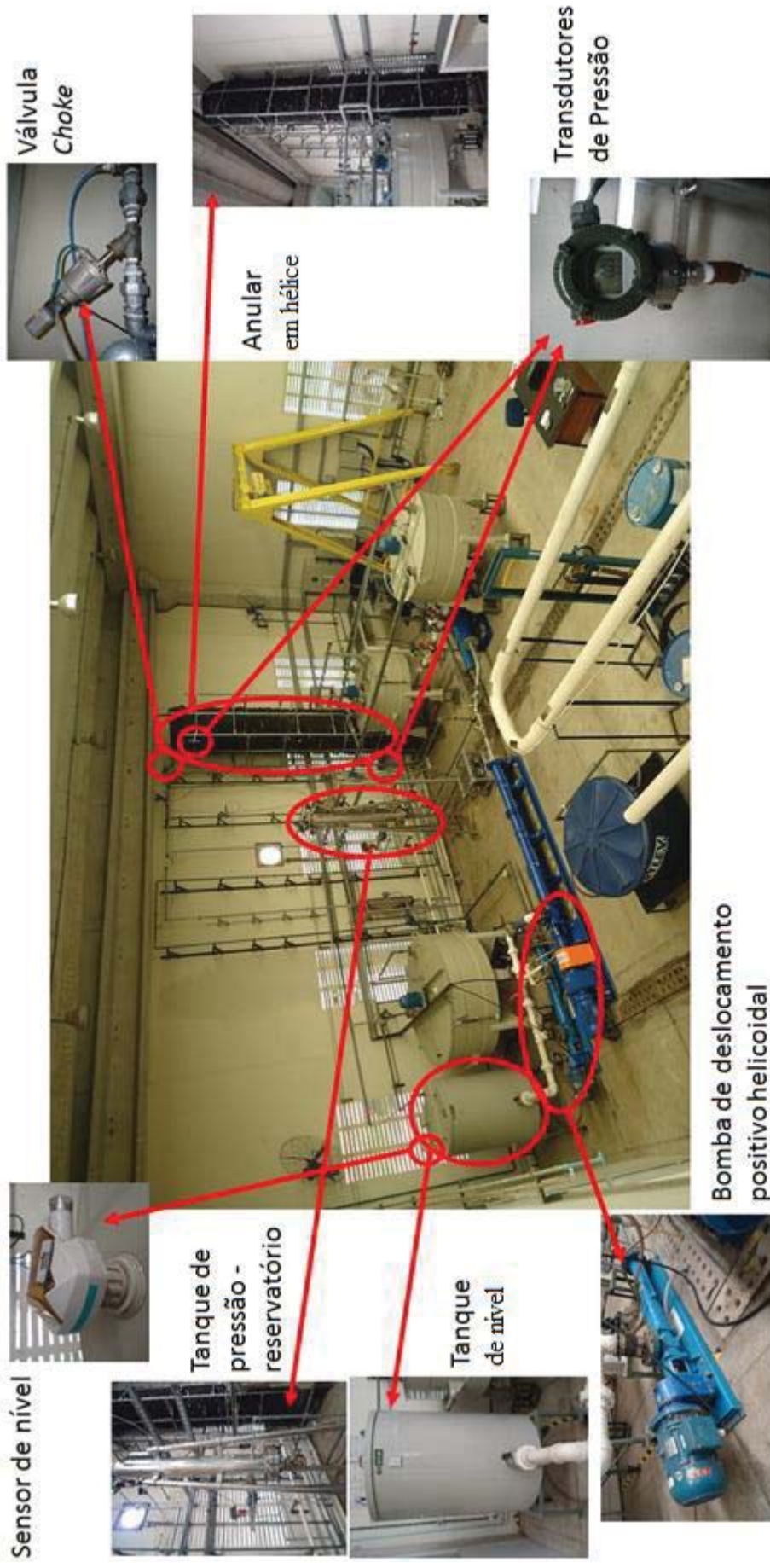


Figura 37 – Posicionamento da instrumentação na unidade helicoidal. Fonte: O autor.

A Figura 38 busca esclarecer o posicionamento dos instrumentos presentes no tanque reservatório:



Figura 38 – Posicionamento da instrumentação no tanque reservatório. Fonte: O autor.

Um programa em linguagem C++ foi construído para controle de toda a instrumentação descrita até aqui e monitoramento das variáveis controladas. A interface do programa é apresentada na Figura 39.

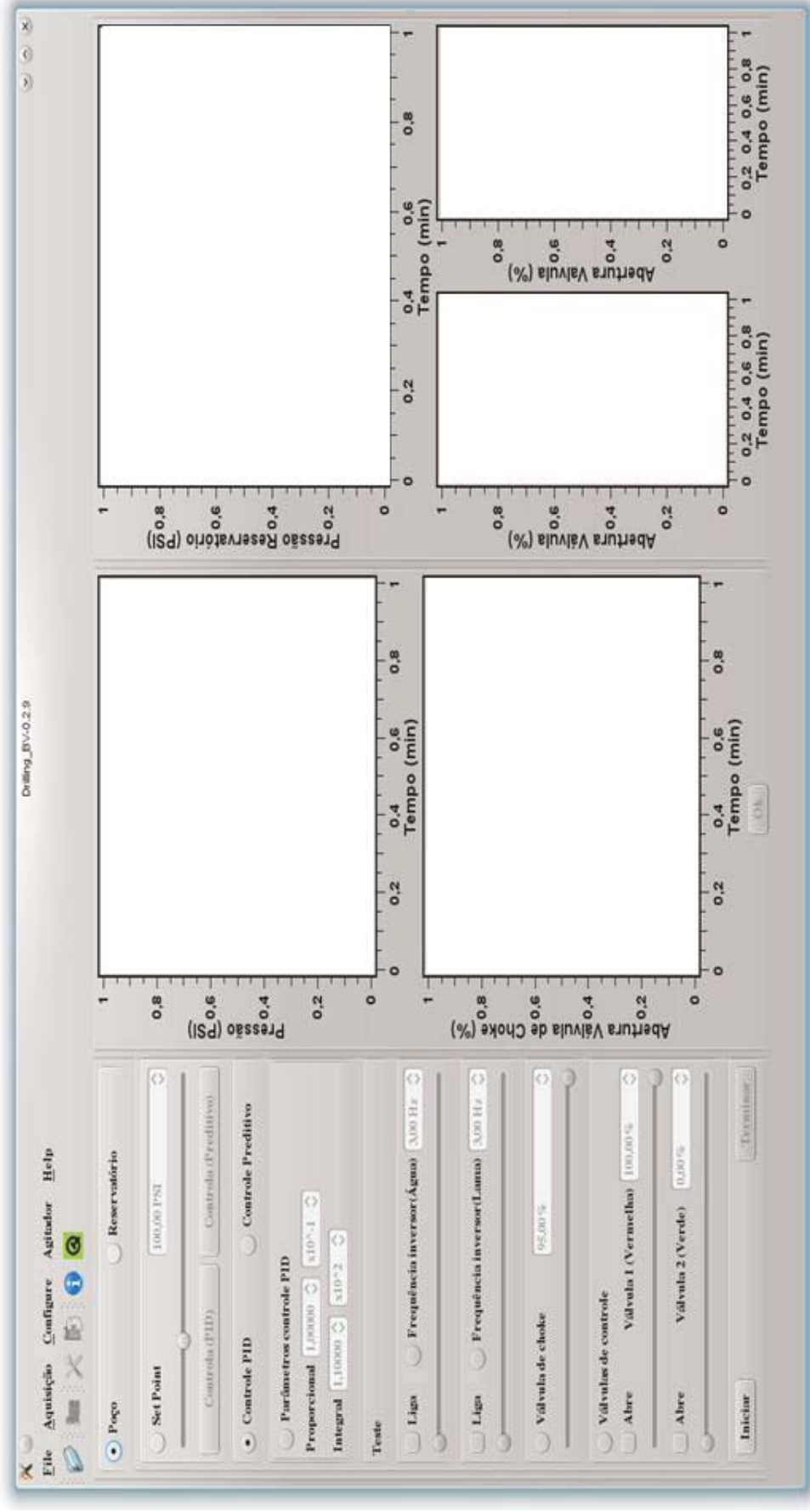


Figura 39 – Programa construído em c++ para controle e acompanhamento de variáveis na unidade helicoidal. Fonte: O autor.



O programa possibilita o estudo e acompanhamento de situações que acontecem em campo, como a interação poço/reservatório, geração de cascalhos, controle de *kick* e invasão. O programa faz leitura em tempo real de variáveis como vazão, nível, pressão em diferentes pontos e índice de abertura de diversas válvulas ao longo da unidade. Pode-se ainda manipular a abertura das válvulas ou da frequência do inversor das bombas presentes na unidade, com intuito de representar algum evento ou estudar estratégias de controle de eventos comuns ao processo de perfuração.

### 3.2 Métodos utilizados

Os parâmetros referentes à unidade experimental foram identificados pelo método proposto por Sundaresan & Krishnaswamy (1977) descritos no Item 2.4.1.3 deste trabalho. Os parâmetros do controlador foram calculados pelos métodos de Ziegler & Nichols (1942) e Cohen-Coon (1953) descritos no Item 2.4.1.4. As estratégias de controle utilizadas para rejeitar o *kick* de gás foram: Reconfiguração de controle (*feedback*↔*feedforward*) e controle clássico (*feedback*, PI), descritos nos Itens 2.4.4 e 2.4.1 respectivamente.

Nos testes regulatório por reconfiguração de controle, a alternância da lei de controle (*feedback*↔*feedforward*) será realizada quando a inclinação do nível e, simultaneamente, seu valor numérico atingirem patamares determinados. Nestas condições, admite-se que há um fluxo de gás (*kick*) que precisa ser controlado via modo *feedforward*. O controlador *feedforward* terá como variável controlada a inclinação do nível e como variável manipulada o índice de abertura da válvula *choke*. A inclinação do nível será calculada pelo método Savitzky-Golay (SAVITZKY & GOLAY, 1964). O controlador volta para a conformação *feedback* quando a inclinação do nível for desprezível, isto é, admite-se que quando o gás para de entrar no anular não há aumento de nível e a inclinação do mesmo será nula. Nestas condições a pressão anular de fundo é suficiente para impedir a entrada de gás no anular. Desse modo, recalcula-se o *set-point* de pressão anular de fundo como sendo o valor medido somado a uma margem de segurança.

Para os cálculos de expansão do gás durante o *kick*, utilizou-se a variação de nível.

A modelagem matemática, foi construída empregando-se um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO) (KAASA, 2007; STAMNES *et al*, 2007; ZHOU & NYGAARD, 2011; CALADO, CARVALHO NETO & SOTOMAYOR, 2011; HAUGE *et al*, 2013), a serem discutidas no Item 4.4, que foram integradas pelo método de Runge

& Kutta (BUTCHER, 1987). A simulação seguiu os passos descritos na Figura 40. Os resultados da simulação são apresentados no Item 4.4.

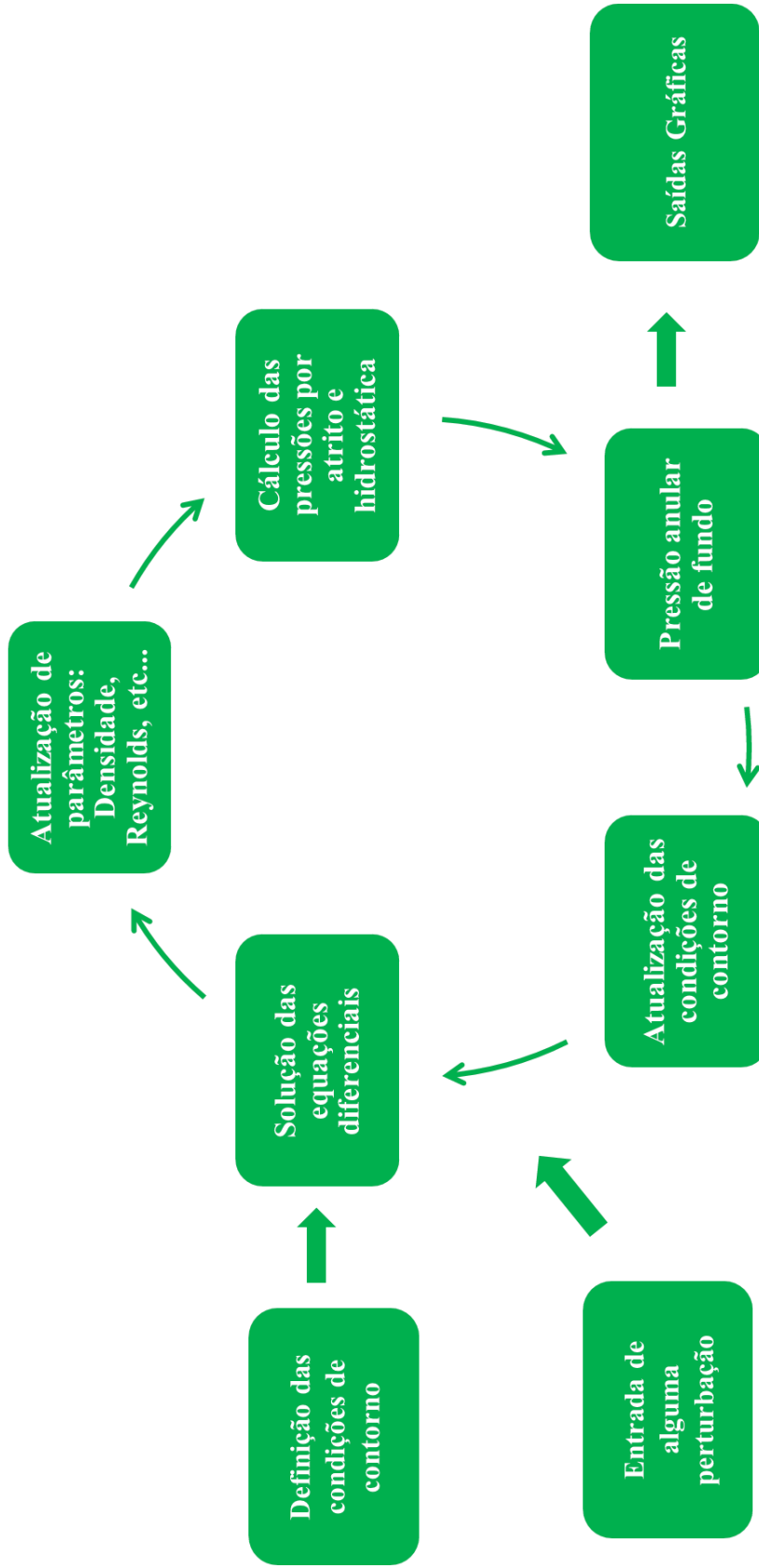


Figura 40 – Fluxograma da modelagem matemática. Fonte: O autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes experimentais foram realizados a fim de identificar a planta experimental e observar a possível não linearidade do sistema. Os testes, feitos em triplicata, possibilitaram a obtenção dos parâmetros do sistema e, conseqüentemente, os parâmetros do controlador clássico (PI) *feedback* e do controlador *feedforward*. Para a validação dos parâmetros encontrados para o controle *feedback*, testes servo foram realizados no anular helicoidal efetuando o controle da pressão anular de fundo. Os parâmetros obtidos para o controle *feedforward* foram validados por testes regulatório. No teste regulatório o objetivo é impedir a entrada de gás pressurizado do reservatório (pressão de poros) no anular, pelo aumento da pressão anular de fundo, através da redução do índice de abertura da válvula *choke*. Para isso, duas estratégias de controle foram testadas: *Feedback* e reconfiguração de controle (*feedback*↔*feedforward*).

Paralelamente, foi desenvolvida uma modelagem matemática validada a partir de dados obtidos da unidade experimental, usando equações fenomenológicas (KAASA, 2007; STAMNES *et al.*, 2007; HAUGE *et al.*, 2013; ZHOU & NYGAARD, 2011; CALADO, CARVALHO NETO & SOTOMAYOR, 2011; GHAURI, 2014; REID, PRAUSNITZ & POLING, 2000; SRINIVASAN, NANDAPURKAR & HOLLAND, 1970). O modelo matemático foi utilizado para estudos de simulação usando estratégias de controle clássico (*feedback* PI) e reconfiguração de controle.

## 4.1 Estratégia: *Feedback*

Nesta parte do trabalho serão apresentados todos os passos necessários para a implementação da estratégia de controle *feedback* na contenção do *kick* de gás.

Inicialmente foi necessário verificar se o sistema era não linear, para verificar se um controlador clássico seria capaz de controlar o sistema. Feito isso, determinou-se os parâmetros do sistema e do controlador, e estes foram ajustados através de testes servo para serem empregados no controle do *kick* de gás (teste regulatório).

### 4.1.1 Análise da não linearidade do sistema – Anular helicoidal

A fim de verificar se o uso de um controlador clássico, por exemplo PI, pode ser aplicado satisfatoriamente ao sistema experimental com anular helicoidal, foram feitos testes que apontam se o sistema tem comportamento linear ou não linear. Os testes efetuados implementam degraus positivo/negativo no índice de abertura do *choke*, enquanto fluido era bombeado através da unidade. O *choke* iniciava o teste com 60% de abertura e as magnitudes dos degraus aplicados foram de  $\pm 15\%$ ,  $\pm 25\%$ ,  $\pm 35\%$ . O range foi escolhido desta maneira porque na data do teste, por um procedimento de segurança imposto ao programa de controle, o *choke* não atingia índices de abertura menores que 25%. Os testes foram efetuados para variadas frequências da bomba de água: 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 35 Hz. A bomba tem capacidade de trabalhar até 60 Hz, porém ao chegar em 35 Hz, com o índice de abertura da válvula *choke* igual a 25%, a pressão chegava próximo de 150 psi, devido à alta perda de carga da unidade. Essa pressão foi definida como o limite máximo para garantir segurança operacional, logo os testes com 35 Hz foram descartados.

Os testes demonstraram uma diferença significativa entre a resposta do sistema aos degraus negativo e positivo de mesma magnitude, o que significa que o sistema apresenta alguma não linearidade. A não linearidade implica que o princípio da superposição não é obedecido pelo sistema, e uma estratégia de controle clássico pode ser insatisfatória, sendo necessário a sintonia do controlador para diferentes níveis operacionais. Caso a malha de controle apresente desempenho insatisfatório, a saída pode ser partir para uma estratégia de controle tipo *gain-schedule* ou não linear (DUTRA, 2012).

A Figura 41 apresenta o comportamento típico apresentado nos testes realizados para identificar a não linearidade do sistema.

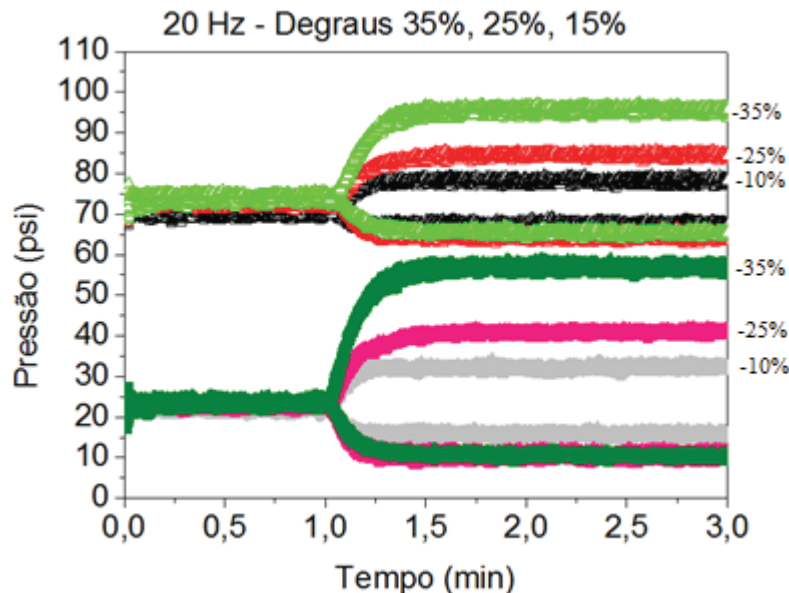
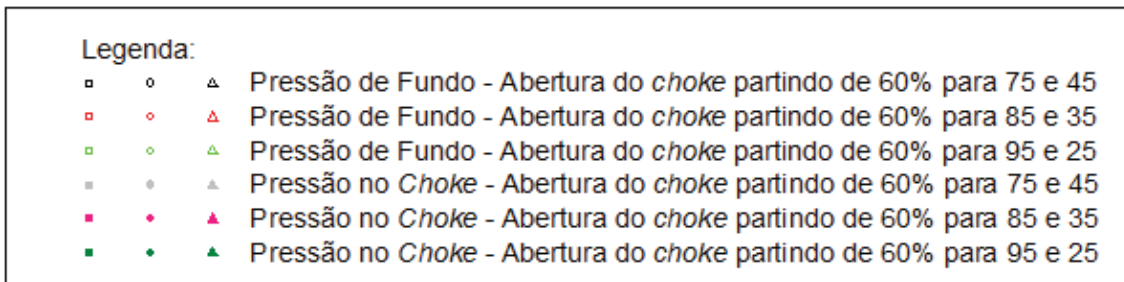


Figura 41 - Não linearidade do sistema para a pressão anular de fundo e no *choke*. Testes realizados com Bomba em 20 Hz e degraus positivo/negativo de 35%, 25%, 15% de abertura da válvula *choke*. Fonte: O autor.

Os testes experimentais foram realizados em triplicata, onde se aplicou perturbações degrau positiva e negativa de mesma magnitude no índice de abertura da válvula *choke* (variável de entrada), e foi avaliada a resposta do sistema através da pressão anular de fundo (variável de saída). O sistema é linear quando as respostas aos degraus positivo e negativo são de mesma magnitude, o que não foi observado na planta em estudo.

Pode ser observado uma resposta mais agressiva para os resultados lidos no *choke*, caracterizado pela proximidade do sensor à variável manipulada. Toda a malha experimental realizada para avaliar a não linearidade do sistema pode ser observada no ANEXO B.

#### 4.1.2 Parâmetros *feedback* – Identificação do sistema

A identificação da planta é feita implementando-se uma perturbação degrau na variável de entrada (válvula *choke*), e avaliando a saída do sistema (pressão anular de fundo). Pretende-se quantificar: a razão entre a magnitude da resposta do sistema (Bu)

pela magnitude da perturbação na entrada (M): ganho (K); o tempo entre o início da perturbação e a resposta do sistema (atraso,  $t_d$ ) e a velocidade de resposta do sistema (constante de tempo,  $\tau$ ). Durante os testes de identificação, os parâmetros do sistema foram obtidos para diferentes estados operacionais da planta, variando a abertura do *choke* e a frequência da bomba. O aumento na frequência da bomba eleva a vazão do processo e, conseqüentemente, intensifica as perdas por atrito. A Tabela 3 relaciona as frequências utilizadas durante os testes com as respectivas vazões.

Tabela 3 - Relação entre frequência e vazão – *Choke* com 95% de abertura

Frequência (Hz)	10	15	20	25	30	35	40
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	1,46	1,51	2,04	2,43	2,82	3,12	3,38

Fonte: O autor.

Durante os testes de identificação, para cada uma das frequências a seguir, 20Hz, 25Hz e 30Hz, variou-se a abertura da *choke* de 95% para: 25%, 40%, 55% e 75%. Todos os testes foram feitos em triplicata. Em todos os testes a mudança na abertura da válvula *choke* foi realizado após 1 minuto de teste. Um resultado típico é apresentado na Figura 42, onde “ma” significa malha aberta. Pode ser observado que os dados se sobrepõem, o que mostra uma boa repetibilidade do sistema. Os demais testes são apresentados no ANEXO C.

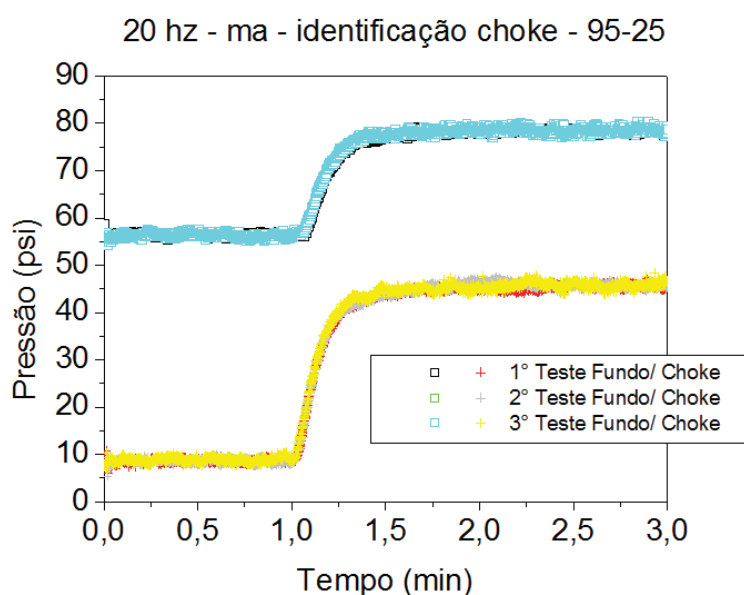


Figura 42 – Teste de identificação variando a abertura do *choke* e mantendo a bomba em 20 Hz. Fonte: O autor.

Pôde-se perceber uma resposta oposta do sistema em relação à variação na abertura do *choke*. Para um decréscimo na variável de entrada, por exemplo, 95% para 25% (-70%), há um crescimento na variável de saída, a pressão passa de aproximadamente 55 para 80 psi. O comportamento pode ser observado na Figura 43.

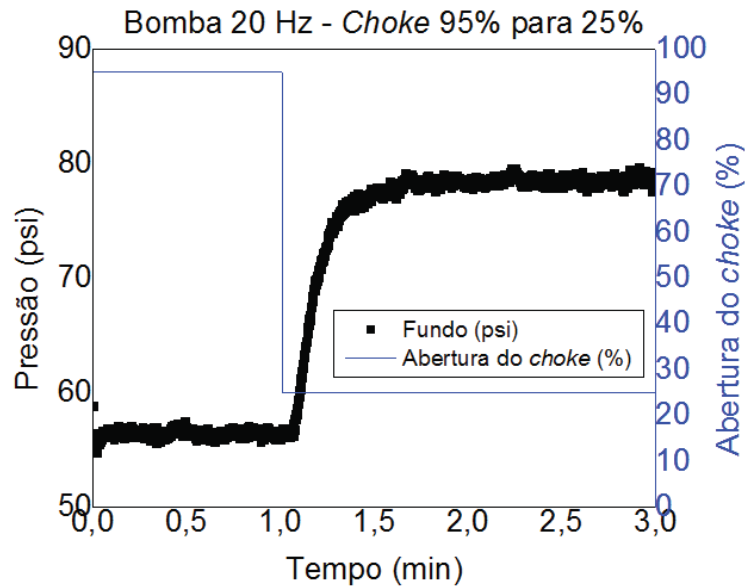


Figura 43 - Ganho inverso. Fonte: O autor.

A Figura 43 evidencia ainda a presença de atraso, uma diferença entre o momento do fechamento do *choke* e da resposta do sistema.

O método de Sundaresan-Krishnaswamy (Item 2.4.1.3) foi aplicado aos resultados da identificação da planta para a obtenção dos parâmetros do sistema. Infere-se dos gráficos de identificação (ANEXO C) e dos parâmetros do sistema adquiridos (ANEXO A) que: Quanto maior for a frequência imposta, maior o ganho (K), quando se altera o índice de abertura do *choke*; quanto maior a variação na variável de entrada, maior o atraso (td), principalmente para frequências mais baixas (20 Hz). A partir dos parâmetros do sistema, observou-se que a planta responde como uma função de transferência de 1ª ordem com tempo morto. O grau de não linearidade do sistema pode ser observada pela avaliação dos parâmetros do sistema, conforme apresentado no ANEXO B, Figura 85 e Figura 86. A Figura 44 apresenta um resultado típico onde é notória a proximidade dos dados experimentais à curva identificada via método de Sundaresan-Krishnaswamy (MSK).



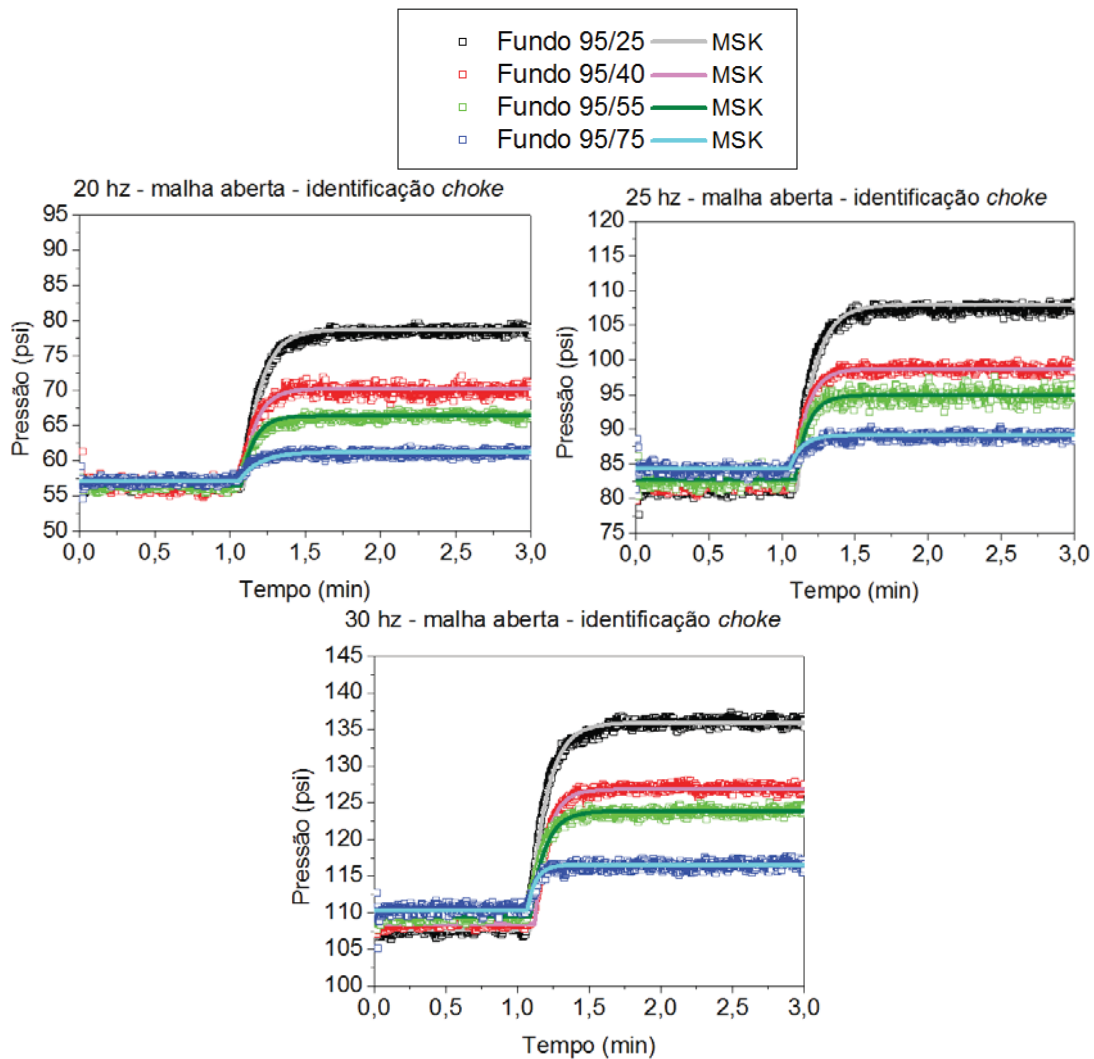


Figura 44 – Testes de identificação. Fonte: O autor.

As triplicatas de todos os testes são apresentadas no ANEXO C. A partir dos parâmetros do sistema, os métodos de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon foram utilizados para a sintonia do controlador *feedback* PI. Os parâmetros do controlador estão disponíveis no ANEXO A. A avaliação da variação da magnitude dos parâmetros do controlador para os diferentes estados operacionais estudados propõe que um único par de parâmetros do controlador é capaz de controlar a planta em seus diversos estados operacionais. Uma avaliação dos parâmetros do controlador em malha fechada é realizada no item 4.1.3.

#### 4.1.3 Validação dos parâmetros do controlador *feedback* – Teste servo

O teste servo é um teste em malha fechada que implementa perturbações do tipo degrau no *set-point*. Para avaliar se um controlador clássico é capaz de controlar a planta em diferentes níveis operacionais, devido ao comportamento não linear da planta, testes

servo foram realizados empregando-se os parâmetros recomendados por Cohen-Coon e Ziegler-Nichols. O controlador atua modificando o índice de abertura da válvula *choke* para aumentar ou diminuir a pressão anular de fundo. Para início dos testes, utilizou-se a média dos parâmetros obtidos por Cohen-Coon ( $K_c = -6.10^{-2}$  e  $\tau_I = 9,63.10^{-2}$ ) e a média dos parâmetros obtidos pelo método de Ziegler-Nichols ( $K_c = -5,67.10^{-2}$  e  $\tau_I = 0,234$ ) para 20Hz. Os parâmetros de Ziegler-Nichols e de Cohen-Coon apresentaram resultados bastante oscilatórios, Figura 45 e Figura 46, sendo recomendado a implementação de um ajuste fino seguindo a literatura.

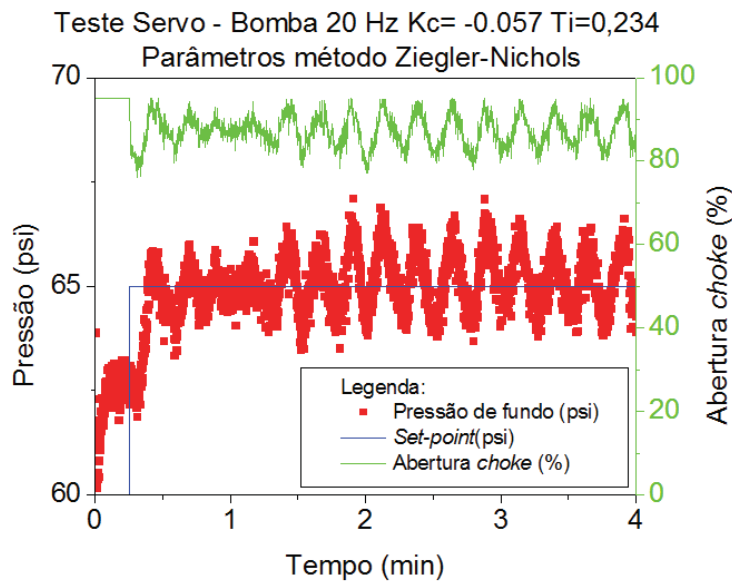


Figura 45 – Teste servo feito com os parâmetros encontrados por Ziegler-Nichols. Fonte: O autor.

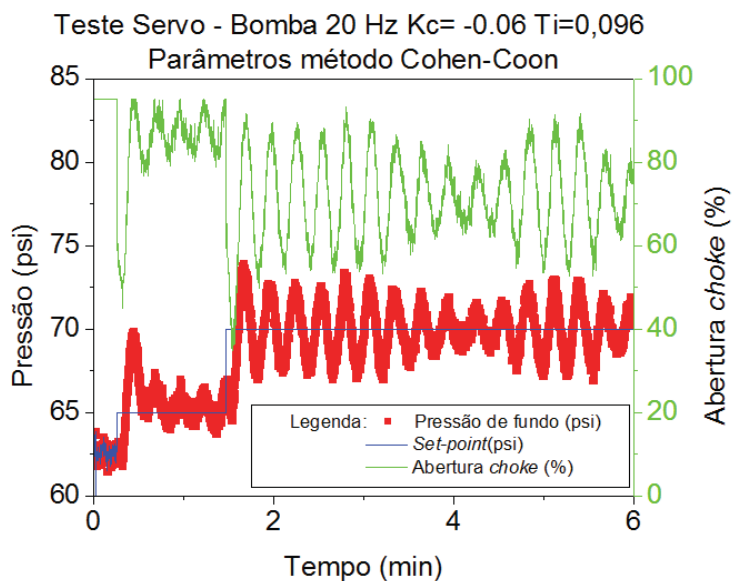


Figura 46 – Teste servo feito com os parâmetros encontrados por Cohen-Coon. Fonte: O autor.

O ajuste fino dos parâmetros do controlador foi feito buscando respostas menos oscilatórias do sistema, logo, foram testados valores menores de  $K_c$ , alterando-se os valores de  $\tau_I$ . A malha experimental de testes servo avaliou a combinação de diversos parâmetros. Para a frequência de 20 Hz, avaliaram-se os parâmetros: Para:  $\tau_I=0,1$ :  $K_c=-0,0067$ ,  $K_c=-0,01$  e  $K_c=-0,02$ ; Para  $\tau_I=0,15$  e  $\tau_I=0,2$  os ganhos testados foram  $K_c=-0,0067$ ,  $K_c=-0,01$  e  $K_c=-0,015$ . Para a bomba em 25 e 30 Hz os parâmetros estudados foram:  $\tau_I=0,15$ :  $K_c=-0,0067$ ,  $K_c=-0,01$  e  $K_c=-0,015$  e para  $\tau_I=0,1$ ,  $K_c=-0,02$ . Os melhores resultados foram obtidos empregando-se  $K_c=-0,01$  e  $\tau_I=0,15$ , Figura 47. Os demais testes são apresentados no ANEXO D.

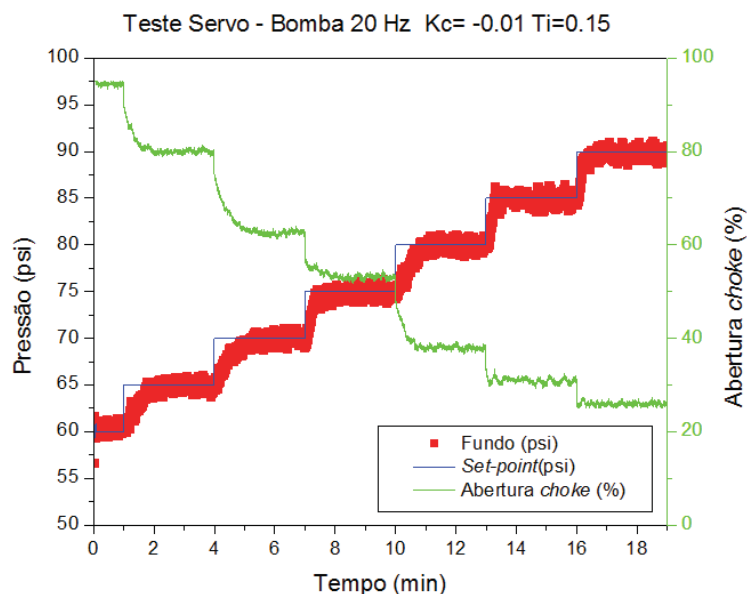


Figura 47 – Teste servo com os melhores parâmetros. Fonte: O autor.

#### 4.1.4 Controle de *kick* de gás – Teste regulatório – Perturbação degrau

Os testes regulatório avaliam se o controlador é capaz de conter uma perturbação, mantendo o sistema estável. Durante os testes regulatório, para a estratégia *feedback*, o operador fará a identificação do *kick* de gás pelo acompanhamento da pressão anular de fundo e do nível. Se a pressão anular de fundo e o nível começarem a subir, o operador irá aguardar a pressão anular de fundo atingir um estado estacionário e selecionará um *set-point* ligeiramente acima deste estado estacionário. A diferença de pressão entre o estado estacionário da pressão de fundo e o novo *set-point* da pressão de fundo foi inicialmente definido como 7 psi acima de tal estado estacionário, podendo variar caso esta diferença de pressão não seja suficiente para controlar o *kick* de gás.

O controle por estratégia *feedback* apresentou morosidade em sua atuação, por causa das dificuldades de identificar o *kick* via observação do operador. Um resultado típico é apresentado na Figura 48, onde a diferença de pressão entre o estado estacionário da pressão de fundo e o novo set point é de 5 psi, a perturbação é dada com 1,5 minutos de teste, com a válvula reservatório se abrindo 50 %, e o controle do distúrbio só começa em 2,5 minutos. No teste da Figura 48 a diferença de pressão entre o primeiro estado estacionário (60 psi) e a pressão do reservatório (70 psi) é de 10 psi.

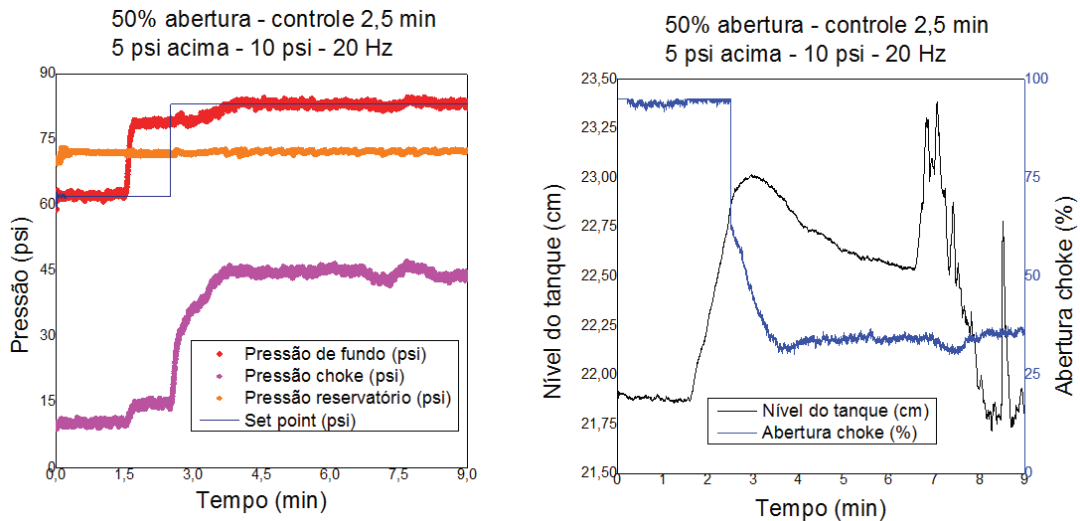


Figura 48 – Controle do *kick* por estratégia *feedback*. Perturbação em 1,5 minutos e controle em 2.5 minutos. Fonte: O autor.

O teste apresentado na Figura 48 foi feito antes das modificações no tanque de nível, apresentadas pela Figura 24, e é apresentado aqui para ilustrar a situação e elucidar o motivo das alterações. O comportamento observado em aproximadamente 6,5 minutos é característico da chegada do gás ao tanque de nível e é extremamente prejudicial na implementação da segunda estratégia de controle proposta aqui (reconfiguração de controle), pois tal estratégia se baseia na variação de nível para a mudança da lei de controle. Sendo assim, este resultado serviu de base para que modificações fossem implementadas no tanque de nível a fim de minimizar as perturbações quando da chegada do gás. Outros testes de identificação e testes regulatório foram efetuados para visualizar as melhorias na leitura de nível quando da chegada do gás ao tanque. A Figura 49 apresenta o resultado de testes, com entrada de gás no anular em malha aberta, realizados antes e depois da implementação das alterações no tanque de nível.

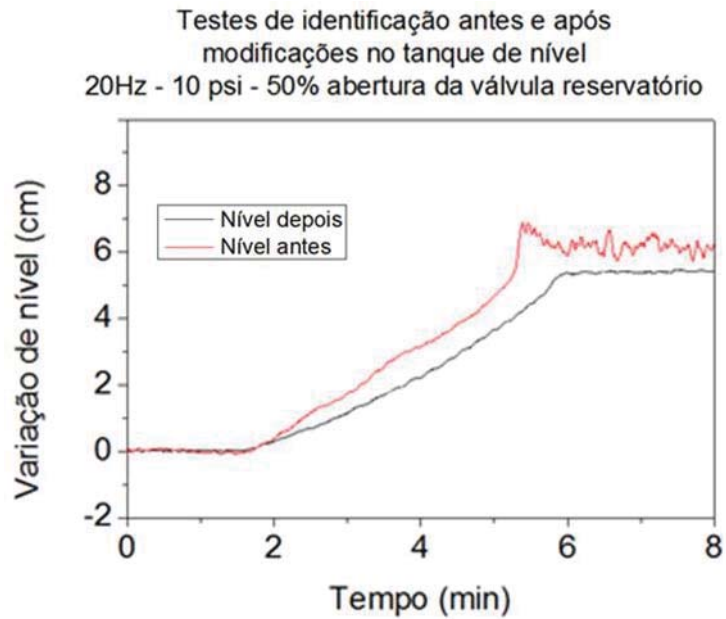


Figura 49 - Teste de identificação antes e após a implementação das mudanças no tanque de nível. Fonte: O autor.

A redução do ruído foi perceptível. A Figura 51 e a Figura 51 apresentam as mudanças nos testes regulatório. Em todos os testes regulatório o controle do *kick* de gás foi implementado no 2º minuto de teste.

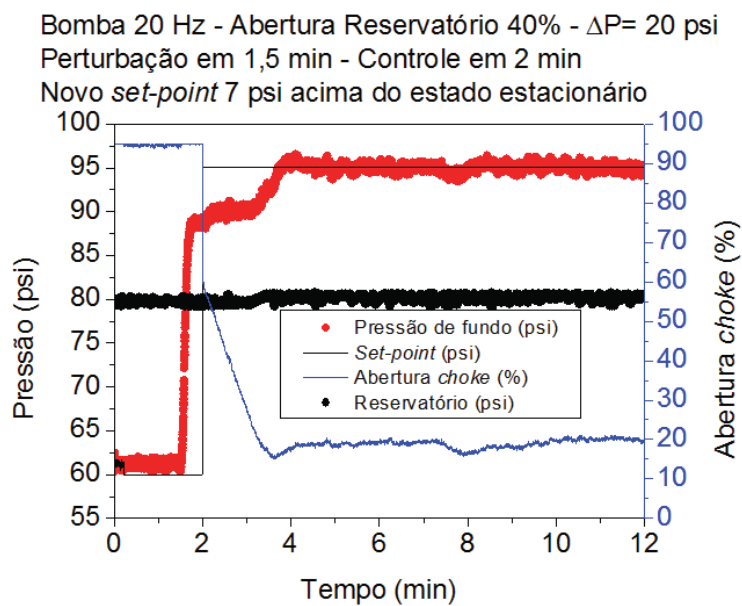


Figura 50 - Teste regulatório com estratégia *feedback*. Comportamento das pressões e da variável manipulada. Fonte: O autor.

Bomba 20 Hz - Abertura Reservatório 40% -  $\Delta P = 20$  psi  
 Perturbação em 1,5 min - Controle em 2 min  
 Novo set-point 7 psi acima do estado estacionário

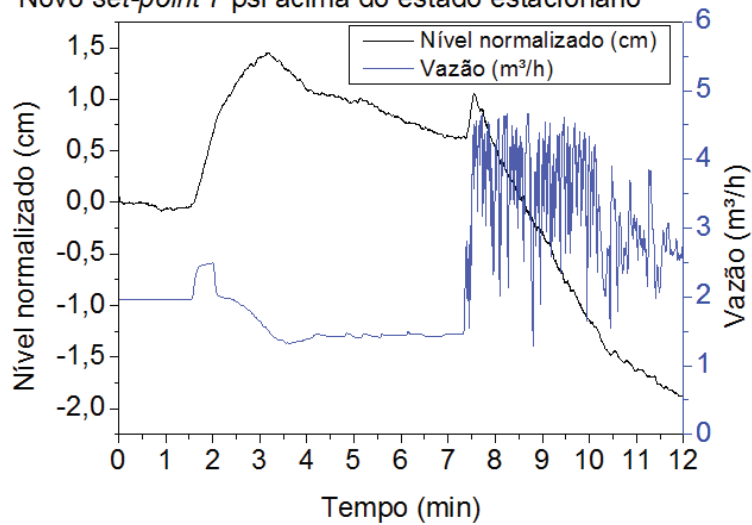


Figura 51 – Teste regulatório com estratégia *feedback*. Comportamento do nível normalizado e da vazão. Fonte: O autor.

A Figura 51 mostra, no gráfico de nível normalizado, que o nível parou de subir após 3 minutos. Como o controle foi iniciado no 2º minuto, o controlador levou mais 1 minuto para controlar o *kick* de gás. É interessante observar que o nível do tanque começa a cair após 3 minutos. Este comportamento caracteriza o controle do *kick* de gás e a entrada de fluido de perfuração na região reservatório (perda de circulação). Após o oitavo minuto, o nível começa a cair em velocidade mais acelerada, devido à expulsão do gás que ainda residia no anular. A expulsão de gás do anular pode ser observada pela presença de ruído no gráfico de vazão (Figura 51) próximo de 8 minutos, pois o sensor coriolis está localizado após o *choke* e não faz leitura de fluxo bifásico, a expulsão do gás pode ser ratificada pelo sensor de nível que apresenta um pico próximo de 8 minutos.

A Figura 52 reafirma que houve a entrada de fluido de perfuração no reservatório (perda de circulação), apresentando a ação das válvulas de controle que mantem o tanque reservatório pressurizado. Após aproximadamente 3,5 minutos de teste há abertura excessiva da válvula de saída, demonstrando que o tanque reservatório está sendo pressurizado pelo líquido que entra no reservatório, proveniente do anular (perda de circulação), e que, para manter a pressão estável e controlada, é necessário a depressurização do sistema, sendo a ação do controlador abrir constantemente a válvula de saída após o 3º minuto.

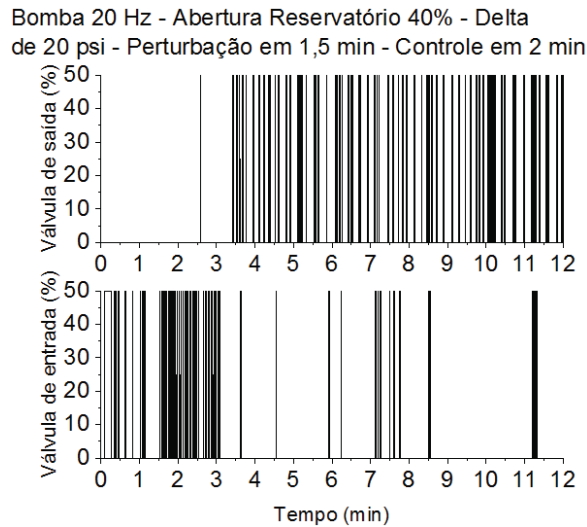
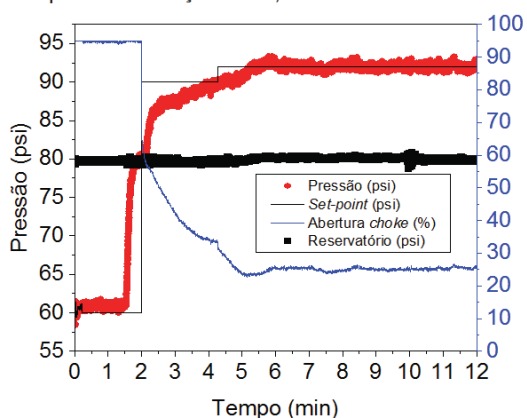


Figura 52 – Controle da entrada e saída de gás do reservatório. Fonte: O autor.

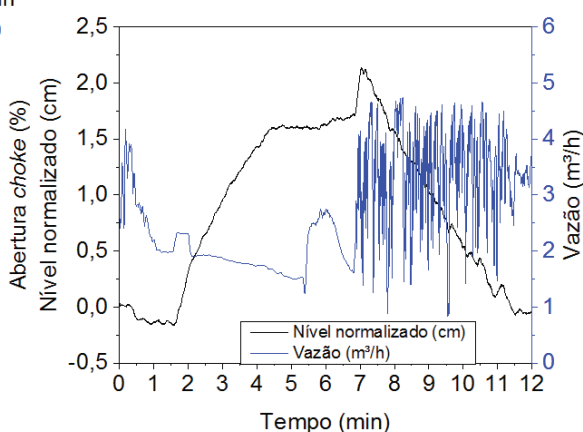
Um melhor desempenho seria obtido caso o nível do tanque permanecesse estático após o controle do *kick* de gás e só caísse através da expulsão do gás já presente no anular, esta situação aconteceu apenas em poucos testes conduzidos com a estratégia *feedback*. A Figura 53 apresenta o fenômeno.

No teste da Figura 53 a diferença de pressão entre o estado estacionário e o *set-point* foi de 10,72 psi, enquanto no teste da Figura 51 com um delta de 7 psi houve bastante invasão de fluido de perfuração no reservatório. Conclui-se que a diferença de pressão, para que não haja *kick* de gás nem perda de circulação, não é única e deverá ser ajustada de acordo com a resposta do sistema para os testes *feedback*. Observa-se no gráfico de pressões do teste da Figura 53 que houve a necessidade de aumentar o *set-point* próximo de 4 minutos para viabilizar a rejeição efetiva do *kick* de gás. Concluiu-se ainda que a unidade helicoidal apresenta uma janela operacional de pressão bastante sensível, sendo a definição do novo *set-point* de pressão anular de fundo uma tarefa difícil e crítica para o controle do processo.

Bomba 20 Hz - Abertura Reservatório 30% - Delta de 20 psi - Perturbação em 1,5 min - Controle em 2 min



Bomba 20 Hz - Abertura Reservatório 30% - Delta de 20 psi - Perturbação em 1,5 min - Controle em 2 min



Bomba 20 Hz - Abertura Reservatório 30% - Delta de 20 psi - Perturbação em 1,5 min - Controle em 2 min

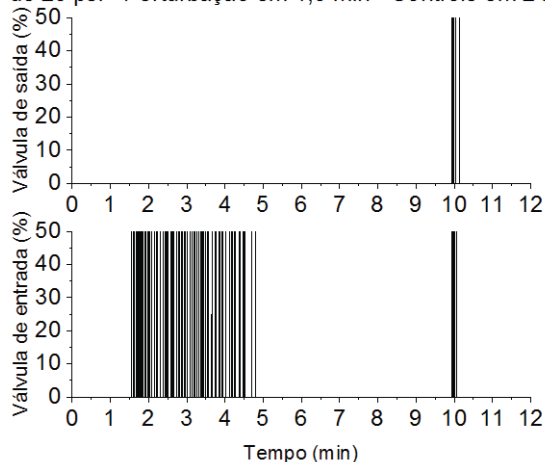


Figura 53 – Comportamento desejável para o controle do *kick* de gás. Fonte: O autor.

Uma malha experimental de testes regulatório, usando estratégia *feedback*, foi realizada para avaliar a eficiência desta estratégia de controle. Estando a bomba em 20 Hz, implementaram-se diferenças de pressão entre anular e reservatório de 10 psi, 15 psi e 20 psi, para aberturas da válvula reservatório de 30%, 40% e 50%. O novo *set-point* foi definido 0,5 minutos após a perturbação. Os gráficos estão disponíveis no ANEXO G.

O controle de *kick* de gás por estratégia *feedback* se mostrou efetivo por conseguir estancar a entrada de gás no anular. Porém, na grande maioria dos testes houve perda de circulação, devido à baixa acurácia na definição da melhor diferença de pressão entre o estado estacionário e o novo *set-point*, já que é o operador que observa o estado estacionário e escolhe o novo *set-point*.

O distúrbio foi controlado em todos os testes após aproximadamente 2 minutos da mudança de *set-point* e 2,5 minutos após a ocorrência do *kick* de gás. O controle foi mais demorado em situações mais drásticas, ou seja, de maior abertura da válvula reservatório



e de maior diferença de pressão anular/reservatório. Em contrapartida, para testes sob condições severas, o *kick* poderia ser identificado mais rapidamente, embora o controle tenha começado após 0,5 minutos da ocorrência do *kick* de gás, por questões de padronização. A Figura 54 mostra que o *kick* já poderia ser identificado próximo de 0,15 minutos após o *kick* de gás (que acontece no minuto 1,5), avaliando a vazão ou a inclinação do nível.

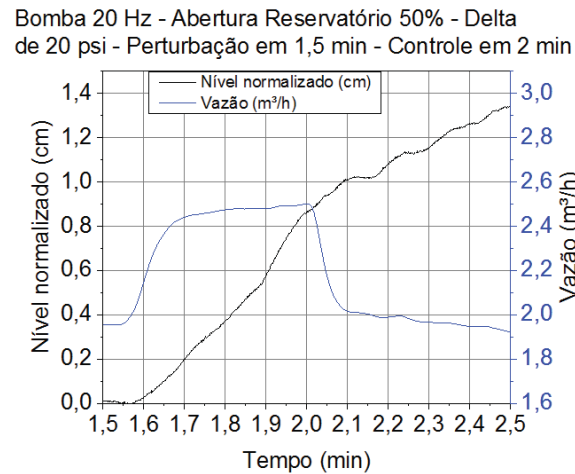


Figura 54 – Possibilidade de identificação previa (antes de 2 minutos) do *kick* de gás para testes em condições mais severas. Fonte: O autor.

## 4.2 Estratégia: Reconfiguração de controle

Nesta parte do trabalho são apresentados todos os passos necessários para a implementação da estratégia com reconfiguração da lei de controle *feedback*↔*feedforward*.

Primeiramente foram realizados testes para entender o comportamento do poço sobre *kick* de gás em várias situações. Nestes testes foi possível avaliar a expansão do gás, e o perfil de resposta das pressões, da vazão e do nível. Feito isso, partiu-se em busca dos parâmetros do controlador *feedforward*, visto que a parte *feedback* da reconfiguração já havia sido identificada no Item 4.1.2. Com os parâmetros *feedforward* em mãos os testes regulatório foram realizados.

### 4.2.1 Avaliação do comportamento do gás no anular - Expansão do gás

A expansão do gás e o comportamento da pressão anular de fundo e pressão no *choke* foram estudados em diferentes situações, quais sejam:

- Poço aberto sem circulação de fluido de perfuração – perturbação tipo pulso.
- Poço aberto com circulação de fluido de perfuração – perturbação tipo pulso e perturbação tipo degrau;

As situações propostas representam cenários do processo de perfuração que ocorrem durante as manobras de parada para retirar tubo de perfuração e quando o gás adentra no anular em malha aberta com o poço em circulação. Os estudos do comportamento do poço e do gás podem facilitar o controle e manutenção da sonda de perfuração, evitando riscos.

#### 4.2.1.1 Poço Aberto e sem circulação de fluido de perfuração – Perturbação tipo pulso

Para avaliar a expansão do gás quando o poço está aberto e a bomba desligada as seguintes pressões foram utilizadas no reservatório: 20 psi, 30 psi, 40 psi, 50 psi e 100 psi. No caso do poço aberto, ao entrar na região anular e expandir, o gás empurra o líquido que é direcionado para o tanque de retorno. Um resultado típico é apresentado na Figura 55:

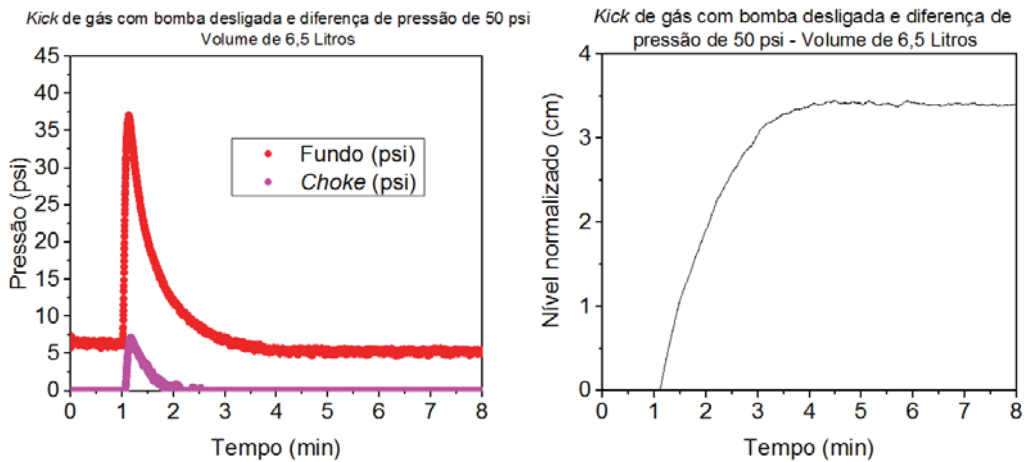


Figura 55 – Kick de gás do tipo pulso (6,5 litros) em poço aberto. Fonte: O autor

A Figura 55 apresenta as variações que acontecem na pressão anular de fundo e na pressão do *choke* quando o gás entra no anular como uma perturbação do tipo pulso. No gráfico de nível, apresentado também na Figura 55 (direita), pode ser observado o quanto o nível do tanque de retorno subiu pela entrada do gás na unidade. Este aumento de nível é causado injeção e pela expansão do gás ao longo do anular, sendo que o volume que o fluido de perfuração ocupava no anular agora é ocupado pelo gás, logo, a variação no volume do tanque de retorno é igual ao volume de gás presente no anular. A variação de volume do gás, causado pela expansão ao longo do teste, é apresentada na Figura 56, juntamente com a vazão registrada durante o teste.

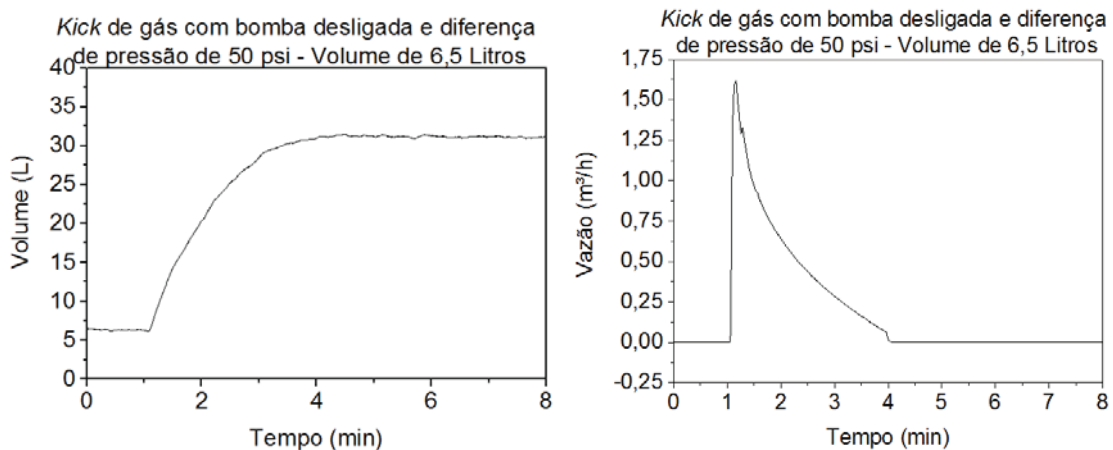


Figura 56 – Expansão do gás durante um *kick* no poço aberto. Fonte: O autor.

A expansão neste teste foi de 477% em relação ao volume inicial (6,5 litros) e cobriu 62 metros do anular. Considerando um fluido de perfuração de 10 ppg em um poço com a profundidade igual ao comprimento do anular helicoidal (343 metros), a falta de fluido nesta secção causaria uma perda da pressão hidrostática de 583 psi para 478 psi (18% de queda). Esta queda de pressão facilitaria a entrada de mais fluidos do

reservatório, tornando difícil o controle do poço. A mesma comparação foi feita para toda a malha experimental e os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Avaliação do comportamento do gás, em poço aberto e sem circulação, para várias diferenças de pressão Tubo-reservatório/Anular.

Pressão no Reservatório (psi)	Volume final do gás (L)	Varição de volume em relação ao volume inicial	Comprimento relativo no anular (m)	Queda de pressão hidrostática para fluido de 10 ppg
20	16	245%	32	9%
30	22	338%	44	13%
40	27	414%	53	16%
50	31	477%	62	18%
100	55	846%	109	32%

Fonte: O autor.

Para a faixa estudada, a variação de pressão anular/reservatório e o volume final do gás apresentam uma relação linear (Figura 57).

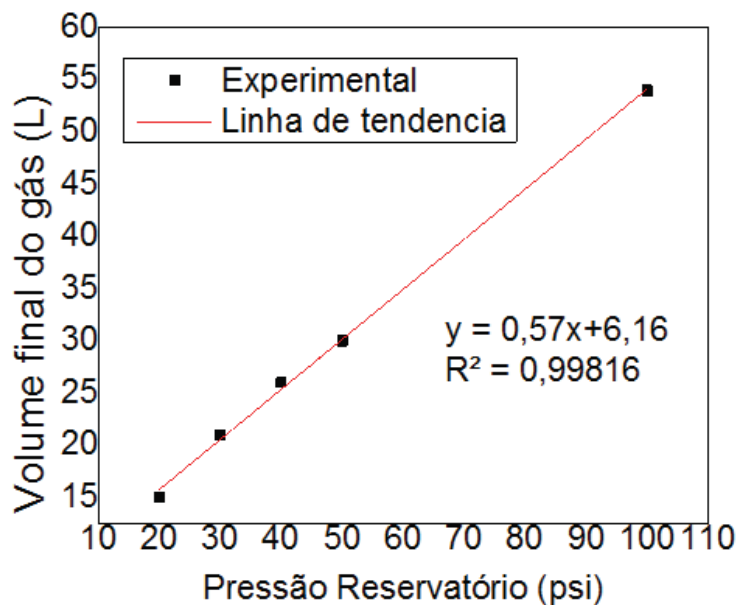


Figura 57 – Relação entre pressão inicial no Tubo-reservatório e volume final do gás em poço aberto sem circulação. Fonte: O autor.

O gráfico de nível da Figura 55 mostra que o gás demorou cerca de 3 minutos para alcançar seu máximo volume, situação que acontece quando este atinge o topo do anular. O mesmo comportamento pode ser observado no gráfico de vazão da Figura 56, onde o fluxo é nulo no 4º minuto de teste (3 minutos após a entrada do gás no anular).

#### 4.2.1.2 Poço Aberto com circulação de fluido de perfuração – Perturbação tipo pulso

Os testes com poço aberto e circulação foram feitos com a bomba a 20 Hz com diferença de pressão de 10 psi, 20 psi, 30 psi, 40 psi, 50 psi e 60 psi entre o reservatório e o anular. Um resultado típico é apresentado na Figura 58.

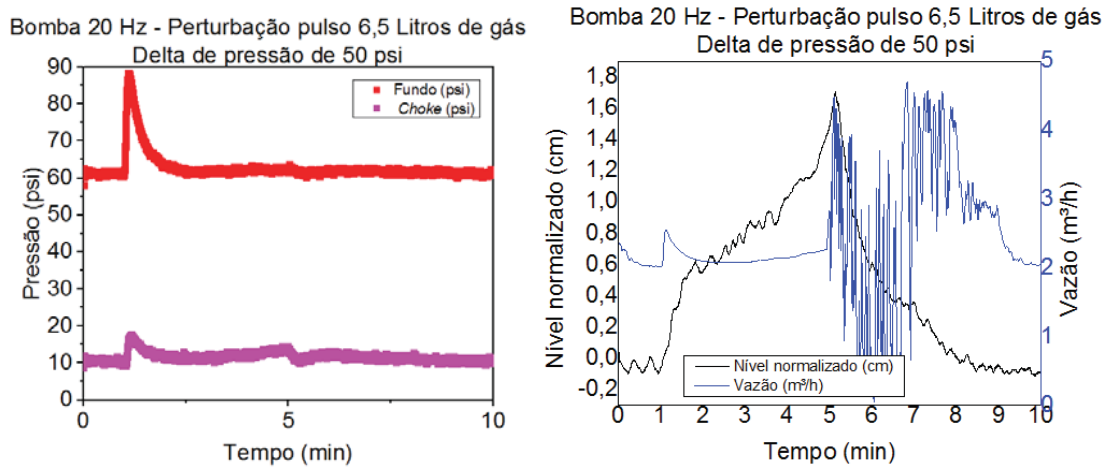


Figura 58 – Pulso com sistema em circulação. Fonte: O autor.

Para o cálculo da expansão do gás, foram empregados os dados apenas até o momento que este chega ao medidor de vazão, visto que a variação do volume do tanque provocada pela entrada de gás no anular começa a cair pela expulsão do gás. O resultado é apresentado pela Figura 59.

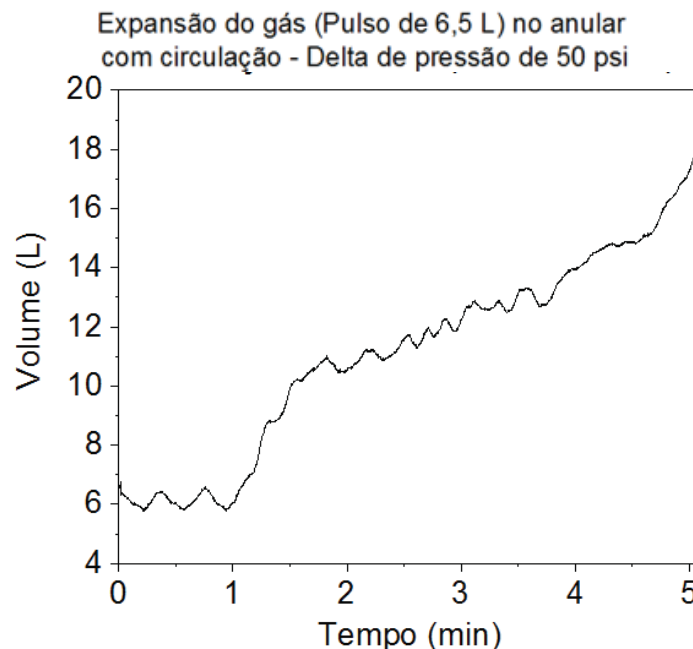


Figura 59 – Expansão de *kick* gás com volume inicial de 6,5 L e delta de pressão Tubo-reservatório/anular de 50 psi, em teste com circulação de fluido de perfuração.

Foi realizada uma avaliação da expansão da malha experimental e dos efeitos que esta geraria na pressão hidrostática de um poço real. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Avaliação do comportamento do gás, em poço aberto e com circulação, para várias diferenças de pressão Tubo-reservatório/Anular.

Pressão no Reservatório (psi)	Volume final do gás (L)	Variação de volume em relação ao volume inicial	Comprimento relativo no anular (m)	Queda de pressão hidrostática para fluido de 10 ppg
10	11	169%	22	6,4%
20	13	200%	26	7,6%
30	14	215%	28	8,2%
40	17	262%	32	9,3%
50	19	292%	36	10,5%
60	21	323%	41	12,0%

Fonte: O autor.

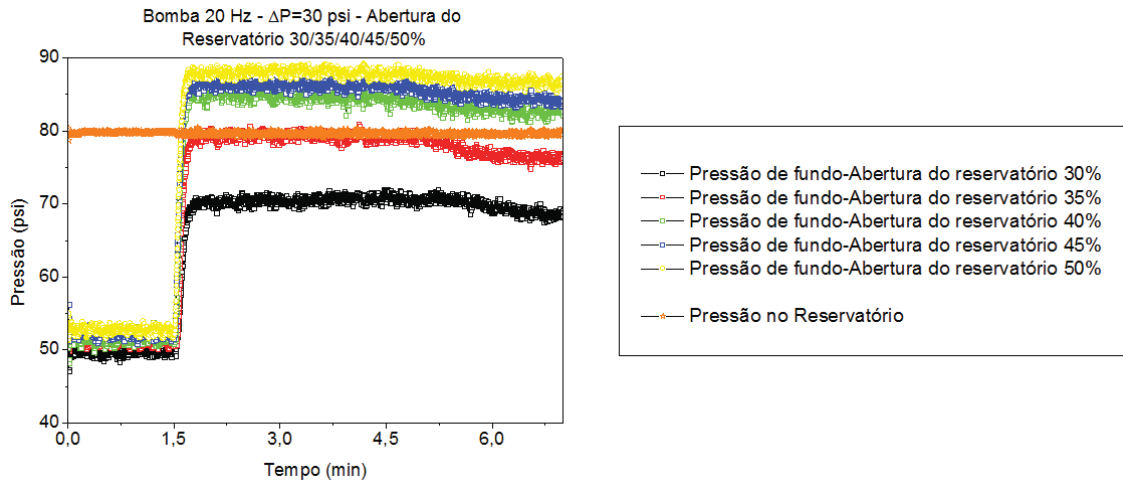
#### 4.2.2 Parâmetros *feedforward* – Identificação do sistema

Para os testes de identificação dos parâmetros do sistema e do controlador *feedforward*, com bomba em 20Hz, após o estado estacionário ser alcançado, implementava-se uma perturbação do tipo degrau, de magnitude conhecida na forma de um *kick* de gás. Uma curva de reação é gerada e os parâmetros do sistema e do controlador são estimados. A frequência de 20 Hz foi utilizada porque durante os testes de identificação, notou-se que a pressão ficava instável quando o inversor de frequência da bomba operava a frequências abaixo de 15 Hz. Sabe-se que quanto menor a vazão imposta ao sistema, maior é o tempo para controlar o *kick* e para avaliar os efeitos da entrada do gás pressurizado no anular, sendo assim, a frequência para os testes de identificação dos parâmetros *feedforward* foi de 20Hz.

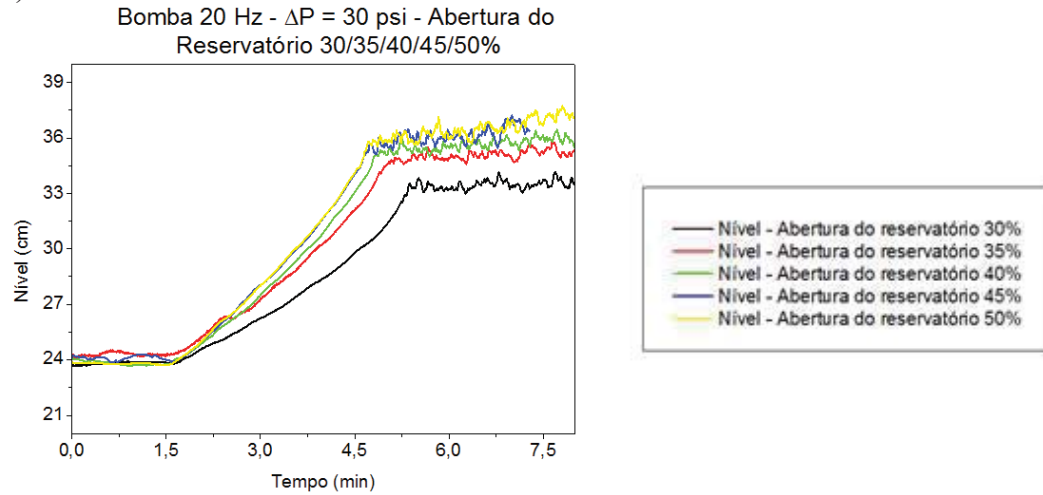
Durante a identificação dos parâmetros *feedforward*, em triplicata, diversos índices de abertura da válvula reservatório (30%, 35%, 40%, 45% e 50%) foram utilizados, simulando várias porosidades da matriz rochosa. O reservatório era preenchido com gás a pressões sempre acima da pressão anular de fundo, para que o sentido de escoamento do fluido fosse do reservatório para o anular, caracterizando o *kick* de gás. A pressão no reservatório permanecia estável durante o teste. As diferenças entre a pressão do reservatório e a pressão anular de fundo no instante inicial, foram de 10 psi, 20 psi e

30 psi, sendo dada a perturbação do tipo degrau no tempo 1,5 minutos. Um resultado típico é apresentado na Figura 60 a), b) e c).

a)



b)



c)

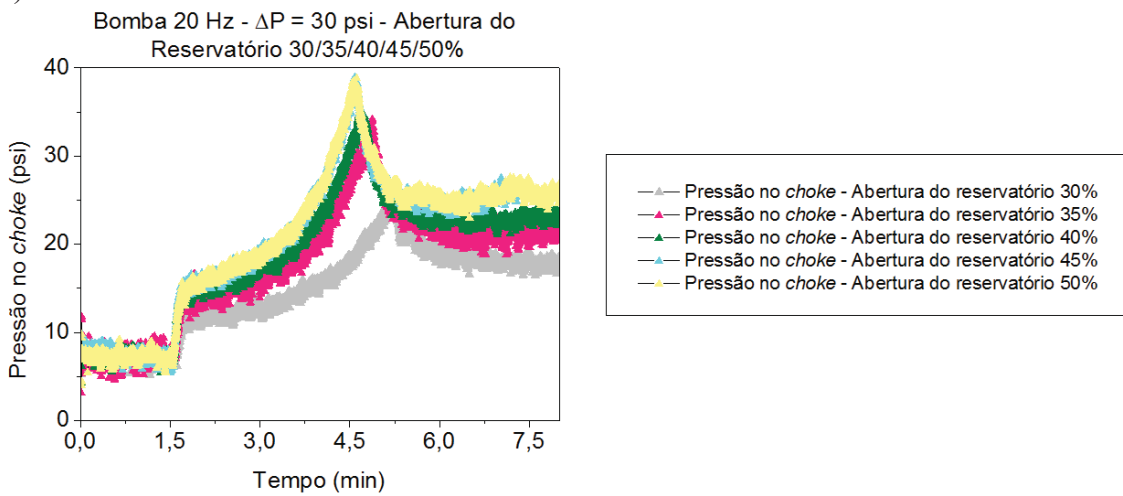


Figura 60 – Identificação dos parâmetros *feedforward* – (a) 10 psi, (b) 20 psi, (c) 30 psi.

Fonte: O autor.

Um comportamento interessante foi observado na pressão do *choke*, e é particularmente semelhante à variação do nível do tanque de retorno. A dinâmica de resposta da pressão no *choke* é notoriamente mais lenta, sendo mais perceptível a diferença de resposta para os variados índices de abertura da válvula reservatório, primordialmente para os testes com maior diferença de pressão anular/reservatório, caso da Figura 60. As triplicatas são apresentadas separadamente no ANEXO F.

Após a entrada de gás, a pressão do *choke* sobe como degrau, depois aumenta em curva exponencial a medida que o gás ascende e expande pelo helicoidal, até que o gás atinja o *choke*. O pico de pressão no *choke*, acontece quando o gás chega no transdutor próximo do *choke*.

Nos testes de identificação dos parâmetros *feedforward*, a migração do gás acontece inicialmente pela diferença de pressão anular/reservatório. As forças motrizes que fazem o gás migrar pelo helicoidal são: a diferença de densidade entre gás e fluido de perfuração; o empistonado do gás pelo fluido que vem da bomba, e a expansão do gás que acelera a ascendência do gás pelo anular. O gás empurra o líquido que estava na tubulação, o que modifica o estado estacionário do sistema aumentando o nível do tanque de retorno. A Figura 61 apresenta o comportamento da vazão e do aumento do nível do tanque, devido à entrada de gás no anular. Próximo de 4 minutos, os dados de vazão ficam altamente ruidosos. Este comportamento acontece quando o gás chega no medidor, posicionado depois da válvula *choke* e é condizente com o discutido no trabalho de Vajargah & Oort (2015). Os autores ressaltam a ineficiência do medidor de fluxo tipo coriolis quando submetido a fluidos bifásicos ou de baixa densidade. Porém, considerando que a bomba manteve a mesma vazão ao longo do processo ( $2\text{m}^3/\text{h}$ ), o acréscimo de vazão que acontece do minuto 1,5 até o final do teste é decorrente da injeção do gás, causada pela diferença de pressão entre o reservatório e o anular, pela diferença de densidade e pela expansão do gás. A Figura 61 demonstra ainda, o momento exato no qual o gás passa pelo medidor, caracterizado pelo ruído próximo do minuto 4,5. Como o medidor está localizado após o *choke*, consegue-se saber o tempo de permanência do gás no anular.



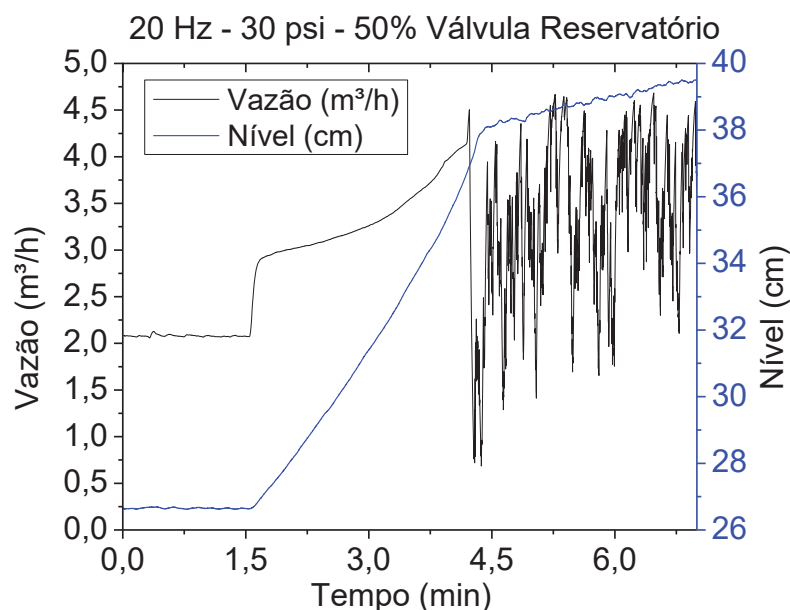


Figura 61 – Comportamento do nível e da vazão ao longo dos experimentos de identificação dos parâmetros *feedforward*. Fonte: O autor.

O tempo que o gás levou para atingir o medidor de vazão nos testes regulatório por estratégia *feedback* (Figura 51 e Figura 53, cerca de 8 minutos), foi bem maior que o tempo levado em malha aberta (cerca de 4,5 minutos – Figura 59 e Figura 60), isto se deve às dificuldades que o gás tem para expandir em um sistema controlado, dificultando sua ascendência pelo anular.

A magnitude da perturbação (M) para a obtenção dos parâmetros *feedback* foi a variação no índice de abertura da válvula *choke*. Para o controle *feedforward*, é preciso definir qual a variável tem relação mais direta possível com a magnitude da perturbação (M). Tem-se como opção: O diferencial de pressão entre reservatório e anular; a variação do índice de abertura da válvula reservatório; a variação no nível do tanque; a variação da inclinação do nível; e a variação da vazão de saída. Como a vazão apresentou comportamento altamente ruidoso durante a passagem de gás, esta não poderá ser utilizado para a obtenção do parâmetro M. Durante a perfuração real, não se tem medidas em tempo real do diferencial de pressão e tampouco da porosidade da matriz porosa, logo, há apenas as outras duas possibilidades de escolha.

Durante os testes de avaliação da expansão do gás, notou-se que o gás demora a sair do anular e que, por isso, o fato de o nível não estar na posição original antes de o *kick* de gás acontecer, não significa que ainda está entrando gás no anular. Portanto, é mais importante a avaliação da inclinação do nível, pois se esta estiver estável, significa

que nem gás entra no anular (*kick*) e nem fluido de perfuração é perdido (perda de circulação). Seborg *et al.* (2011) ressaltam que a leitura das variáveis deve ser realizada da forma mais direta possível, desse modo, a variável inclinação é a forma mais direta de avaliação da perturbação e sua magnitude. Quando o *kick* for percebido, a lei de controle será reconfigurada para *feedforward*, a qual buscará rejeitar a perturbação, buscando uma inclinação de nível igual a zero. Logo, a variação da inclinação do nível enquanto o gás entra no o anular foi utilizada para obtenção do parâmetro M, assim como a avaliação do nível e suas variações é utilizada na perfuração real como forma de identificar o *kick* e sua magnitude (GRACE, 2003; THOMAS, 2004; SANTOS, 2014). A inclinação do nível foi calculada pelo método Savitzky-Golay (SAVITZKY & GOLAY, 1964). A Figura 62 apresenta o comportamento da inclinação do nível enquanto o gás entra no anular.

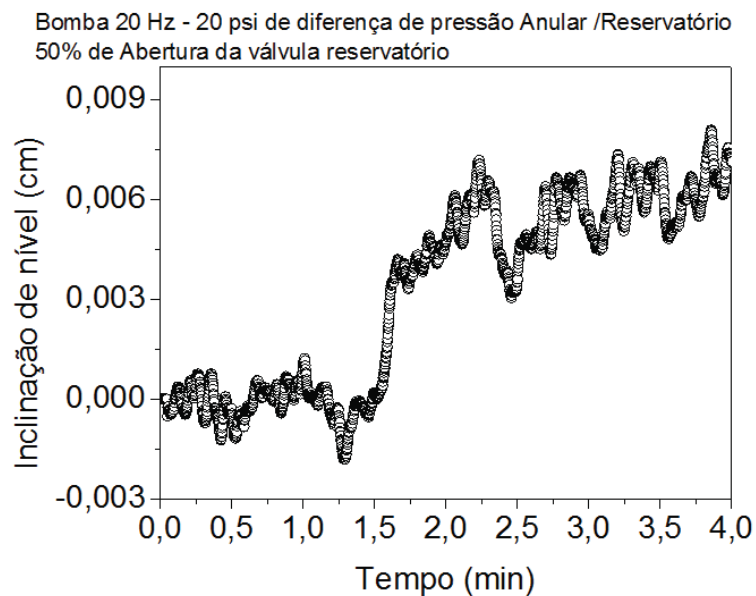


Figura 62 – Comportamento da inclinação do nível em teste em malha aberta. Fonte: O autor.

A Figura 63 apresenta os dados experimentais e o modelo identificado via função de transferência de 1ª ordem com atraso construída com os parâmetros do sistema, demonstrando que o modelo apresenta fidelidade ao processo.

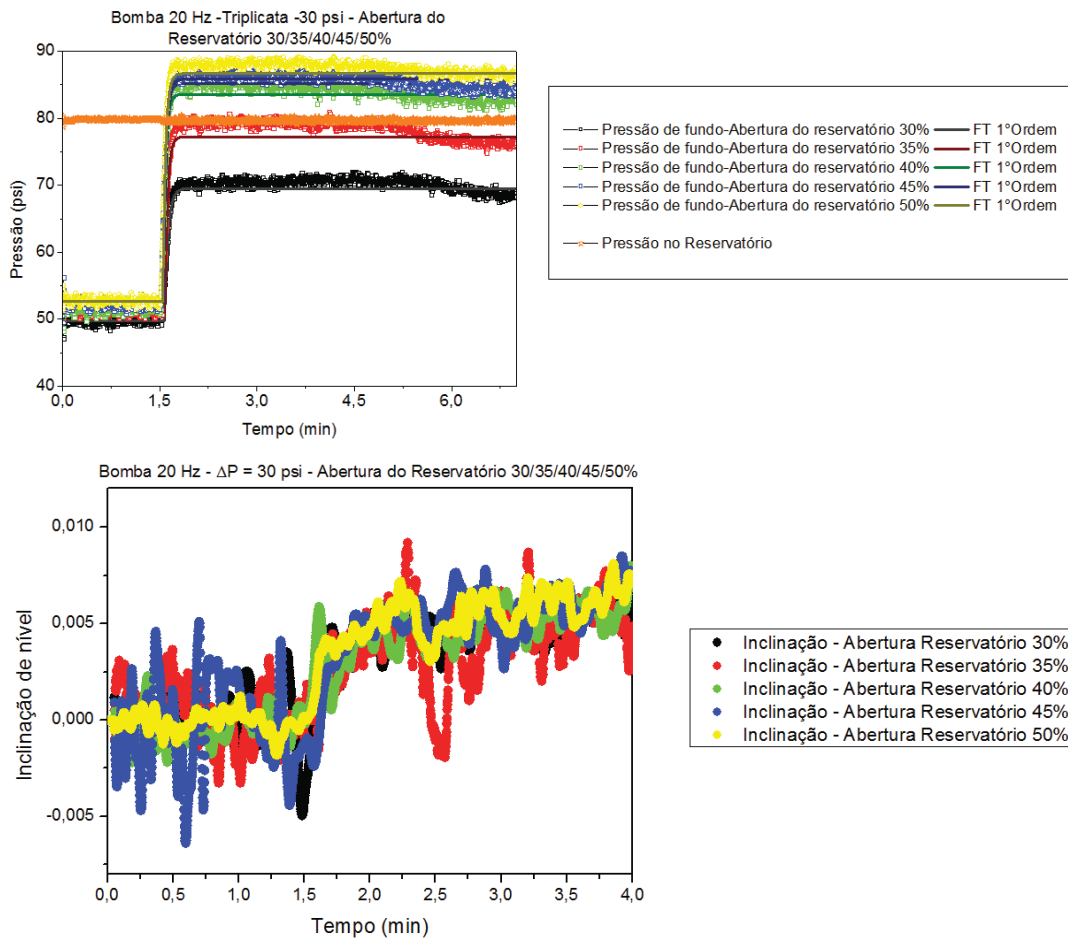


Figura 63 – Resposta da variável de saída (pressão de fundo) à perturbação (*kick* de gás) (acima) e variável de entrada (variação da inclinação de nível) (abaixo) . Fonte: O autor.

O índice de abertura da válvula de permeabilidade afeta diretamente a taxa de entrada de gás no anular o que reflete em um maior ou menor aumento de pressão na unidade experimental. Pode-se observar na Figura 63 que há uma variação significativa entre os estados estacionários alcançados para as aberturas de 30%, 35%, e 40%, demonstrando que o gás entrou no anular sobre diferentes vazões, embora a diferença de pressão para todos os testes foi igual. Para 40%, 45% e 50% as diferenças observadas na variável de saída não foram significativas, demonstrando que o gás entrou no anular sobre vazões similares. O comportamento da variação na inclinação do nível (variável de entrada) é também apresentado na Figura 63 e não foi observado diferenças significativas na variação de sua magnitude para as diferentes aberturas da válvula reservatório. Diferenças mais significativas são observadas na variação da magnitude da inclinação de nível para diferentes diferenças de pressão anular/reservatório, onde as maiores magnitudes acontecem para os testes com maior diferença de pressão (Figura 64).

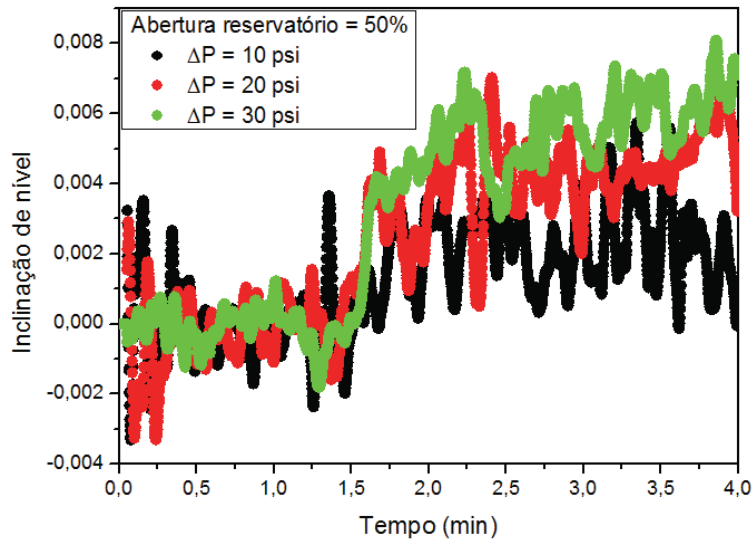


Figura 64 – Variação da inclinação de nível durante os testes de identificação para 10 psi, 20 psi e 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório. Fonte: O autor.

De posse dos parâmetros do sistema para a perturbação *kick* de gás, os parâmetros para o controlador *feedforward* foram adquiridos conforme discutido no Item 2.4.1.3. deste trabalho, utilizando a variação da inclinação do nível como variável de entrada e a pressão anular de fundo como variável de saída. Os parâmetros estão disponíveis no ANEXO A e os experimentos de identificação são apresentados no ANEXO F.

Durante o projeto da unidade helicoidal, apresentado no APÊNDICE deste trabalho, identificou-se que a abertura mínima da válvula reservatório para uma comunicação entre anular e reservatório era 30%. O ANEXO A mostra uma diferença significativa entre os parâmetros *feedforward* identificados para a abertura de 30% em relação às demais, coloca-se como hipóteses: Como a abertura (30%) é bastante pequena, esta exerce uma grande perda de carga sobre os fluidos que tentam transpassa-la. Como o gás possui baixa viscosidade em relação ao fluido de perfuração, este passará com maior facilidade pela fenda, trazendo parâmetros que fogem das tendências dos demais testes; a válvula reservatório não envia ao sistema um *feedback* dizendo qual foi a abertura realmente efetuada, sendo assim, ao enviar um sinal de 30% de abertura, se a válvula abrir somente 28% não haverá contato anular reservatório, o que explica a baixa repetibilidade nestes testes; a pequena abertura desencadeia baixas vazões e pode explicar o maior atraso (td) e as baixas magnitudes da variável de entrada.

#### 4.2.3 Controle de *kick* de gás – Teste regulatório – Perturbação degrau

Durante os testes regulatório empregando reconfiguração de controle, inicialmente a pressão anular de fundo é controlada por um controlador PI *feedback* e em

um dado momento um *kick* de gás perturba o anular. A identificação do *kick* é feita automaticamente avaliando-se em tempo real dois critérios:

Critério 1: Duas inclinações de nível em momentos diferentes são calculadas pelo método Savitzky-Golay (SAVITZKY & GOLAY, 1964). A primeira inclinação leva em consideração os 25 pontos anteriores ao momento atual. A segunda inclinação utiliza do 26º ponto até o 50º ponto anterior ao momento atual. Se o valor das duas derivadas forem, ao mesmo tempo, maior que 0,003 o Critério 1 será atendido. A Figura 65 demonstra o processo:

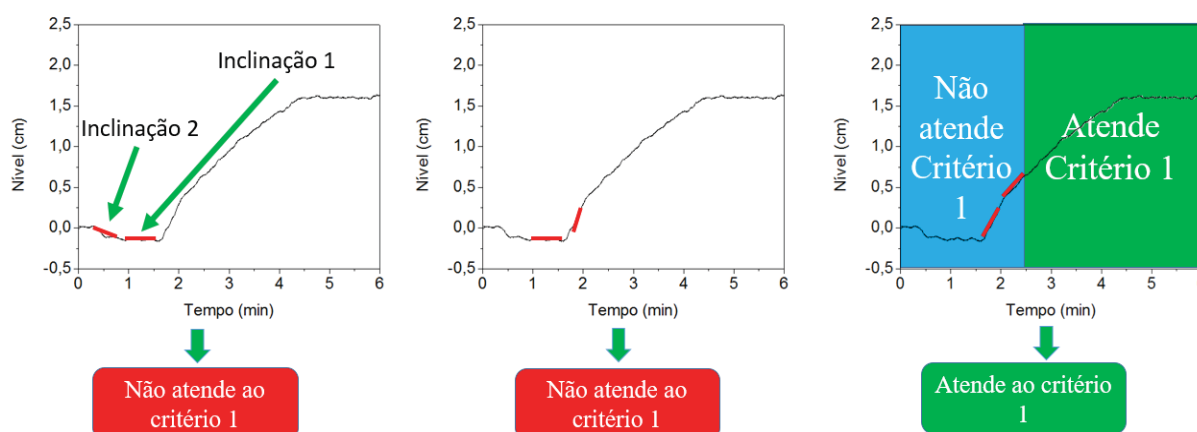


Figura 65 – Critério para reconfiguração de controle *feedback*↔*feedforward*. Fonte: O autor.

Critério 2: Quando a primeira inclinação de nível é maior que 0,003, calcula-se a média dos valores de nível do último minuto. Se o nível atual for 0,1 cm maior que esta média, o Critério 2 será atendido.

Se os dois critérios forem atendidos concomitantemente a lei de controle muda *feedback*↔*feedforward*, passando a ter como variável controlada a inclinação de nível e buscando voltar a inclinação de nível para zero (*set-point* = 0), alterando o índice de abertura da válvula *choke* (variável manipulada).

As inclinações do nível continuam a ser avaliadas durante o processo de controle do *kick* de gás. O controlador volta de *feedforward* para *feedback* quando for verificado que as duas inclinações são menores que -0,003, garantindo que não há mais gás entrando no anular. Quando o controlador retornar para *feedback*, o *set-point* será o valor atual de pressão somado de uma margem de segurança, ou seja, o controlador vai manter o fundo do poço no estado onde não há perda de circulação nem *kick* de gás.

Nos testes com reconfiguração de controle, a bomba era mantida em 20 Hz e, quando o estado estacionário era alcançado, o controlador (*feedback*) mantinha o fundo

do poço na pressão do estado estacionário. No minuto 1,5 o *kick* de gás penetrava o anular e o programa de automação deveria identificar e controlar o *kick* de gás. Testes foram realizados com 10 psi, 15 psi, e 20 psi e 25 psi de diferença de pressão anular/reservatório, para aberturas de 30%, 40% e 50% da válvula reservatório. A malha experimental foi escolhida assim para que pudesse ser comparada com os testes da estratégia *feedback* (Item 4.1.4). A Figura 66 apresenta um resultado típico. Todos os resultados podem ser apreciados no ANEXO H.

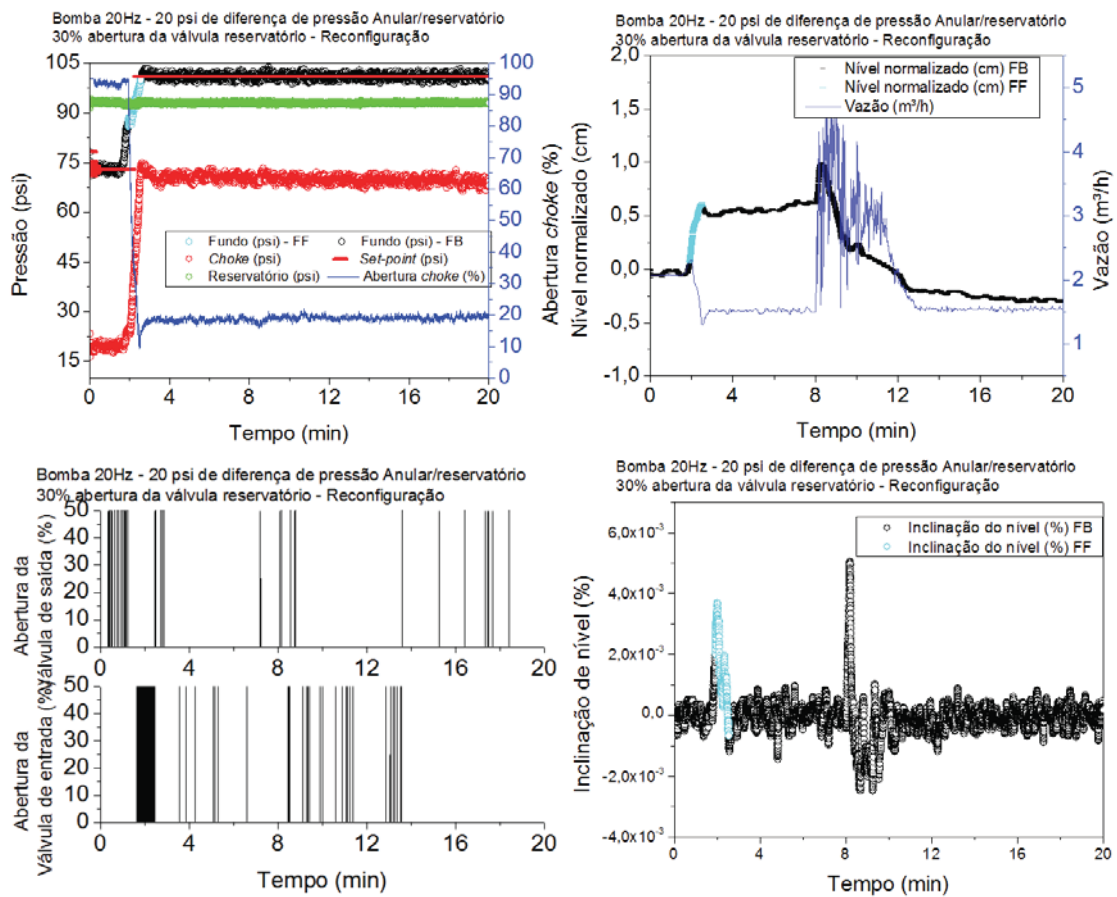


Figura 66 - Teste regulatório com estratégia de reconfiguração da lei de controle. Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 66 no gráfico de nível (superior, direito) que a invasão foi mínima e controlada. O nível permaneceu constante (minutos entre 4 e 8) após o sistema voltar para o modo *feedback*, o que significa que não está havendo *kick* no anular nem perda de circulação. O gráfico que apresenta a ação das válvulas de controle do tanque reservatório (inferior, esquerdo) corrobora com isso, pois a não necessidade de abertura excessiva da válvula de entrada de ar significa que não foi preciso a repressurização do tanque reservatório, por causa da saída de ar do tanque para o anular (*kick* de gás). Não

houve necessidade também de abertura excessiva da válvula de saída, ou seja, o reservatório não foi pressurizado pela entrada de fluido de perfuração (perda de circulação). O gráfico de inclinação do nível (inferior, direita) mostra que quando o *kick* de gás entrou no anular (1,5 minutos), e a inclinação do nível aumentou, o controlador se tornou *feedforward* (azul celeste) levando rapidamente a inclinação do nível a zero, mostrando a efetividade da estratégia de controle. No gráfico das pressões (superior, esquerdo) é notório a velocidade com que a variável manipulada (abertura *choke*) age, o que rejeita rapidamente a entrada de gás no anular, diminuindo o volume de *kick* de gás que invade o anular. Por fim, nota-se ainda o curto período de controle de *kick* de gás, melhor observado na Figura 67, onde a escala é mais favorável.

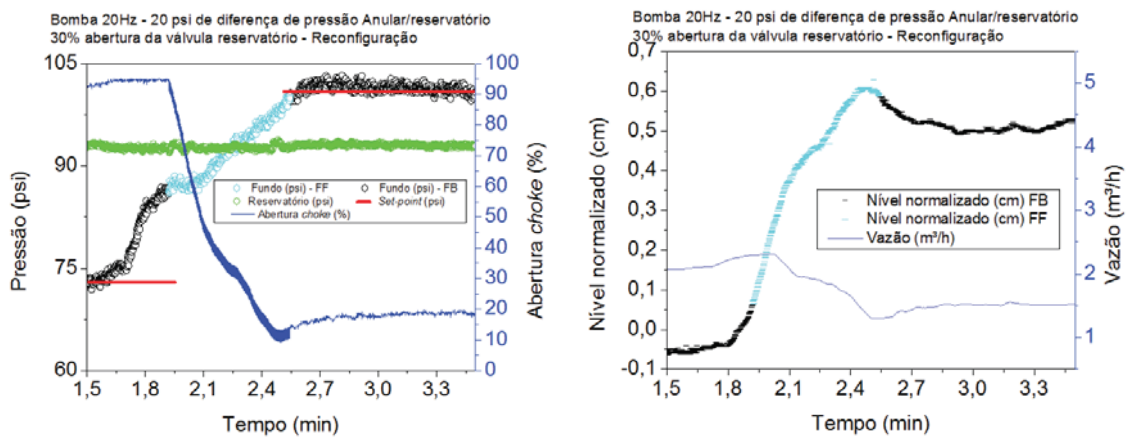


Figura 67 – Velocidade de controle do *kick* de gás na estratégia com reconfiguração.  
Fonte: O autor.

### 4.3 Comparação: Estratégia com reconfiguração de controle x Estratégia *feedback*

A estratégia por reconfiguração apresentou maior efetividade no controle do *kick* de gás quando comparada à estratégia *feedback*. Na estratégia por reconfiguração, o *kick* de gás foi identificado com maior antecedência. A Tabela 6 apresenta o tempo levado para que o *kick* fosse identificado por cada estratégia de controle.

Tabela 6 - Comparação da velocidade de identificação do *kick* para as estratégias: *Feedback* e reconfiguração.

$\Delta$ Pressão	10 psi			15 psi			20 psi		
Abertura do reservatório	30%	40%	50%	30%	40%	50%	30%	40%	50%
Reconfiguração (min)	0,203	0,159	0,156	0,148	0,153	0,152	0,421	0,173	0,163
<i>Feedback</i> (min)	0,5			0,5			0,5		

Fonte: O autor.

A variável manipulada atuou mais rapidamente na estratégia por reconfiguração. A Figura 68 apresenta um resultado típico onde se compara uma estratégia com a outra.

Na estratégia *Feedback* a variável manipulada só atinge o estado estacionário com 4 minutos de teste, já na estratégia por reconfiguração ela atinge o estado estacionário antes de 2 minutos. O comportamento se repete na malha experimental e pode ser visto comparando os resultados dos testes regulatório por estratégia *feedback* (ANEXO G) e por reconfiguração (ANEXO H).

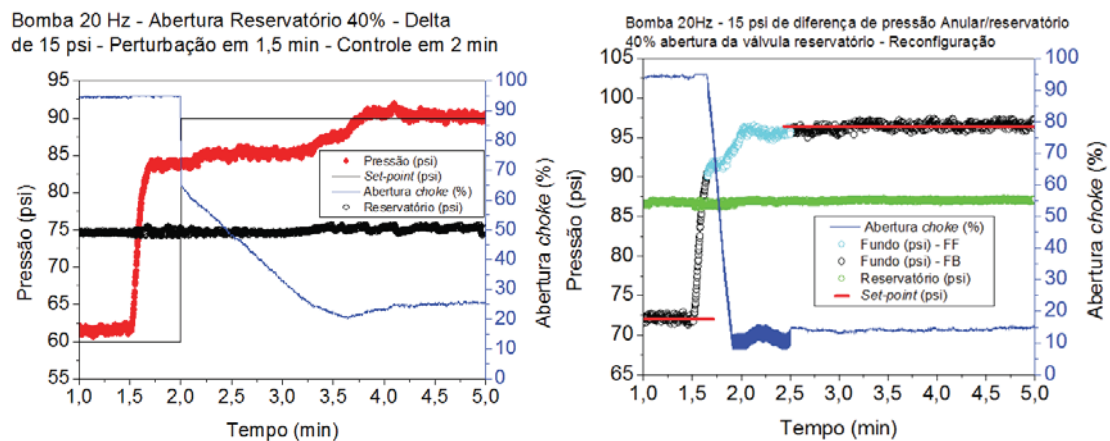


Figura 68 – Comparação da variável manipulada para as estratégias: *Feedback* e reconfiguração. Fonte: O autor.

Na maior parte dos testes por estratégia *feedback* houve perda de circulação, o que pode ser notado pelo nível final, que se apresenta abaixo do nível inicial do teste, após expulsão do gás do anular. Nos testes por reconfiguração, o nível volta ao nível inicial, sendo a comparação apresentada na Figura 69.

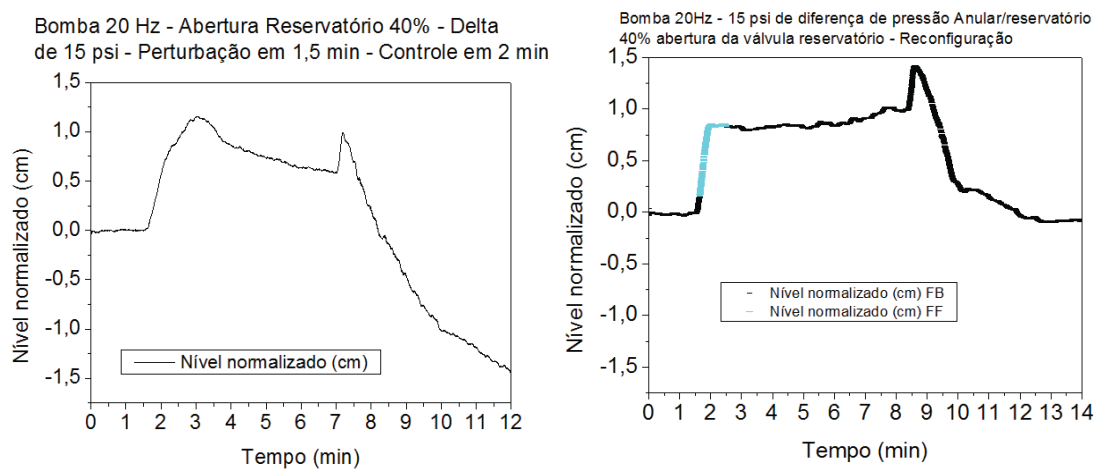


Figura 69 – Comparação da variável manipulada para as estratégias: *Feedback* (esquerda) e reconfiguração (direita). Fonte: O autor.



#### 4.4 Modelagem

As equações apresentadas pela literatura foram adaptadas para o sistema em helicoidal, visto que, os artigos não fornecem uma quantidade considerável de parâmetros e variáveis empíricas (FENG *et al.*, 2015; MENG *et al.*, 2015; STAMNES *et al.*, 2007; HAUGE *et al.*, 2013; ZHOU & NYGAARD, 2011; CALADO, CARVALHO NETO & SOTOMAYOR, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2013; NYGAARD & NÆVDAL, 2006). Tal situação dificulta a reprodução dos dados e a adaptação da modelagem para outras situações do processo de perfuração.

As equações inseridas nesta modelagem matemática buscam expressar a pressão anular de fundo, variável primordial para o controle do poço durante a perfuração. Algumas das variáveis necessárias à modelagem como pressão na bomba ( $P_p$ ), pressão no *choke* ( $P_c$ ) e vazão na broca ( $q_{bit}$ ) podem ser expressas por equações fenomenológicas que usam balaços baseados nos princípios fundamentais de conservação. As demais variáveis serão descritas por relações constitutivas, como é o caso da pressão anular de fundo que foi exposta por Stamnes *et al.* (2007) e se apresenta através da Equação 4.1.

$$P_{bit} = \frac{1}{M} (M_a P_p + M_d P_c + M_d P_{af} - M_a P_{df} + M_a \Delta P_{dh} + M_d \Delta P_{ah}) \quad \text{Equação 4.1}$$

Em que:

M - Densidade por metro total ( $\text{kg/m}^4$ );

$M_a$  - Densidade por metro no anular ( $\text{kg/m}^4$ );

$M_d$  - Densidade por metro na coluna de perfuração ( $\text{kg/m}^4$ );

$P_p$  - Pressão na bomba (bar);

$P_c$  - Pressão a jusante da válvula *choke* (bar);

$P_{af}$  - Perdas de pressão por atrito no anular (bar);

$P_{df}$  - Perdas de pressão por atrito na coluna de perfuração (bar);

$\Delta P_{ah}$  - Diferenças de pressão hidrostática no anular (bar);

$\Delta P_{dh}$  - Diferença de pressão hidrostática na coluna de perfuração (bar).

Segundo Stamnes *et al.* (2007), a densidade por metro total é descrita pela Equação 4.2.

$$M = M_a + M_d \quad \text{Equação 4.2}$$

Hauge *et al.* (2013) propõe que  $M_a$  e  $M_d$  sejam descritos conforme as Equações 4.3 e 4.4:

$$M_a = \rho_a \frac{h}{A_a} \quad \text{Equação 4.3}$$

$$M_d = \rho_d \frac{h}{A_d} \quad \text{Equação 4.4}$$

Em que:

$\rho_a$  - Densidade do fluido no anular ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_d$  - Densidade do fluido na coluna ( $\text{kg/m}^3$ );

$A_a$  - Área calculada com o diâmetro hidráulico da seção transversal do anular ( $\text{m}^2$ );

$A_d$  - Área da seção transversal da coluna de perfuração ( $\text{m}^2$ );

$h$  – Profundidade do poço (m).

Em seguida são apresentadas equações que foram adaptadas de Kaasa (2007). Estas equações também são utilizadas em modelos desenvolvidos por Stamnes *et al.* (2007), Zhou & Nygaard (2011), Calado, Carvalho Neto & Sotomayor (2011) e Hauge *et al.* (2013).

A pressão na bomba ( $P_p$ ) é encontrada pela integração da Equação 4.5, que leva em consideração o módulo de compressibilidade do fluido na coluna de perfuração ( $\beta_d$  (bar)):

$$\frac{dP_p}{dt} = \frac{\beta_d}{V_d} (q_p - q_{bit}) \quad \text{Equação 4.5}$$

Em que  $V_d$ ,  $q_p$  e  $q_{bit}$  são volume da coluna ( $\text{m}^3$ ) e vazão da bomba (recalque) ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e vazão na broca (fundo do anular, parte externa) ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), respectivamente.

As perdas por atrito no anular e na coluna de perfuração são expressas pelas Equações 4.6 e 4.7.

$$P_{af} = F_a |q_{bit} + q_{res}| (q_{bit} + q_{res}) \quad \text{Equação 4.6}$$

$$P_{df} = F_d |q_{bit}| q_{bit} \quad \text{Equação 4.7}$$

Na qual:

$F_a$  - Fator de atrito no anular ( $\text{bar.s}^2/\text{m}^6$ );

$F_d$  - Fator de atrito na coluna ( $\text{bar.s}^2/\text{m}^6$ );

$q_{res}$  – Vazão de fluidos advindos do reservatório ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Nas Equações 4.6 e 4.7 o módulo foi utilizado entre as vazões para que a simulação pudesse identificar casos de vazão em sentido contrário ao habitual.

Embora a literatura acessada (ZHOU & NYGAARD, 2011; STAMNES *et al*, 2007) considere o fator de atrito  $F_d$  e  $F_a$  como uma constante, ela não informa como obter tais parâmetros. Há uma semelhança das Equações 4.6 e 4.7 com a equação de perda de carga distribuída, Equações 4.8, 4.9 e 4.10:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \frac{L_{eq}}{2gD} v^2 \quad \text{Equação 4.8}$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 4.9}$$

Ao rearranjar e substituir a Equação 4.9 na Equação 4.8 tem-se:

$$\Delta P_f = \left[ f \frac{\rho L_{eq}}{2DA^2} \right] Q^2 \quad \text{Equação 4.10}$$

Nas equações (4.8, 4.9 e 4.10):

$f$  - Fator de atrito (adimensional);

$L_{eq}$  - Comprimento equivalente (m);

$D$  - Diâmetro da região estudada (m);

$A$  - Área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$v$  - Velocidade do fluido (m/s).

Desse modo, o fator de atrito no anular e coluna será usado nesta modelagem conforme Equação 4.11:

$$F = \left[ f \frac{\rho L_{eq}}{2DA^2} \right] \quad \text{Equação 4.11}$$

A vazão na broca é representada pela Equação 4.12, um balanço de energia desenvolvido neste ponto.

$$\frac{dq_{bit}}{dt} = \frac{1}{M} (P_p - P_c - P_{df} - P_{af} + P_{dh} - P_{ah}) \quad \text{Equação 4.12}$$

A Equação 4.13 descreve o comportamento da pressão no *choke*:

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{\beta_a}{V_a} (q_{bit} + q_{res} - q_c) \quad \text{Equação 4.13}$$

Em que  $\beta_a$ ,  $V_a$  e  $q_c$  são módulo de compressibilidade do fluido no anular (bar), volume do anular ( $m^3$ ) e vazão no *choke* ( $m^3/s$ ), respectivamente.

A vazão no *choke* pode ser calculada através da Equação 4.14:

$$q_c = k_c z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_a} (P_c - P_{atm})} \quad \text{Equação 4.14}$$

Em que:

$k_c$  - Coeficiente de descarga da válvula ( $m^2$ )

$z_c$  - Índice de abertura da válvula (adimensional)

$P_{atm}$  - pressão atmosférica

As diferenças de pressão hidrostáticas no anular ( $P_{ah}$ ) e na coluna ( $P_{dh}$ ) são expressas pelas Equações 4.15 e 4.16, respectivamente:

$$\Delta P_{ah} = \rho_a g h \quad \text{Equação 4.15}$$

$$\Delta P_{dh} = \rho_d g h \quad \text{Equação 4.16}$$

Após a descrição das principais equações utilizadas para simular a pressão anular de fundo, listam-se abaixo as variáveis a serem especificadas para assegurar grau de liberdade igual a zero, sendo o subscrito “a” associado a variáveis lidas no anular, “d” na coluna de perfuração e “res” no reservatório:

1 -  $q_{res}$  - Vazão de fluidos advindos do reservatório ( $m^3/s$ );

2 -  $L_{eq\_a}$  e  $L_{eq\_d}$  - Comprimento equivalente (m);

3 -  $\beta_a$  e  $\beta_d$  - Módulo de compressibilidade do fluido (bar);

4 -  $V_a$  e  $V_d$  - Volume ( $m^3$ );

5 -  $f_a$  e  $f_d$  - Fator de atrito (adimensional);

6 -  $\rho_a$  e  $\rho_d$  - Densidade do fluido ( $kg/m^3$ );

7 -  $K_c$  - Coeficiente de descarga do *choke* ( $m^2$ );

8 -  $Z_c$  - Índice de abertura do *choke* (adimensional);

9 -  $D_a$  e  $D_d$  - Diâmetro hidráulico (m);

10 -  $A_a$  e  $A_d$  - Área calculada com o diâmetro hidráulico da seção transversal ( $m^2$ ).

A modelagem realizada neste trabalho não considera o aumento de profundidade do poço, porque pretende-se modelar a unidade experimental construída, cujo anular não

aumenta de comprimento, logo consideraremos constante o item 2 e conseqüentemente os itens 4, 9 e 10, de forma análoga ao trabalho de Stamnes *et al.* (2007). O item 7 trata de uma variável que é inerente à válvula utilizada, logo será utilizado um valor determinado experimentalmente. O item 3 foi considerado constante. O item 6 quando referente à coluna de perfuração será considerado constante e quando referente ao anular será expresso pela Equação 4.24. O item 8 será a variável manipulada do processo, variando de 0 a 1. Os valores das variáveis constantes estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valor dos parâmetros necessários para a implementação da modelagem

Sigla	Definição	Valor	Unidade
$L_{eqd}$	Comprimento equivalente na coluna	19	m
$L_{eqa}$	Comprimento do anular	343	m
K	Constante de descarga da válvula <i>choke</i>	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$m^2$
$\rho_a$	Densidade inicial no anular	1000	$kg/m^3$
$\rho_d$	Densidade na coluna	1000	$kg/m^3$
H	Altura do poço	5,73	m
$A_a$ e $A_d$	Área da seção transversal do anular e coluna	1	pol
$\beta_a$	Módulo de compressibilidade no anular	21000	bar
$\beta_d$	Módulo de compressibilidade na coluna	21000	bar
$q_p$	Vazão na bomba	2,04	$m^3/h$
$\mu$	Viscosidade	$1 \cdot 10^{-3}$	Pa.s
R	Raio da helicoidal	0,4	m
$k_{res}$	Coefficiente de descarga da válvula reservatório	$8 \cdot 10^{-7}$	$m^2$
$M_r$	Massa molar do gás do reservatório	29	$kg/kgmol$
$P_c$	Pressão inicial no <i>choke</i>	20	Psi
MM	Massa molar do ar	29	$g/gmol$
T	Temperatura do ar	30	$^{\circ}C$

Fonte: O autor

O item 1 será igual a 0 para estudos sem o *kick*. Para casos com entrada de fluidos nativos do reservatório, a  $q_{res}$  pode ser descrita conforme proposto por Hauge *et al.* (2013), Equação 4.17:

$$q_{res} = K_{pi}(P_{res} - P_{bit}) \quad \text{Equação 4.17}$$

Em que  $P_{res}$  e  $K_{pi}$  são a pressão no reservatório (bar) e o índice de produtividade do reservatório ( $m^3/(s.bar)$ ).

Hauge *et al.* (2013) empregou  $K_{pi}$  constante para a equação que modela a vazão no ponto de troca de fluido entre o reservatório e o anular. Na unidade construída no Laboratório de Escoamento de Fluidos – LEF/DEQ/IT/UFRRJ, a ligação entre o reservatório e o anular é feita por uma válvula de controle que busca representar o comportamento de uma rocha porosa, logo será utilizada a Equação 4.18, semelhante à Equação 4.14, equação que modela a vazão no *choke*.

$$q_{res} = k_{res} z_{res} \text{sign}(P_{bit} - P_{res}) \sqrt{\frac{2}{\rho_{res}} |P_{bit} - P_{res}|} \quad \text{Equação 4.18}$$

Em que:

$k_{res}$  - Coeficiente de descarga da válvula ( $m^2$ );

$z_{res}$  - Índice de abertura da válvula (adimensional);

$\text{sign}$  - Função que retorna apenas o sinal (+ ou -) da fórmula inserida entre parênteses;

$P_{res}$  – Pressão no reservatório;

$\rho_{res}$  – Densidade do fluido no reservatório.

O  $k_{res}$  é definido experimentalmente, o índice de abertura da válvula é definido pelo operador da planta, a pressão no reservatório é constante. O fluido presente no reservatório para os estudos desta dissertação de mestrado é ar pressurizado e terá pressões máximas de 120 psi. As propriedades relativas (pressão relativa  $P_r$  e temperatura relativa  $T_r$ ), dos componentes do ar foram avaliadas em condições que provocam maior fuga da idealidade (temperaturas mais baixas,  $T=25$  °C, e pressões mais altas,  $P=200$  psi) do que as condições encontradas nos testes experimentais e de simulação. Através da lei termodinâmica dos estados correspondentes, relacionou-se as propriedades relativas à compressibilidade ( $Z$ ), conforme discutido por Reid, Prausnitz & Poling (2000), e os desvios da idealidade foram insignificantes. Logo, pode-se descrever a densidade do ar usando a equação de Clapeyron, Equação 4.19:

$$\rho_{res} = \frac{P_{res} M_r}{R T_{res}} \quad \text{Equação 4.19}$$

Onde:

$P_{res}$  – Pressão no reservatório (Pa);

$M_r$  – Massa molar (kg/kgmol);

R – Constante dos gases ideais (kJ/(kgmol. K);

T<sub>res</sub> – Temperatura (K).

O item 5, fator de atrito (f<sub>d</sub> e f<sub>a</sub>), respeitará as propostas de Darcy (Equação 4.20), para Reynold (Re) menores que 2100:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Equação 4.20}$$

Onde o número de Reynolds é calculado por (Equação 4.21):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Equação 4.21}$$

Sendo  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $v$  a velocidade. Caso o número de Reynolds seja maior que 2100 e menor que 20000, para a região da coluna, a relação de Blasius (idealizada pelos princípios de Darcy) será utilizada, Equação 4.22:

$$f = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{Equação 4.22}$$

Para a região anular, a relação descrita por Srinivasan, Nandapurkar & Holland (1970) *apud* McCann & Islas (1996) é mais adequada, por ser desenvolvida especificamente para escoamento em helicoidal, caso da unidade experimental em questão. A relação é apresentada na Equação 4.23.

$$f = \frac{0,084}{Re^{0,2}} \left(\frac{r}{R}\right)^{0,1} \quad \text{Equação 4.23}$$

Sendo, r o raio do tubo e R o raio do helicoidal. Para regiões turbulentas o valor do fator de atrito será constante e definido com base no diagrama de Moody.

O item 6, densidade no anular ( $\rho_a$ ), é definido pela Equação 4.24 (GHAURI, 2014):

$$\rho_a = \frac{\rho_{res}q_{res} + \rho_d q_{pump}}{q_{pump} + q_{res}} \quad \text{Equação 4.24}$$

As demais variáveis apresentadas até aqui e não descritas por equações foram consideradas constante e constam na Tabela 7. Considerando as equações e constantes disponíveis é possível simular o comportamento da pressão anular de fundo, o fenômeno

*kick* e o fenômeno de perda de circulação. A modelagem proposta não prevê a expansão do gás ao longo do anular e as consequências deste fenômeno.

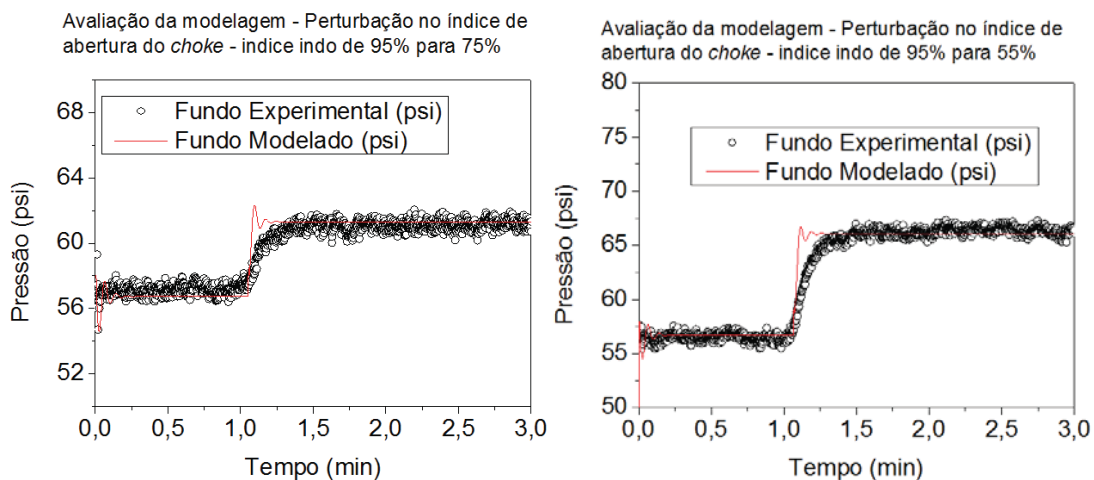
Para a simulação de testes regulatório foi necessário modelar a variação do nível do tanque de retorno, o balanço de massa do tanque de retorno foi desenvolvido e é apresentado pela Equação 4.25, onde  $A$  é a área da seção transversal do tanque de retorno.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(\rho_a q_c + \rho_{res} q_{res} - \rho_d q_{pump})}{A \cdot \rho_d} \quad \text{Equação 4.25}$$

A simulação do modelo matemático permite avaliar variáveis que não são lidas na unidade experimental pela falta de instrumentação, situações de risco como operação em elevadas pressões, distúrbios como conexão de tubos, aumento de taxa de penetração, *kick*, perda de circulação e o comportamento da planta experimental se esta tivesse dimensões diferentes. Por exemplo, se a unidade tivesse 500 metros de anular helicoidal ao invés de 343 metros, qual seria o comportamento das variáveis?

#### 4.4.1 Validação do modelo matemático

A Figura 70 compara o comportamento do modelo fenomenológico com os da planta. Emprega-se uma vazão de 2 m<sup>3</sup>/h e no instante de tempo igual a 1 minuto, o índice de abertura da válvula *choke* passa de 95% para: 75%, 55%, 40% e 25%. Pode ser observada uma velocidade de resposta ligeiramente superior do modelo em relação à resposta experimental. Isso pode ser causado porque algumas dinâmicas (atrasos) presentes na unidade experimental não são previstas pelo modelo, por exemplo, a dinâmica de fechamento da válvula *choke*. Enquanto na unidade experimental a válvula fecha com alguns segundos, no modelo a variação acontece instantaneamente.





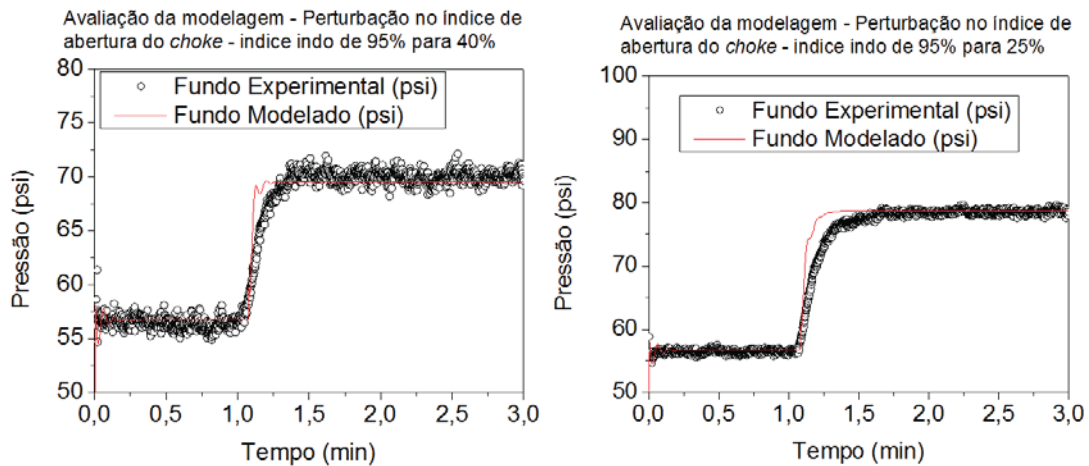


Figura 70 – Comparação: modelagem e experimental frente a uma perturbação na abertura do *choke*. Fonte: O autor.

Avaliou-se o comportamento da simulação do poço frente à perturbação *kick* de gás. Os testes foram conduzidos com a bomba em 20 Hz e empregando-se uma diferença de pressão anular/reservatório de 10, 20 e 30 psi. No instante de tempo igual à 1,5 minutos alterou-se o índice de abertura da válvula de permeabilidade de 30%, 40% e 50%, para retratar diferentes permeabilidades da matriz rochosa. A abertura da válvula de permeabilidade provoca a entrada de gás pressurizado (*kick* de gás) do reservatório no anular. Resultados típicos são apresentados na Figura 71, onde compara-se os resultados simulados com os encontrados experimentalmente. Todos os resultados estão disponíveis no ANEXO I.

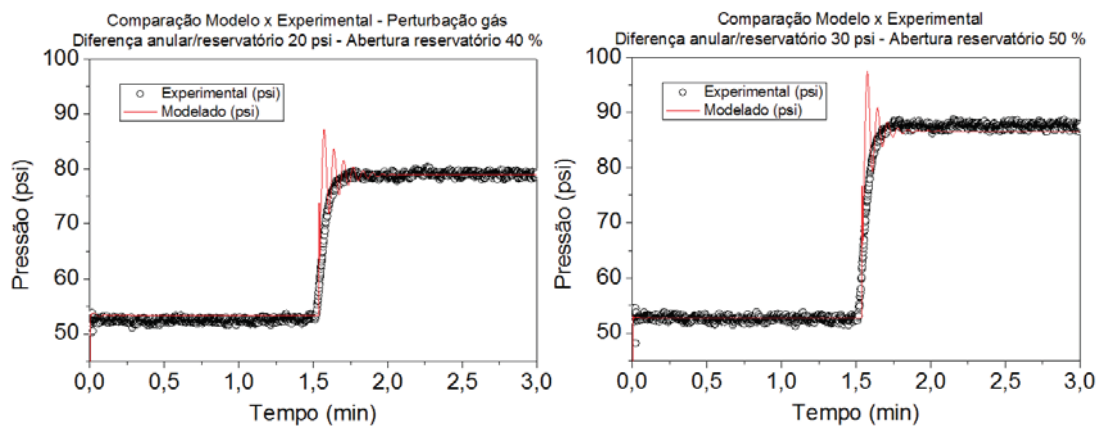


Figura 71 Comparação: modelagem e experimental frente a um *kick* de gás (perturbação). Fonte: O autor.

O modelo matemático representou o comportamento do poço adequadamente, apesar de não levar em consideração fenômenos como a expansão do gás. Novamente observa-se que o modelo matemático apresenta uma dinâmica mais rápida e modos oscilatórios

#### 4.4.2 Simulação de testes servo e regulatório usando o modelo matemático

Implementou-se um controlador *feedback* PI acoplado ao modelo fenomenológico para controlar a pressão anular de fundo empregando como variável manipulada a variação do índice de abertura da válvula *choke*. A simulação do teste servo da Figura 72 é um resultado típico usando parâmetros  $K_c = -2,5 \cdot 10^{-3}$  e  $\tau_I = 0.2$ . O valor do ganho foi de uma ordem de grandeza menor que o encontrado experimentalmente. O comportamento simulado foi mais agressivo devido ao não modelamento de atrasos inerentes à planta experimental, sendo assim foi necessário a redução do parâmetro ganho ( $K_c$ ) para obter um controlador estável.

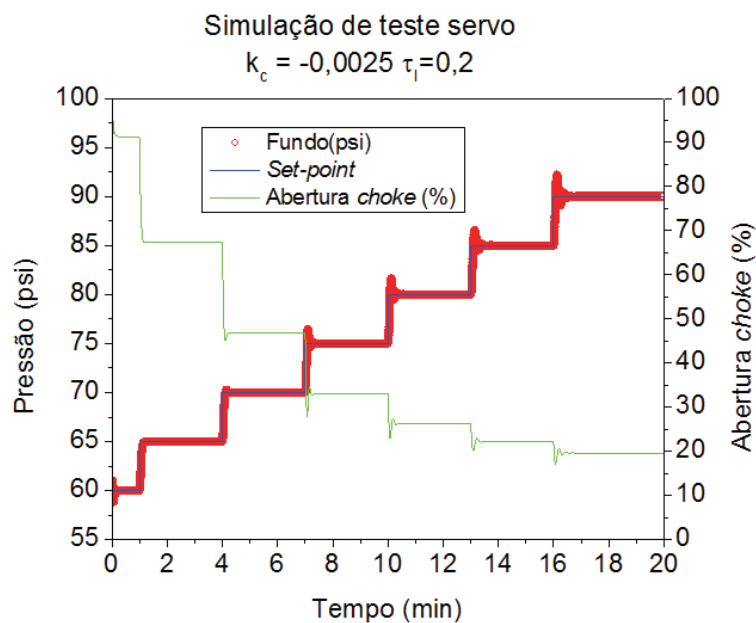


Figura 72 – Simulação de teste servo. Fonte: O autor.

Testes regulatório foram realizados, assim como nos testes experimentais ( Itens 4.1.4 e 4.2.3), avaliando-se duas estratégias de controle: *Feedback* e reconfiguração de controle *feedback*↔*feedforward*. Os critérios e métodos de implementação da simulação de cada estratégia foram iguais aos dos testes experimentais, excetuando-se apenas os parâmetros do controlador, sendo para controle *feedback* ( $K_c = -5 \cdot 10^{-3}$  e  $\tau_I = 0.2$ ) e para *feedforward* ( $K_I = -20$  e  $K_P = 20$ ). As simulações para a estratégia *feedback* são apresentadas pela Figura 73, e simulações em outras diferenças de pressão anular/reservatório e em outras aberturas da válvula reservatório são encontradas no ANEXO I.

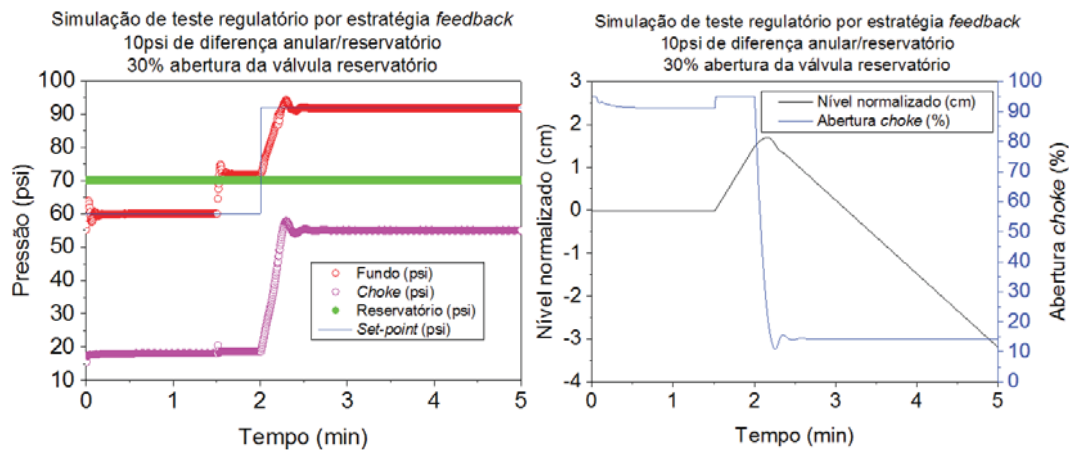


Figura 73 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor.

Nota-se pelo gráfico de nível que houve invasão de fluido de perfuração no reservatório, ou seja, na simulação acontece o mesmo comportamento dos testes experimentais (Figura 51) onde é difícil encontrar a melhor pressão para controle do *kick* de gás. Em uma das simulações não foi possível controlar o *kick* de gás devido à má definição do novo *set-point* para controle do *kick* de gás (), o que demonstra a ineficiência da estratégia *feedback*.

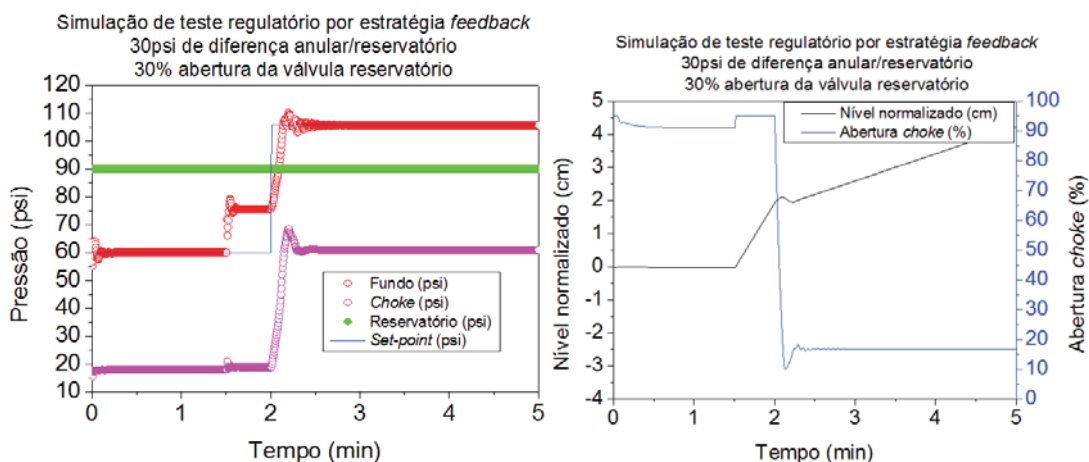


Figura 74 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor.

As simulações dos testes regulatório por reconfiguração da lei de controle também apresentaram comportamento análogo ao experimental (Figura 66). Foi possível controlar o *kick* de gás de forma rápida e eficiente, encontrando a pressão anular de fundo aprisionada dentro da janela operacional, minimizando a perda de circulação consideravelmente. A Figura 75 apresenta um resultado típico, sendo as demais simulações apresentadas no ANEXO I.

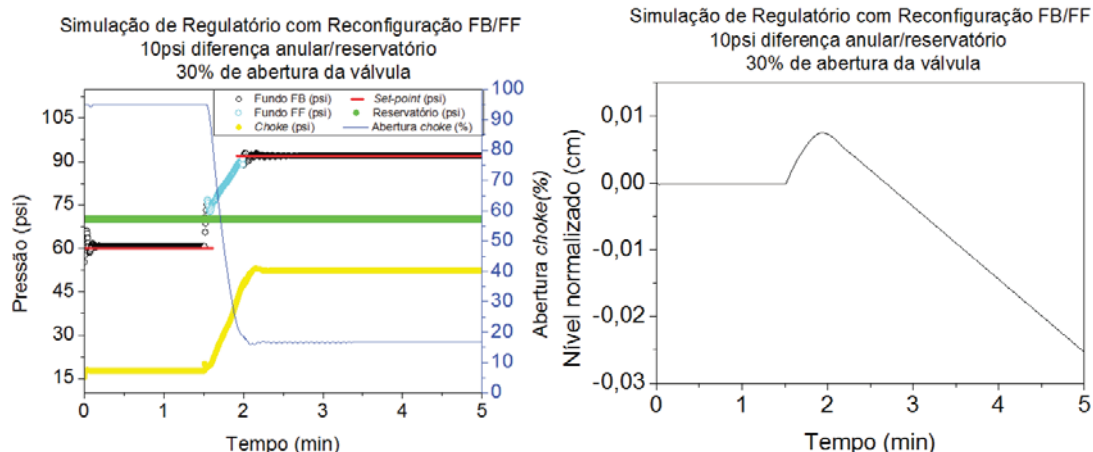


Figura 75 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

Vale ressaltar que a diferença na variação do nível entre as duas estratégias de controle (*feedback* e reconfiguração) é notável, sendo a reconfiguração a que apresenta as menores variações no nível, por estimar de forma mais eficiente o valor da pressão anular de fundo que rejeite o *kick* de gás e concomitantemente evite a perda de circulação (novo *set-point*). Nas simulações com 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório e para as aberturas de 40% e 50% há a presença de ruído quando a estratégia de controle passa de *feedforward* para *feedback*, conforme apresentado pela Figura 76.

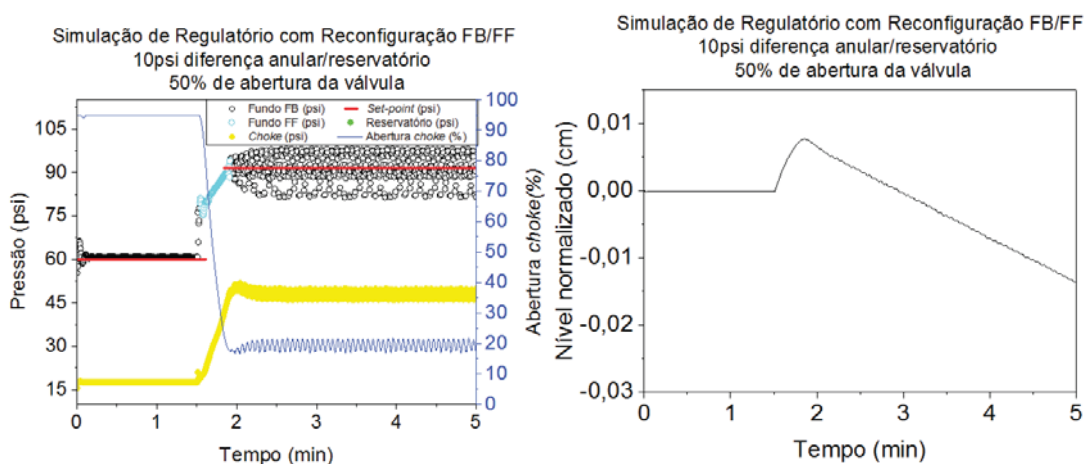


Figura 76 - – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

O comportamento é característico de controladores *feedback* com altos valores do parâmetro  $K_c$ , logo o decréscimo desta variável diminuiria o comportamento.

## 5 CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi estudado o controle do *kick* de gás através das estratégias de controle *feedback* e por reconfiguração via simulação e experimentalmente.

### 5.1 Conclusões

#### 5.1.1 Conclusões sobre a estratégia *feedback*

A dificuldade em definir um *set-point* de pressão que controle o *kick* de gás sem que haja perda de circulação, tornou difícil manter a pressão anular de fundo dentro da janela operacional na unidade experimental. Sendo assim, em grande parte dos testes com estratégia *feedback* houve perda de circulação.

Percebeu-se uma dificuldade maior de controlar o *kick* de gás durante os testes com menores aberturas da válvula reservatório. O fato pode estar relacionado à perda de carga adicionada pela abertura da válvula reservatório para cada fluido. A perda de carga depende da densidade e da viscosidade do fluido. Sendo assim, quando a válvula reservatório se posiciona em menores índices de abertura, dificulta a entrada de fluido de perfuração no anular, mas não dificulta na mesma magnitude a saída do gás em direção ao anular.

Conclui-se ainda que quanto maior a diferença de pressão anular/reservatório, mais difícil foi o controle do *kick* de gás.

#### 5.1.2 Conclusões sobre a estratégia de reconfiguração de controle

A estratégia por reconfiguração foi eficiente, controlando o *kick* de gás e assegurando uma pressão anular de fundo dentro da janela operacional. Sendo assim, não foi observada perda de circulação considerável após o controle do *kick* de gás, como aconteceu na estratégia *feedback*.

Na estratégia por reconfiguração foi possível controlar o *kick* de gás com até 25 psi de diferença de pressão sem saturar a variável manipulada, diferentemente da estratégia *feedback*, onde foi possível o controle apenas até 20 psi. Conclui-se que o fato deriva da:

- Rapidez em que o *kick* foi detectado nesta estratégia, aproximadamente 0,15 minutos do início da perturbação, contra 0,5 minutos na estratégia *feedback*;
- Atuação rápida da variável manipulada, por trabalhar conforme a magnitude da perturbação.

De um modo geral, percebe-se que independente da diferença de pressão anular/reservatório, a demora na identificação e contenção do *kick* dificulta o controle do poço.

### 5.1.3 Conclusões sobre a modelagem

A modelagem foi capaz de representar o comportamento da pressão anular de fundo frente à variação no índice de abertura da válvula *choke*.

As simulações implementando um controlador *feedback* PI foram satisfatórios e mostraram fidelidade ao comportamento da unidade experimental, controlando o poço utilizando parâmetros do controlador próximos dos utilizados experimentalmente.

As simulações com fluxo bifásico (gás e fluido de perfuração) apresentaram concordância com os experimentos conduzidos na unidade.

Foi possível a implementação de um controlador *feedback* no modelo matemático que atuou no sistema de forma bastante semelhante ao experimental (teste servo).

Além disso, simularam-se ambas as estratégias para o controle de *kick* de gás propostas: *Feedback* e reconfiguração da lei de controle *feedback* ↔ *feedforward*. As duas estratégias apresentaram comportamento parecido com o encontrado experimentalmente, sendo a estratégia por reconfiguração a mais eficiente para rejeitar o *kick* de gás por não provocar a perda de circulação.

## 5.2 Trabalhos futuros

Podem ser citados algumas alterações para aprimoramento da unidade experimental e do modelo fenomenológico:

### 5.2.1 Mudanças estruturais no sistema helicoidal

A instalação de um *de-gasser* (purga para gás) na linha, para minimizar as perturbações lidas pelo sensor de nível na chegada do gás ao tanque de retorno, .

A instalação de um sensor de vazão para gás na saída do reservatório possibilitaria avaliar a expansão do gás nos testes regulatório com perturbação degrau, comparando o volume injetado e a variação do volume do tanque de nível. Assim como, possibilitaria uma avaliação crítica da modelagem, pelo conhecimento do comportamento real de variáveis que são simuladas.

### **5.2.2 Testes regulatório:**

Efetuar testes regulatório de rejeição de perda de circulação e rejeição de *kick*: causar uma perda de circulação em um ponto do anular, provocando uma queda de pressão seguido de uma perturbação na forma de *kick*. O teste avaliaria o controlador sob uma situação de perda de circulação e *kick*, situação recorrente na perfuração.

### **5.2.3 Modelagem:**

Implementar equações que modelem a expansão do gás, sua ascensão pelo anular e o tempo de residência do gás no anular, apresentando um caráter distribuído, porém cujo tempo computacional requerido não seja proibitivo para o uso de estratégias de controle.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AHMED, M. A.; HEGAB, O. A.; SABRY, a., Early detection enhancement of the *kick* and near-balance drilling using mud logging warning sign, **Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences**, doi: 10.1016/j.ejbas.2015.09.006, 2015.

ANP, **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**: Boletim Mensal do Gás Natural, 2011. Disponível em: <www.anp.gov.br> Acesso em: 23/08/2015 19:23.

AVELAR, C. S.; RIBEIRO, P. R.; SEPEHRNOORI, K., Deepwater gas *kick* simulation, **J. of Petroleum Science and Engineering**, v. 67, p. 13-22, 2009.

BUTCHER, J.C., **The numerical analysis of ordinary differential equations**: RungeKutta and general linear methods. Wiley-Interscience, New York, NY, USA, 1987.

CALADO, T. C.; CARVALHO NETO, H. S.; SOTOMAYOR, O. A. Z., MPC baseado em Múltiplos Modelos Lineares para Controle de Poços em Operações de Perfuração com Pressão Controlada, **6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (PDPETRO)**, 2011.

CARLSEN, L. A.; NYGAARD, G.; NIKOLAOU, M., Evaluation of control methods for drilling operations with unexpected gas influx, **J. of Process Control**, v. 23, p. 306–316, 2013.

COHEN, G.H.; COON, G.A., Theoretical considerations of retarded control, **Transactions of the ASME**, p. 827-834, 1953.

DUTRA, J. C. S. **Controle de processos baseado em esquemas de reconfiguração**, Tese Doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2012.



- FENG, J; FU, J; CHEN, P; LIU, Z; WEI, H, Predicting pressure behavior during dynamic kill drilling with a two-phase flow, **J. of Natural Gas Science and Engineering**, v. 22, p. 591-597, 2015.
- FREITAS, M. G., **Controle da pressão anular de fundo durante a perfuração de poços de petróleo**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/ UFRRJ, Seropédica, 2013.
- FU, J; SU, Y.; JIANG, W.; XU, L., Development and testing of *kick* detection system at mud line in deepwater drilling, **J. of Petroleum Sci. and Eng.**, V. 135, p. 452-460, 2015.
- GALVES, L. V. Impact of gas solubility on *kick* detection in n-paraffin, **ENAHPE**, Teresópolis, 2013.
- GHAURI, A. A., **Use of the AUSMV scheme for simulation of gas migration, bullheading and Pressurized Mud Cap Drilling**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciência e Tecnologia, University of Stavanger, 2014.
- GODHAVN, J. M.; PAVLOV, A.; KAASA, G. O.; ROLLAND, N. L., Drilling seeking automatic control solutions, **18th IFAC World Congress**, Milano, 2011.
- GRACE, R. D., **Blowout and Well Control Handbook**, Elsevier Science, 2003.
- HAUGE, E.; AAMO, O. M.; GODHAVN, J. M.; NYGAARD, G.. A novel model based scheme for *kick* and loss mitigation during drilling. **J. of Process Control**, v. 23, pg. 463-472, 2013.
- JUNIOR, J. A. R.; LACHTER E. R.; NASCIMENTO R. S. V., Novos aditivos poliméricos multifuncionais para fluidos de base aquosa a serem utilizados na perfuração de poços de grande afastamento horizontal em águas ultraprofundas, **Boletim técnico da Produção de Petróleo**, v. 2, Rio de Janeiro, 2007.

KAASA, O-G. A Simple Dynamic Model of Drilling for Control. **Technical Report**. StatoilHydro Research Centre Porsgrunn, 2007.

LAGE, A. C. V. M. **Two-Phase Flow Models and Experiments for Low-Head and Underbalanced Drilling**. Tese doutorado, Stavanger University College, 2000.

LIMA, H. Controle de poço submarino, Macaé, **wellcap/iadc**, 2006.

LUYBEN, W. L., **Process modeling, simulation and control for chemical engineers**, 2<sup>a</sup> ed, McGraw-Hill, 1996.

MCCANN, R. C.; ISLAS, C. G., Frictional pressure loss during turbulent flow in coiled tubing, **SPE**, 36345, 2006.

MENG, Y.; XU, C.; WEI, N.; LI, G.; LI, H.; DUAN, M., Numerical simulation and experiment of the annular pressure variation caused by gas *kick*/injection in wells, **J of Natural Gas Science and Engineering**, v. 22, p. 646-655, 2015.

MILLERO, F. J.; HUANG, F., The compressibility of seawater from 0 to 95 °C at 1 atm, **Marine Chemistry**, v.126, p. 149-154, 2011.

MITCHELL, R. F., MISKA, S. Z., Fundamentals of drilling engineering, **SPE Text Book Series**, No. 12, 2011.

NAYEEM, A. A.; VENKATESAN R.; KHAN, F., Monitoring of down-hole parameters for early *kick* detection, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 40, p. 43-54, 2016

NYGAARD, G.; NAEVDAL, G., Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling, **J. of Process Control**, v. 16, p. 719-732, 2006.

OGATA, K., **Modern control engineer**, 5<sup>o</sup> ed., Prentice Hall, Minnesota, 2009.

OLIVEIRA, G. E.; GALDINO, J. F.; FRANCO, A. T.; NEGRÃO, C. O. R.; MARTINS, A. L., Pressure propagation in drilling fluids during a *kick* of gas, **ENAHPE**, Teresópolis, 2013.

OMEL. **Rotâmetros**. 2016. Disponível em: <<http://www.omel.com.br/nossos-produtos/rotametros/>>. Acesso em: 08/06/2016.

PLANETFORLIFE, **How to Control a Deepwater Oil well**. 2010. Disponível em: <[www.planetforlife.com/dwphysics/control.html](http://www.planetforlife.com/dwphysics/control.html)>. Acesso em: 07/04/2016.

REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M., POLING, B. E., **The properties of gases and liquids**, 4<sup>o</sup> ed., McGraw-Hill, 2000.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T., **Projeto de poços de petróleo: Geopressões e Assentamento de Colunas de Revestimento**, 2<sup>o</sup> ed., Interciência, Rio de Janeiro, 2009.

RUSSANO, E., **Controle de perda de circulação durante a perfuração de poços de petróleo**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/ UFRRJ. Seropédica, 2014.

SANTOS, O. L. A., **Segurança de poço na perfuração**, Edgar Blücher, São Paulo, 2014.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, **Anal. Chem.**, v. 36, p. 1627-1639, 1964.

SEBORG, D., E.; EDGAR, T., F.; MELLICHAMP, D., A.; DOYLE, F., J., **Process, dynamics and control**, 3<sup>o</sup> ed., Wiley, 2011.

SIRINIVASAN, R.; QIAN, M. S., Online fault diagnosis and state identification during process transitions using dynamics locus analysis, **Chemical engineering science**, v. 61, p. 6109-6132, 2006.

SRINIVASAN, P. S.; NANDAPURKAR, F. A.; HOLLAND, F. A., Friction Factors for Coils, **Trans. Instn. Chem. Engrs.**, v. 48, p. T156-T161, 1970.

STAMNES, Ø. N.; ZHOU, J.; KAASA, G. O.; AAMO, O. M.. Adaptative Observer Design for the Bottonhole Pressure of a Managed Pressure Drilling System. **47<sup>o</sup>IEEE Conference on Decision and Control**, pg. 2961-2966, 2008.

STEFFEN, T. **Control Reconfiguration of Dynamical Systems**, Springer, 2005.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1984.

SUNDARESAN, K. R.; KRISHNASWANY P. R., Estimation of time delay time constant parameters in time, frequency, and Laplace domains, **J. Chem. Eng.**, v. 56, 1977.

TELAS, F. A., Operador de sonda de perfuração: Controle de poços, **Prominp**, Petrobras, Mossoro, 2008.

THOMAS, J. E., **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, 2<sup>o</sup> ed., Interciência, 2004

SCHWARTZ, J., **Marking 4 years since the BP Deepwater Horizon blowouts**, 2014. Disponível em: <[greenpeaceblogs.org/2014/04/19/marking-4-years-since-bp-deepwater-horizon-blowout/](http://greenpeaceblogs.org/2014/04/19/marking-4-years-since-bp-deepwater-horizon-blowout/)>. Acesso em: 07/04/2016.

VAJARGAH, A. K.; van OORT, E., Early *kick* detection and well control decision making for managed pressure drilling automation, **J. of Natural Gas Science and Engineering**, v. 27, p. 354e366, 2015.

VALDMAN, B.; FOLLY, R.; SALGADO, A., **Dinâmica, controle e instrumentação de processos**, UFRJ, Rio de janeiro, 2008.

VIEIRA, F. R. B., **Controle da pressão anular de fundo durante a perfuração de poços de petróleo - rejeição de perturbação: kick de líquido**. Dissertação de

Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/ UFRRJ. Seropédica, 2009.

WALDMANN, A.; ANDRADE, A.R.; MARTINS A.L.; LOMBA, R.F.T.; ARAGÃO, A.F.L, Sobre os mecanismos responsáveis por minimizar a invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório, **ENAHPE**, Pedra Azul, 2006.

WANG, Z.; SUN, B., Deepwater gas *kick* simulation with consideration of the gas hydrate phase transition, **J. of Hydrodynamics**, v. 26, p. 94-103, 2014.

WATSON, J. **Kick Theory**, 2015. Disponível em:  
<[www.drillinghandbook.com/category/kick-theory/](http://www.drillinghandbook.com/category/kick-theory/)> Acesso em:25/02/2016.

WENJUN, S.; SHIXIAN, T.; FAN, F.; WEIMIN, Y.; ZHITAO, Z.. Research on the Drilling Fluid Technology for High Temperature over 240oC. **Procedia Engineering**, v. 73, 2014.

ZAKHAROVA, A.; ZATTONI E.; YUA, M.; JÄMSÄ-JOUNELAA, S., A performance optimization algorithm for controller reconfiguration in fault tolerant distributed model predictive control, **J. of Process Control**, v. 34, p. 56–69, 2015.

ZHANG, Y.; JIANG, J., Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, **Annual reviews in control**, v. 32, p. 229-252, 2008.

ZHOU, J.; NYGAARD, G., Automatic model-based control scheme for stabilizing pressure during dual-gradient drilling, **J of Process Control**, v. 21, p. 1138–1147, 2011.

ZHOU, J.; STAMNES, Ø. N.; AAMO, O. M; KAASA, G., Switched Control for Pressure Regulation and *Kick* Attenuation in a Managed Pressure Drilling System, **IEEE Transactions on control systems technology**, v. 19, n. 2, 2011.

ZIEGLER, J. G. NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. **Transactions of the A.S.M.E.**, V. 64, p. 759-768, 1942.

## 7 APÊNDICE

Projeto helicoidal:

A unidade helicoidal necessitava atender a várias características como:

1. Extensão de anular considerável, para que houvesse tempo para controlar a entrada de gás no anular; semelhança com o sistema de perfuração real;
2. Alta perda de carga entre o ponto de fundo e a válvula *choke*;
3. Utilização de materiais que aguentassem fluidos abrasivos, assim como são os fluidos de perfuração;
4. Sensoriamento adequado e dentro de um orçamento;
5. Estrutura segura;
6. Sistema de automação e potência eficientes.

A mangueira deveria ficar sempre ascendente, para evitar o aprisionamento do gás ao longo do escoamento, por isso a configuração em helicoidal foi utilizada. O local disponibilizado para instalação do anular helicoidal era de 1 m<sup>2</sup> e 6 m de altura. Inicialmente pensou-se em utilizar uma mangueira de 2” a fim de diminuir a velocidade do fluido pela grande área da seção transversal, porém um diâmetro menor permite a utilização de um maior comprimento de mangueira. Levou-se em conta um diâmetro de 0,8 metros para a serpentina e um espaçamento mínimo entre as voltas da helicoidal para o cálculo do comprimento máximo. Considerando o espaço para instalação da estrutura e a verba disponível para compra: da mangueira, da estrutura para suporte e das conexões hidráulicas, calculou-se a quantidade máxima possível de mangueira de vários diâmetros. Com o mesmo valor gasto para comprar toda a estrutura, conexões e 200 metros de mangueira de 2” conseguiríamos comprar 392 metros de mangueira de 1” com suas respectivas conexões. Porém a limitação de espaço possibilita a instalação de apenas 343 metros de mangueira de 1”. Para ½” de diâmetro, seria possível instalar 440 metros de mangueira.

Para definir qual dos diâmetros utilizar impôs-se uma situação de fluxo e calculou-se a diferença de pressão entre a entrada e saída da helicoidal (perda de carga). A perda de carga é altamente influenciada pelo diâmetro da tubulação. Para estudar a expansão do gás durante o *kick* é necessária a existência de uma perda de carga considerável entre o ponto de entrada do gás (fundo do poço) e o topo do poço (antes do *choke*). Sendo assim, utilizou-se a equação de Bernoulli para calcular as pressões para 2”, 1” e ½”. Para cálculo de perda de carga utilizou-se

as equações de: Fanning para Reynolds até 2100 e Blásius para Reynolds de 2101 até 20000. Para a parte em helicoidal do sistema hidráulico, utilizou-se a equação descrita por Srinivasan, Nandapurkar & Holland (1970) *apud* McCann & Islas (1996). Os resultados para diversas vazões aparecem na Tabela 8.

Tabela 8 – Simulação da pressão para diversos diâmetros para projeto do helicoidal.

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	½"		1"		2"	
	Pressão no fundo (psi)	Pressão no <i>choke</i> (psi)	Pressão no fundo (psi)	Pressão no <i>choke</i> (psi)	Pressão no fundo (psi)	Pressão no <i>choke</i> (psi)
1,46	642,25	10,44	37,46	9,32	18,25	9,36
1,51	681,23	10,50	38,69	9,32	18,27	9,37
2,04	1157,45	11,23	53,70	9,33	18,62	9,42
2,43	1578,82	11,83	66,98	9,34	18,93	9,46
2,82	2057,96	12,48	82,06	9,34	19,28	9,51
3,12	2464,75	13,02	94,87	9,35	19,58	9,55
3,38	2843,61	13,50	106,80	9,35	19,85	9,58

Fonte: O autor.

Claramente o diâmetro ½" parece mais interessante para os estudos de expansão, por apresentar uma maior diferença de pressão entre o fundo e o *choke*. Porém, a pressão máxima que a bomba pode atingir é 170 psi, as conexões aguentam no máximo 300 psi e o sistema pneumático disponível mantem estável pressões de no máximo 120 psi.

Para uma melhor definição de qual diâmetro utilizar era necessário saber qual o tempo de controle do fenômeno *kick* que cada diâmetro e respectivo comprimento de mangueira forneceria. Para isso era preciso determinar a vazão do gás em diversas situações de *kick* de gás. Utilizou-se um rotâmetro (Figura 77) que ligava o tanque de pressão ao ambiente (pressão atmosférica). Pressurizou-se o tanque reservatório em 10, 20 e 30 psi acima da pressão atmosférica e abriu-se a válvula reservatório em diversas porcentagens. A Tabela 9 mostra os resultados encontrados.



Figura 77 – Rotâmetro. Fonte: Omel, 2016.

Tabela 9- Vazão máxima de gás para diversas diferenças de pressão (reservatório/ambiente) e diversas aberturas da válvula reservatório.

	Percentual de abertura da válvula reservatório					
	30 %	33 %	35 %	37 %	40 %	43 %
10 psi	-	Instável	2,7 m <sup>3</sup> /h	3,9 m <sup>3</sup> /h	5,5 m <sup>3</sup> /h	7,3 m <sup>3</sup> /h
20 psi	Instável	2,2 m <sup>3</sup> /h	3,6 m <sup>3</sup> /h	4,9 m <sup>3</sup> /h	7,1 m <sup>3</sup> /h	-
30 psi	2,0 m <sup>3</sup> /h	2,4 m <sup>3</sup> /h	4,0 m <sup>3</sup> /h	5,8 m <sup>3</sup> /h	8,1 m <sup>3</sup> /h	-

Fonte: O autor.

Considerando a vazão de gás constante, calculou-se o tempo que o gás demoraria para atingir o topo do helicoidal, para os diferentes diâmetros (Tabela 10).

O diâmetro de 2" é o mais interessante em termos de tempo de controle, porém a perda de carga apresentada por este diâmetro é insignificante. Pautado por estas razões optou-se pelo uso da mangueira de 1", a qual tem um tempo de controle heurísticamente aceitável e uma perda de carga considerável.

Para suportar o anular helicoidal, uma estrutura firme e segura era necessária. A estrutura deveria estar dentro do orçamento, não prejudicando a compra da mangueira e suas conexões. Sendo assim, optou-se pela compra de andaimes, pois estes são baratos e de fácil montagem, podendo ser soldados um a um até a altura que a unidade deveria tomar. Para uma maior segurança, pensou-se em fixar as bases da estrutura no chão com parafusos, e ainda, prender a estrutura à parede em diversos pontos.



Tabela 10 - Tempo (s) que o gás demoraria para atingir o topo do helicoidal para diferentes percentuais de abertura e diferentes vazões.

1/2"	Percentual de abertura da válvula reservatório					
	30 %	33 %	35 %	37 %	40 %	43 %
10 psi	-	-	74,32	51,45	36,48	27,49
20 psi	-	91,21	55,74	40,95	28,26	-
30 psi	100,33	83,61	50,16	34,60	24,77	-

1"	Percentual de abertura da válvula reservatório					
	30 %	33 %	35 %	37 %	40 %	43 %
10 psi	-	-	231,73	160,43	113,76	85,71
20 psi	-	284,40	173,80	127,69	88,12	-
30 psi	312,84	260,70	156,42	107,88	77,24	-

2"	Percentual de abertura da válvula reservatório					
	30 %	33 %	35 %	37 %	40 %	43 %
10 psi	-	-	540,49	374,18	265,33	199,91
20 psi	-	663,33	405,37	297,82	205,54	0
30 psi	729,66	608,05	364,83	251,61	180,16	0

Fonte: O autor.

Como o foco deste trabalho é, principalmente, o controle do *kick* de gás por diferentes estratégias de controle, é primordial que se aumente o comprimento da mangueira para que o controlador tenha tempo hábil para controlar o *kick* de gás. Sendo o espaço para instalação da mangueira limitado (1m x 1m x 6m), a distância entre as espiras da helicoidal deve ser o menor possível, possibilitando a instalação da maior quantidade possível de mangueira. A mangueira será fixada, por abraçadeiras em “u”, em barras chatas furadas. As barras estarão soldadas à estrutura (andaime).

A mangueira deve ser instalada de forma sempre ascendente. Assim, o gás, ao entrar no anular, tenderia sempre a subir e não ficaria enclausurado em qualquer lombada da mangueira, reproduzindo com fidelidade o comportamento da perfuração real.

Testes foram realizados na unidade utilizada por Russano (2014), para estudar o comportamento do anular quando da ocorrência do *kick* de gás. Várias situações foram propostas e estudadas:

Caso 1: Com 1,5 minutos de teste, acontece a entrada de gás tipo pulso de 2, 6 e 10 segundos, com várias porcentagens de abertura da válvula reservatório (20%, 30%, 40% e 50%). Após o fim do pulso, a bomba era desligada e o poço era fechado. Um resultado típico é apresentado na Figura 78.

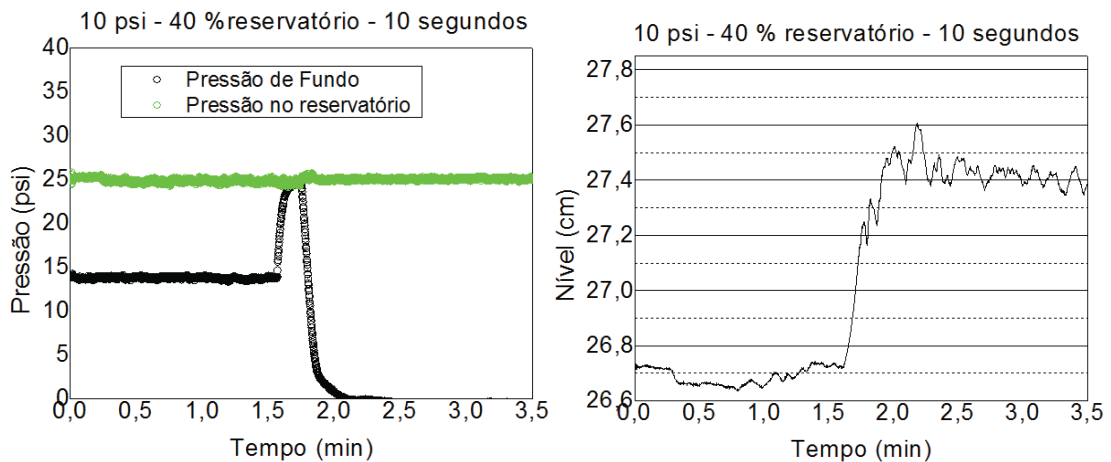


Figura 78 - Resultado típico do Caso 1 realizado na unidade utilizada por Russano (2104).  
Fonte: O autor.

Através do Caso 1 pode-se observar se a entrada de gás poderia ser percebida avaliando a variação de nível. Pode-se observar ainda, a dinâmica da pressão anular de fundo e do nível, quando acontece a perturbação. Nos testes com 20%, notou-se que não acontecia a entrada de gás, logo, fez-se um estudo de qual a abertura mínima para que o gás saísse. Testes foram realizados com 10, 20 e 30 psi de diferença de pressão entre o anular e o reservatório. Um resultado típico é apresentado na Figura 79.

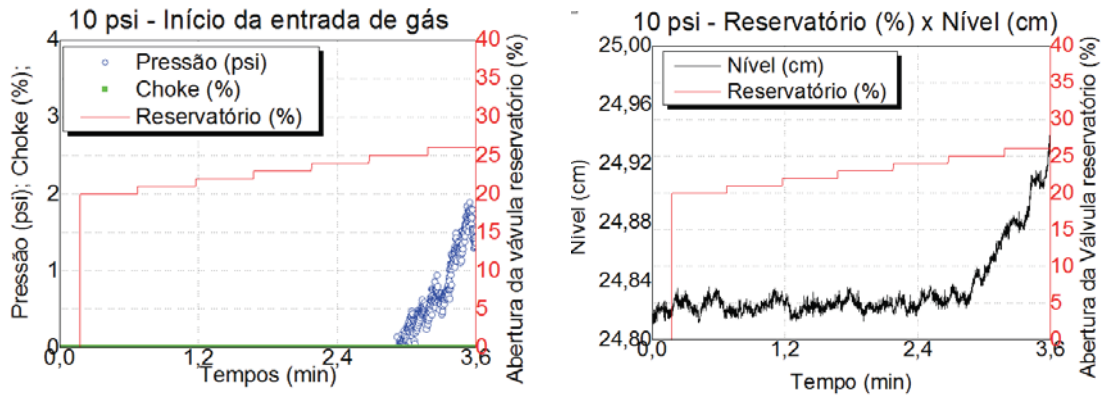


Figura 79 – Avaliação da válvula reservatório. Fonte: O autor.

Notou-se que o gás começa a passar pela válvula reservatório quando esta está em 25% de abertura.

Caso 2: Entrada de gás tipo pulso de 2, 6 e 10 segundos, com várias porcentagens de abertura da válvula reservatório (25%, 30%, 40% e 50%) e estando o poço fechado. Obviamente não houve captação de nível, visto que o poço estava fechado. Um resultado típico é apresentado na Figura 80.

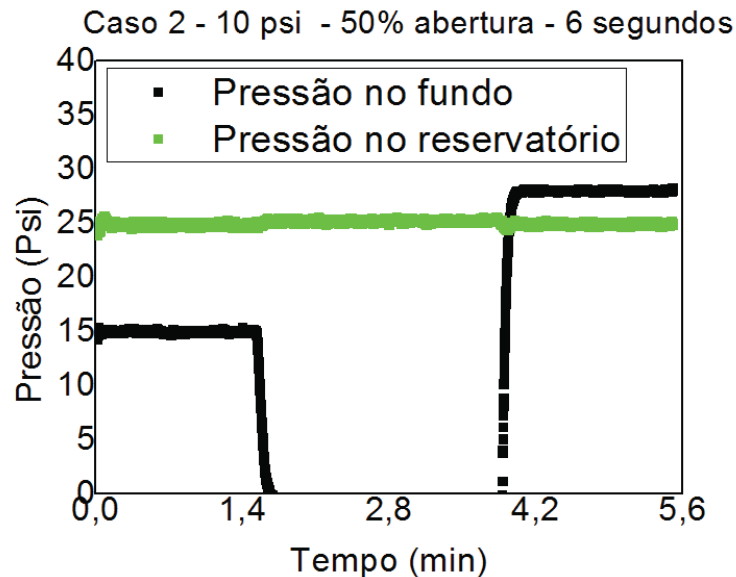


Figura 80 - Resultado típico do Caso 2 realizado na unidade utilizada por Russano (2104).  
Fonte: O autor.

Através do Caso 2 percebeu-se que, após a entrada de gás a pressão era mantida, quando o poço se encontrava fechado. Dependendo da extensão do pulso de gás a pressão não atinge sua pressão máxima.

Caso 3: Entrada de gás tipo degrau, com várias porcentagens de abertura da válvula reservatório (25%, 30%, 40% e 50%) e estando o poço fechado. Obviamente não houve captação de nível, visto que o poço estava fechado. Um resultado típico é apresentado na Figura 81.

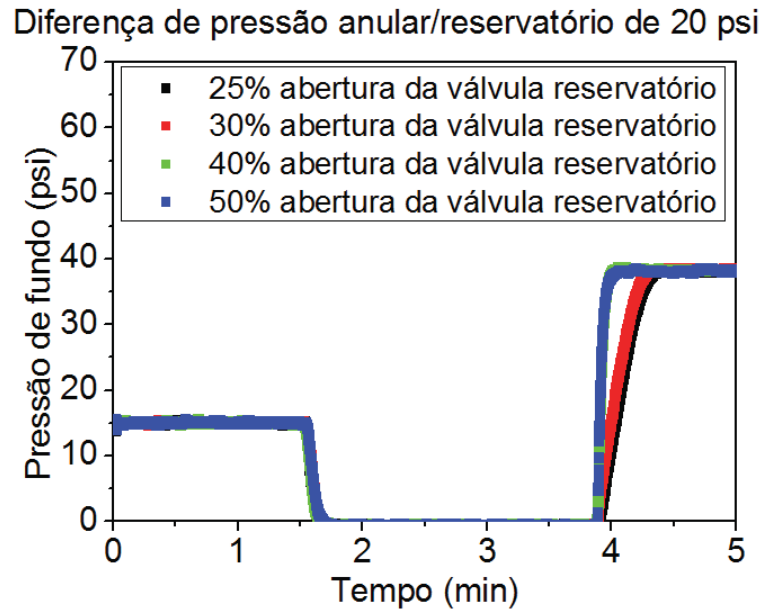


Figura 81 – Resultado típico do Caso 3 realizado na unidade utilizada por Russano (2104).  
Fonte: O autor.

Os estudos do Caso 3 tiveram resultados muito semelhantes ao Caso 2. Como os testes eram do tipo degrau, todos os testes atingiam a pressão máxima. Porém, é interessante observar, que o comportamento esperado por Lima (2006), onde, na medida que o gás ascendia pelo helicoidal a pressão sobe, devido ao aumento da pressão hidrostática, não acontece aqui. Pode ser que este fenômeno esteja acontecendo muito rápido.

Considerando o comportamento demonstrado acima calcula-se o percurso feito pelo gás, a posição onde este está, e com isso extrapola-se para saber em quanto tempo este atingirá o tamanho da helicoidal.

ANEXO A

Na Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16, apresenta-se parâmetros de testes feitos em triplicata para identificação do sistema. Tem-se que: PI – Proporcional integral; Kc – Ganho para o controlador PI; Ti – Parâmetro de tempo para controlador PI; ZN – Ziegler-Nichols; CC – Cohen-Coon e td – atraso.

**Parâmetro para controle *feedback*:**

Tabela 11 - Parâmetros da unidade helicoidal pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy e parâmetros do controlador por Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). Sendo a perturbação a variação do índice de abertura da válvula *choke* e a variável controlada a pressão anular de fundo. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz.

Teste	Platô inicial	Platô final	Bu	M	K	tl(min)	t2(min)	td(min)	T(min)	S	ZN PI Kc	ZN PI Ti	CC PI Kc	CC PI Ti
1	56.45	78.76	22.306	-0.70	-31.866	0.123	0.288	0.076	0.110	202.040	-0.040858	0.254141	-0.043473	0.107243
2	56.41	78.84	22.430	-0.70	-32.042	0.122	0.291	0.074	0.113	197.745	-0.043080	0.246263	-0.045681	0.107226
3	56.41	78.84	22.430	-0.70	-32.042	0.122	0.291	0.074	0.113	197.745	-0.043080	0.246263	-0.045681	0.107226
<b>Média</b>	<b>56.42</b>	<b>78.81</b>	<b>22.389</b>	<b>-0.70</b>	<b>-31.984</b>	<b>0.122</b>	<b>0.290</b>	<b>0.075</b>	<b>0.112</b>	<b>199.177</b>	<b>-0.042339</b>	<b>0.248889</b>	<b>-0.044945</b>	<b>0.107232</b>
1	56.43	70.00	13.568	-0.55	-24.668	0.111	0.246	0.073	0.091	149.423	-0.045534	0.242268	-0.048912	0.094205
2	56.46	70.18	13.721	-0.55	-24.947	0.124	0.259	0.086	0.090	152.247	-0.037597	0.287971	-0.040937	0.100858
3	56.44	70.56	14.120	-0.55	-25.672	0.113	0.242	0.076	0.087	162.944	-0.039838	0.253930	-0.043084	0.093571
<b>Média</b>	<b>56.45</b>	<b>70.25</b>	<b>13.803</b>	<b>-0.55</b>	<b>-25.096</b>	<b>0.116</b>	<b>0.249</b>	<b>0.078</b>	<b>0.089</b>	<b>154.871</b>	<b>-0.040990</b>	<b>0.261390</b>	<b>-0.044311</b>	<b>0.096211</b>
1	56.53	66.42	9.899	-0.40	-24.747	0.099	0.226	0.064	0.085	116.626	-0.048437	0.212217	-0.051804	0.085582
2	57.09	66.96	9.872	-0.40	-24.679	0.117	0.263	0.076	0.098	101.028	-0.047048	0.252213	-0.050424	0.099921
3	57.12	67.18	10.062	-0.40	-25.155	0.124	0.362	0.056	0.160	62.972	-0.102537	0.185660	-0.105850	0.108330
<b>Média</b>	<b>56.91</b>	<b>66.86</b>	<b>9.944</b>	<b>-0.40</b>	<b>-24.860</b>	<b>0.113</b>	<b>0.284</b>	<b>0.065</b>	<b>0.114</b>	<b>93.542</b>	<b>-0.066007</b>	<b>0.216697</b>	<b>-0.069359</b>	<b>0.097944</b>
1	57.13	61.31	4.180	-0.20	-20.902	0.103	0.301	0.046	0.133	31.429	-0.123352	0.154608	-0.127339	0.090198
2	57.39	61.47	4.076	-0.20	-20.382	0.082	0.205	0.047	0.082	49.582	-0.076496	0.158034	-0.080584	0.073298
3	57.64	61.58	3.941	-0.20	-19.705	0.123	0.226	0.094	0.069	56.964	-0.033630	0.312883	-0.037859	0.088534
<b>Média</b>	<b>57.39</b>	<b>61.45</b>	<b>4.066</b>	<b>-0.20</b>	<b>-20.329</b>	<b>0.103</b>	<b>0.244</b>	<b>0.063</b>	<b>0.095</b>	<b>45.992</b>	<b>-0.077826</b>	<b>0.208508</b>	<b>-0.081927</b>	<b>0.084010</b>
<b>Média Geral</b>					<b>-25.567</b>	<b>0.114</b>	<b>0.267</b>	<b>0.070</b>	<b>0.103</b>	<b>123.395</b>	<b>-0.056791</b>	<b>0.233871</b>	<b>-0.060136</b>	<b>0.096349</b>

Fonte: O autor.

Tabela 12 - Parâmetros da unidade helicoidal pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy e parâmetros do controlador por Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). Sendo a perturbação a variação do índice de abertura da válvula *choke* e a variável controlada a pressão anular de fundo. Em todos os testes a bomba se encontrava em 25 Hz.

Teste	Platô inicial	Platô final	Bu	M	K	t1(min)	t2(min)	td(min)	T(min)	S	ZN_PI_Kc	ZN_PI_Ti	CC_PI_Kc	CC_PI_Ti
1	81.45	108.13	26.672	-0.70	-38.104	0.131	0.303	0.082	0.116	230.582	-0.033284	0.273355	-0.035471	0.113716
2	81.91	108.38	26.466	-0.70	-37.809	0.120	0.264	0.080	0.096	274.532	-0.028718	0.266097	-0.030922	0.101493
3	82.10	108.88	26.776	-0.70	-38.252	0.123	0.286	0.077	0.110	244.379	-0.033691	0.254802	-0.035870	0.106928
<b>Média</b>	81.82	108.46	26.638	-0.70	-38.055	0.125	0.285	0.080	0.107	249.831	-0.031898	0.264751	-0.034088	0.107379
1	81.98	98.85	16.868	-0.55	-30.670	0.109	0.246	0.071	0.092	184.310	-0.037897	0.235991	-0.040614	0.093548
2	82.38	99.14	16.754	-0.55	-30.462	0.101	0.220	0.068	0.079	211.261	-0.034389	0.226891	-0.037124	0.084776
3	82.76	99.27	16.515	-0.55	-30.028	0.109	0.245	0.071	0.091	181.629	-0.038341	0.236703	-0.041116	0.093330
<b>Média</b>	82.37	99.09	16.713	-0.55	-30.387	0.107	0.237	0.070	0.087	192.400	-0.036876	0.233195	-0.039618	0.090551
1	82.71	94.96	12.251	-0.40	-30.627	0.112	0.240	0.075	0.086	142.775	-0.033403	0.251370	-0.036124	0.092642
2	82.94	95.77	12.838	-0.40	-32.094	0.115	0.229	0.084	0.076	168.444	-0.025588	0.278138	-0.028184	0.089924
3	83.67	96.08	12.413	-0.40	-31.033	0.098	0.236	0.059	0.093	133.702	-0.045994	0.194945	-0.048679	0.086391
<b>Média</b>	83.11	95.61	12.500	-0.40	-31.251	0.108	0.235	0.073	0.085	148.307	-0.034995	0.241484	-0.037662	0.089652
1	84.23	89.04	4.818	-0.20	-24.092	0.076	0.198	0.042	0.082	59.111	-0.073298	0.138343	-0.076757	0.068246
2	83.98	88.69	4.713	-0.20	-23.566	0.093	0.171	0.071	0.053	89.508	-0.028315	0.236501	-0.031851	0.067214
3	84.30	89.48	5.182	-0.20	-25.911	0.070	0.171	0.041	0.068	76.266	-0.057380	0.136970	-0.060596	0.062002
<b>Média</b>	84.17	89.07	4.905	-0.20	-24.523	0.080	0.180	0.051	0.067	74.961	-0.052998	0.170605	-0.056401	0.065821
<b>Média Geral</b>					-31.054	0.105	0.234	0.068	0.087	166.375	-0.039192	0.227509	-0.041942	0.088351

Fonte: O autor.

Tabela 13 - Parâmetros da unidade helicoidal pelo método de Sundaresan-Krishnaswamy e parâmetros do controlador por Ziegler-Nichols (ZN) e Cohen-Coon (CC). Sendo a perturbação a variação do índice de abertura da válvula *choke* e a variável controlada a pressão anular de fundo. Em todos os testes a bomba se encontrava em 30 Hz.

Teste	Platô inicial	Platô final	Bu	M	K	tl(min)	t2(min)	td(min)	T(min)	S	ZN_PI_Kc	ZN_PI_Ti	CC_PI_Kc	CC_PI_Ti
1	107.89	136.20	28.306	-0.70	-40.437	0.119	0.292	0.070	0.116	244.946	-0.036533	0.234436	-0.038594	0.105772
2	108.05	136.78	28.735	-0.70	-41.049	0.122	0.297	0.073	0.117	246.448	-0.034905	0.243878	-0.036935	0.108294
3	108.64	137.93	29.287	-0.70	-41.839	0.123	0.297	0.073	0.117	250.463	-0.034355	0.243812	-0.036346	0.108444
<b>Média</b>	108.19	136.97	28.776	-0.70	-41.108	0.121	0.295	0.072	0.116	247.286	-0.035264	0.240709	-0.037292	0.107503
1	108.64	127.03	18.390	-0.55	-33.436	0.111	0.243	0.074	0.088	208.736	-0.031986	0.246882	-0.034478	0.093352
2	109.08	127.84	18.767	-0.55	-34.121	0.109	0.244	0.071	0.091	207.087	-0.033625	0.236719	-0.036067	0.093156
3	109.44	128.18	18.735	-0.55	-34.064	0.116	0.263	0.074	0.099	189.999	-0.034976	0.248045	-0.037422	0.099695
<b>Média</b>	109.05	127.68	18.631	-0.55	-33.874	0.112	0.250	0.073	0.092	201.941	-0.033529	0.243882	-0.035989	0.095401
1	109.63	124.08	14.452	-0.40	-36.130	0.119	0.270	0.077	0.101	142.958	-0.032880	0.255039	-0.035186	0.102339
2	110.21	124.52	14.304	-0.40	-35.761	0.111	0.248	0.073	0.092	155.753	-0.031820	0.241889	-0.034150	0.094749
3	110.18	124.48	14.301	-0.40	-35.753	0.115	0.273	0.070	0.106	134.539	-0.038263	0.232873	-0.040594	0.100912
<b>Média</b>	110.01	124.36	14.353	-0.40	-35.881	0.115	0.264	0.073	0.100	144.417	-0.034321	0.243267	-0.036643	0.099333
1	110.54	116.73	6.190	-0.20	-30.951	0.083	0.171	0.058	0.059	105.000	-0.029314	0.194743	-0.032006	0.066870
2	110.48	116.95	6.467	-0.20	-32.336	0.090	0.194	0.061	0.070	92.568	-0.032055	0.202002	-0.034632	0.075017
3	110.93	117.41	6.481	-0.20	-32.404	0.100	0.263	0.053	0.110	59.114	-0.057217	0.177215	-0.059788	0.089480
<b>Média</b>	110.65	117.03	6.379	-0.20	-31.897	0.091	0.210	0.057	0.079	85.561	-0.039529	0.191320	-0.042142	0.077122
<b>Média Geral</b>					-35.690	0.110	0.255	0.069	0.097	169.801	-0.035661	0.229794	-0.038017	0.094840

Fonte: O autor.

### Parâmetros para controle *feedforward*:

Tabela 14 - Parâmetros do controlador *feedforward*. Sendo a perturbação a entrada de gás no helicoidal sob diversas aberturas da válvula reservatório. A perturbação é avaliada pela variação do nível do tanque de retorno. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz. A diferença de pressão entre o reservatório e o anular era de **10 psi**.

	Teste	Platô inicial	Platô final	Bu	M	K	t1(min)	t2(min)	td(min)	I(min)	S
30%	1	52.63	64.57	11.935	0.71	16.927	0.078	0.154	0.057	0.051	235.236
	2	53.31	65.15	11.843	0.63	18.945	0.072	0.152	0.049	0.054	218.592
	3	53.55	67.57	14.022	0.69	20.431	0.052	0.108	0.036	0.038	372.462
	<b>Média</b>	53.16	65.76	12.60	0.67	18.768	0.067	0.138	0.047	0.048	275.430
35%	1	60.62	77.33	16.718	4.70	3.559	0.050	0.124	0.030	0.049	339.012
	2	60.61	77.35	16.737	4.58	3.654	0.061	0.148	0.036	0.058	286.936
	3	60.46	78.08	17.619	7.78	2.265	0.062	0.158	0.034	0.065	272.859
	<b>Média</b>	60.56	77.59	17.02	5.69	3.159	0.058	0.143	0.033	0.057	299.602
40%	1	61.34	78.01	16.669	4.02	4.146	0.058	0.116	0.042	0.039	426.174
	2	60.68	78.09	17.408	3.96	4.401	0.049	0.113	0.031	0.043	404.460
	3	60.74	78.08	17.338	2.85	6.074	0.045	0.110	0.027	0.043	400.343
	<b>Média</b>	60.92	78.06	17.14	3.61	4.873	0.051	0.113	0.033	0.042	410.326
45%	1	59.89	78.39	18.500	1.83	10.107	0.050	0.138	0.025	0.059	314.442
	2	61.22	78.35	17.128	2.72	6.291	0.047	0.104	0.030	0.039	443.152
	3	61.58	78.69	17.110	4.31	3.970	0.048	0.108	0.031	0.041	421.212
	<b>Média</b>	60.90	78.48	17.58	2.95	6.789	0.048	0.117	0.029	0.046	392.935
50%	1	61.34	78.40	17.055	3.32	5.143	0.051	0.109	0.034	0.039	432.260
	2	61.40	78.44	17.039	2.13	7.991	0.049	0.116	0.030	0.045	375.664
	3	61.53	78.40	16.866	2.69	6.281	0.047	0.113	0.028	0.044	380.693
	<b>Média</b>	61.43	78.41	16.99	2.71	6.472	0.049	0.113	0.031	0.043	396.206
	<b>Média Geral</b>					8.012	0.055	0.125	0.035	0.047	354.900

Fonte: O autor.



Tabela 15 - Parâmetros do controlador *feedforward*. Sendo a perturbação a entrada de gás no helicoidal sob diversas aberturas da válvula reservatório. A perturbação é avaliada pela variação do nível do tanque de retorno. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz. A diferença de pressão entre o reservatório e o anular era de **20 psi**.

	<b>Teste</b>	<b>Platô inicial</b>	<b>Platô final</b>	<b>Bu</b>	<b>M</b>	<b>K</b>	<b>t1(min)</b>	<b>t2(min)</b>	<b>td(min)</b>	<b>T(min)</b>	<b>S</b>
<b>30%</b>	1	53.96	71.09	17.132	2.42	7.071	0.088	0.169	0.065	0.055	313.178
	2	53.85	71.27	17.421	3.06	5.699	0.063	0.128	0.045	0.044	399.765
	3	52.34	70.43	18.082	2.23	8.100	0.094	0.181	0.070	0.058	310.407
	<b>Média</b>	53.38	70.93	17.54	2.57	6.957	0.082	0.160	0.060	0.052	341.117
<b>35%</b>	1	52.60	76.53	23.932	2.80	8.556	0.052	0.118	0.033	0.045	536.654
	2	52.67	77.63	24.961	2.77	9.012	0.049	0.121	0.029	0.048	518.613
	3	52.65	75.33	22.684	4.03	5.624	0.070	0.139	0.051	0.046	493.479
	<b>Média</b>	52.64	76.50	23.86	3.20	7.731	0.057	0.126	0.038	0.046	516.248
<b>40%</b>	1	52.49	78.29	25.801	3.06	8.438	0.049	0.111	0.032	0.041	626.758
	2	52.72	77.88	25.162	2.90	8.673	0.054	0.109	0.039	0.037	682.569
	3	52.94	79.00	26.054	2.06	12.669	0.053	0.121	0.034	0.046	569.695
	<b>Média</b>	52.72	78.39	25.67	2.67	9.926	0.052	0.114	0.035	0.041	626.341
<b>45%</b>	1	52.62	78.72	26.094	2.55	10.238	0.047	0.114	0.028	0.045	578.700
	2	52.71	78.67	25.965	2.99	8.680	0.055	0.112	0.039	0.038	681.791
	3	52.67	79.16	26.494	2.13	12.445	0.052	0.110	0.036	0.039	678.100
	<b>Média</b>	52.67	78.85	26.18	2.56	10.454	0.051	0.112	0.034	0.041	646.197
<b>50%</b>	1	53.26	79.00	25.747	2.96	8.701	0.048	0.114	0.030	0.044	583.634
	2	52.71	79.23	26.517	2.31	11.471	0.049	0.109	0.032	0.040	663.933
	3	53.54	79.21	25.672	2.10	12.199	0.054	0.116	0.036	0.042	615.026
	<b>Média</b>	53.17	79.15	25.98	2.46	10.790	0.050	0.113	0.033	0.042	620.864
	<b>Média Geral</b>					9.172	0.059	0.125	0.040	0.044	550.153

Fonte: O autor

Tabela 16 - Parâmetros do controlador *feedforward*. Sendo a perturbação a entrada de gás no helicoidal sob diversas aberturas da válvula reservatório. A perturbação é avaliada pela variação do nível do tanque de retorno. Em todos os testes a bomba se encontrava em 20 Hz. A diferença de pressão entre o reservatório e o anular era de **30 psi**.

	<b>Teste</b>	<b>Platô inicial</b>	<b>Platô final</b>	<b>Bu</b>	<b>M</b>	<b>K</b>	<b>t1(min)</b>	<b>t2(min)</b>	<b>td(min)</b>	<b>T(min)</b>	<b>S</b>
<b>30%</b>	1	49.76	69.47	19.714	2.82	6.979	0.081	0.159	0.059	0.053	374.066
	2	50.09	69.63	19.537	3.09	6.319	0.083	0.151	0.064	0.046	427.841
	3	50.73	77.76	27.033	5.14	5.260	0.047	0.107	0.030	0.040	675.027
	<b>Média</b>	50.19	72.29	22.09	3.69	6.186	0.070	0.139	0.051	0.046	492.311
<b>35%</b>	1	51.20	77.27	26.067	2.30	11.313	0.076	0.138	0.059	0.042	626.987
	2	51.19	80.70	29.511	3.73	7.905	0.047	0.112	0.029	0.044	677.682
	3	51.28	77.97	26.690	2.99	8.923	0.070	0.133	0.053	0.042	636.813
	<b>Média</b>	51.22	78.65	27.42	3.01	9.380	0.065	0.128	0.047	0.042	647.160
<b>40%</b>	1	51.69	83.38	31.695	3.32	9.557	0.048	0.107	0.032	0.039	810.183
	2	51.83	83.10	31.274	2.97	10.533	0.048	0.106	0.032	0.038	816.120
	3	52.00	81.87	29.868	2.87	10.422	0.050	0.113	0.032	0.042	704.426
	<b>Média</b>	51.84	82.78	30.95	3.05	10.171	0.049	0.109	0.032	0.040	776.910
<b>45%</b>	1	52.28	85.26	32.988	5.05	6.538	0.050	0.112	0.032	0.041	795.081
	2	52.33	85.73	33.398	2.95	11.336	0.056	0.119	0.038	0.042	793.823
	3	52.53	86.35	33.819	4.54	7.450	0.056	0.118	0.038	0.042	810.298
	<b>Média</b>	52.38	85.78	33.40	4.18	8.441	0.054	0.116	0.036	0.042	799.734
<b>50%</b>	1	52.65	86.48	33.831	5.90	5.737	0.048	0.110	0.031	0.041	818.101
	2	52.78	86.84	34.059	3.09	11.005	0.049	0.111	0.032	0.041	827.007
	3	52.68	87.20	34.523	3.47	9.943	0.049	0.113	0.031	0.043	808.987
	<b>Média</b>	52.70	86.84	34.14	4.15	8.895	0.049	0.111	0.031	0.042	818.032
	<b>Média Geral</b>					8.615	0.057	0.121	0.040	0.042	706.830

Fonte: O autor.

## ANEXO B

Neste anexo são apresentados os testes de linearidade da unidade helicoidal. A linearidade foi estudada em triplicata, onde se aplicou perturbações de grau positiva e negativa de mesma magnitude no índice de abertura da válvula *choke* (variável manipulada), e foi avaliado a resposta do sistema através da pressão anular de fundo (variável controlada). O sistema é linear quando as respostas aos degraus positivo e negativo são de mesma magnitude. Os testes iniciavam com abertura de 60% e aplicava-se degraus de  $\pm 15\%$ ,  $\pm 25\%$  e  $\pm 35\%$  para diversos estados operacionais (20 Hz, 25 Hz, 30 Hz). Outros estados operacionais e maiores degraus não foram estudados por limitações operacionais. A Figura 82 apresenta os testes realizados em 20 Hz.

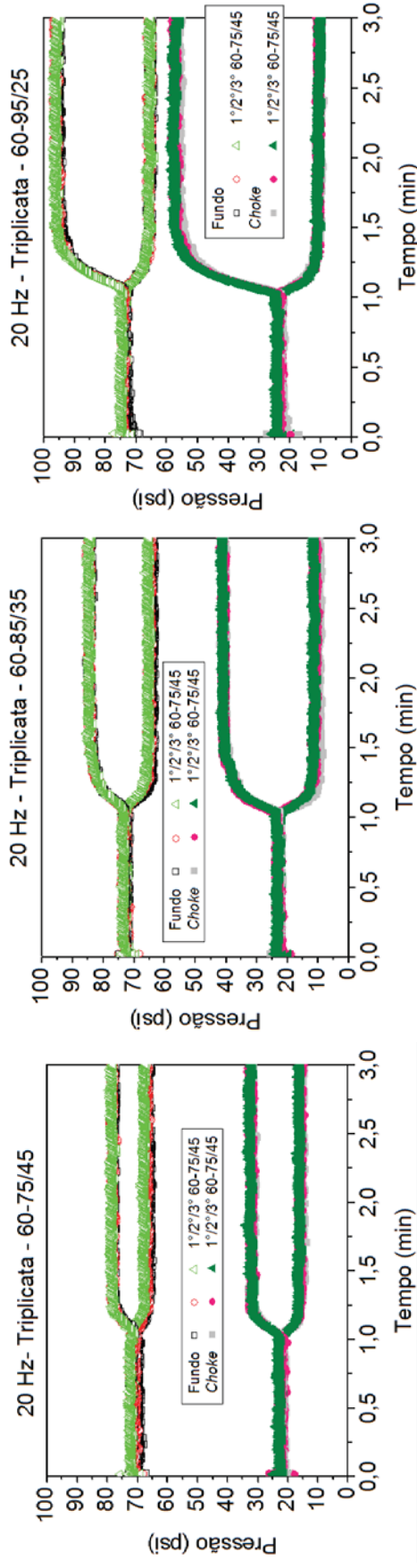


Figura 82 – Testes de linearidade com perturbações de grau no índice de abertura da válvula *choke* para a bomba em 20 Hz. Fonte: O autor.

A Figura 83 apresenta os resultados para os testes de linearidade realizados com a bomba em 25 Hz.

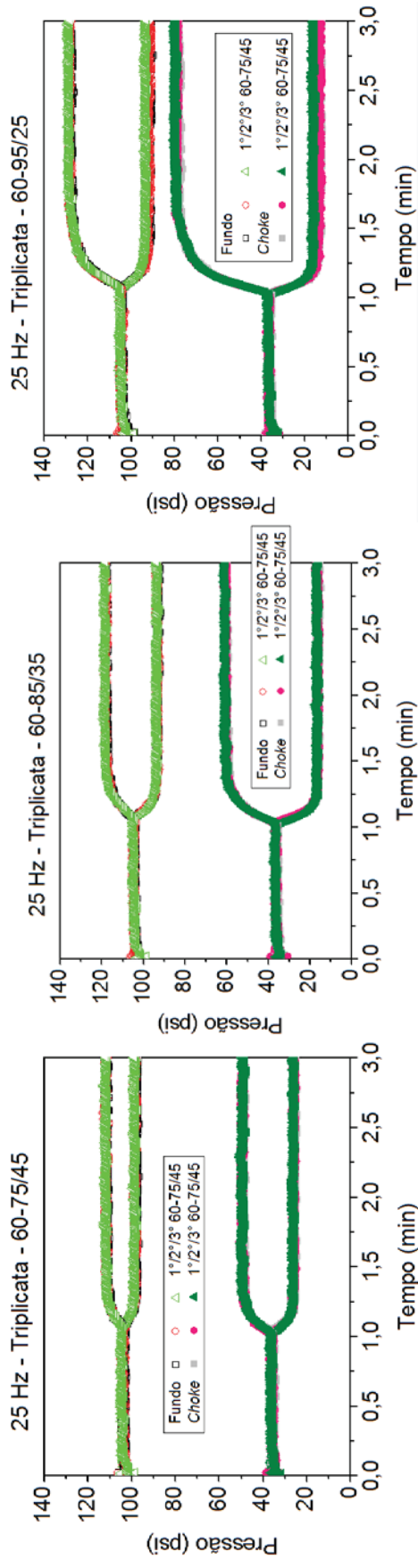


Figura 83 - Testes de linearidade com perturbações de grau no índice de abertura da válvula *choke* para a bomba em 25 Hz. Fonte: O autor.

A Figura 84 apresenta os resultados para os testes de linearidade realizados com a bomba em 30 Hz.

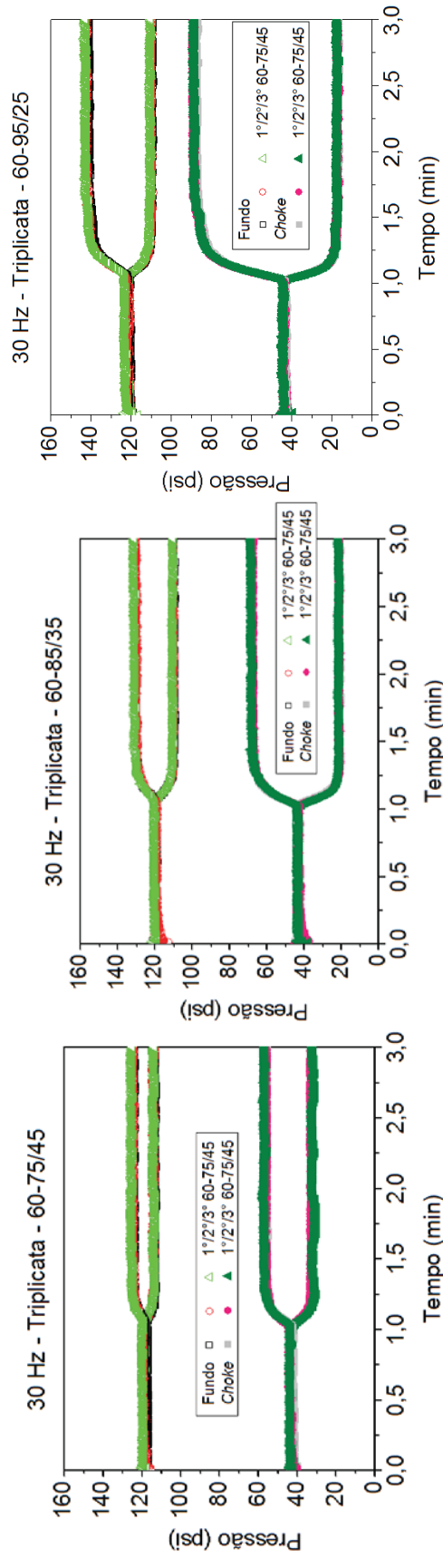


Figura 84 - Testes de linearidade com perturbações de grau no índice de abertura da válvula *choke* para a bomba em 30 Hz. Fonte: O autor.

A Figura 85 e a Figura 86 apresentam o grau de não linearidade do sistema a partir da avaliação dos parâmetros do sistema

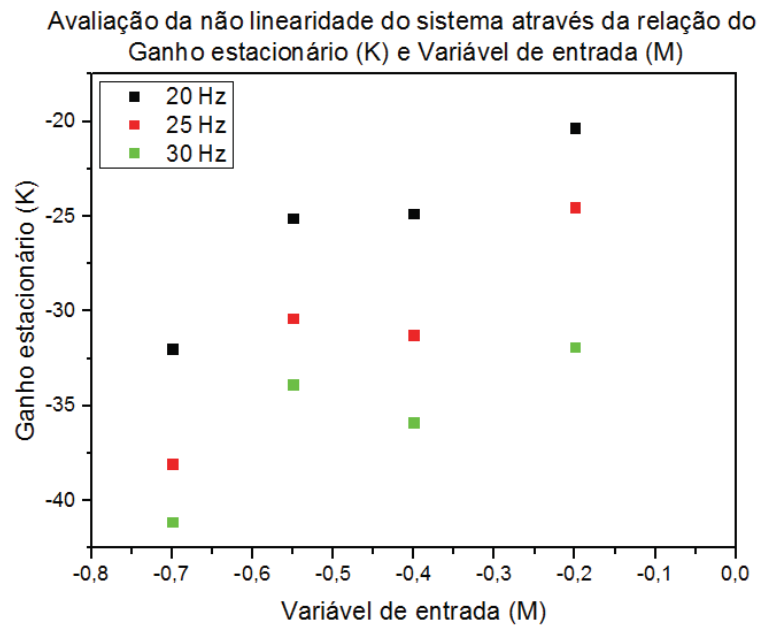


Figura 85 - Avaliação da não linearidade do sistema através da relação do Ganho estacionário (K) e Variável de entrada (M). Fonte: O autor.

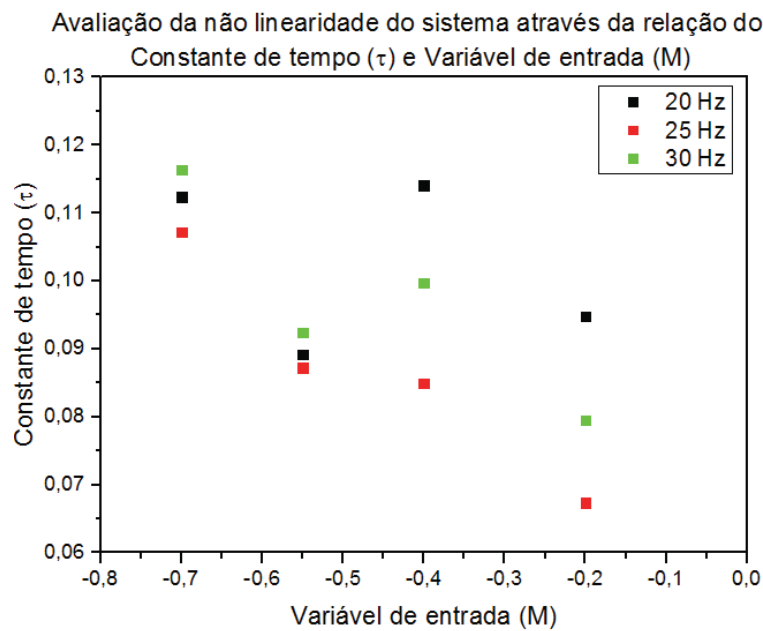


Figura 86 - Avaliação da não linearidade do sistema através da relação do Constante de tempo ( $\tau$ ) e Variável de entrada (M). Fonte: O autor.

## ANEXO C

A Figura 87 (Bomba a 20 Hz), Figura 88 (25Hz) e Figura 89 (30Hz) apresentam os testes de identificação da unidade helicoidal. A variação no índice de abertura do *choke* acontece após 1 minuto de teste. Os testes foram desenvolvidos variando a aberturas do *choke* de 95% para 25%, 40%, 55% e 75%. As curvas MSK mostram o quão bem o modelo de Sundaresan-Krishnaswamy descreve o processo.

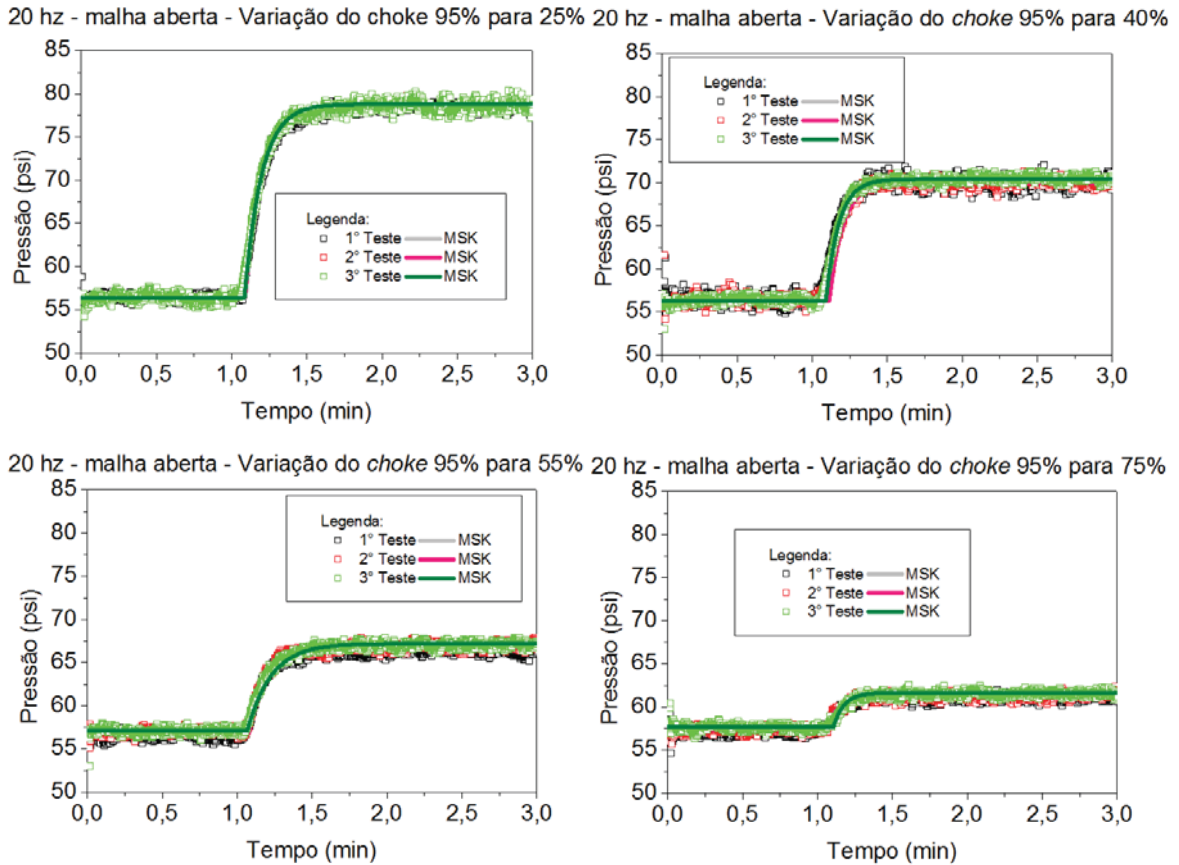


Figura 87 - Testes de identificação variando a abertura do *choke* e mantendo a bomba em **20 Hz**. Fonte: O autor.

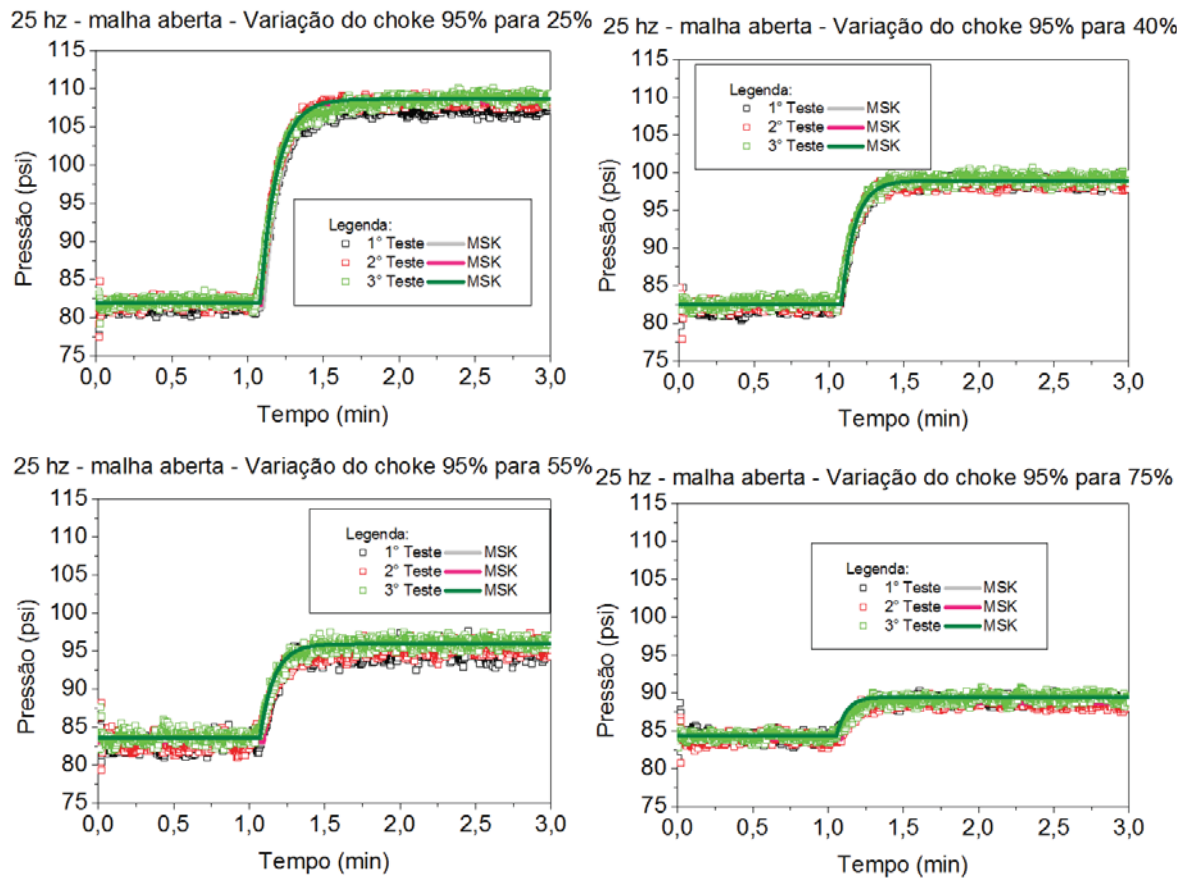


Figura 88 - Testes de identificação variando a abertura do *choke* e mantendo a bomba em **25 Hz**. Fonte: O autor.

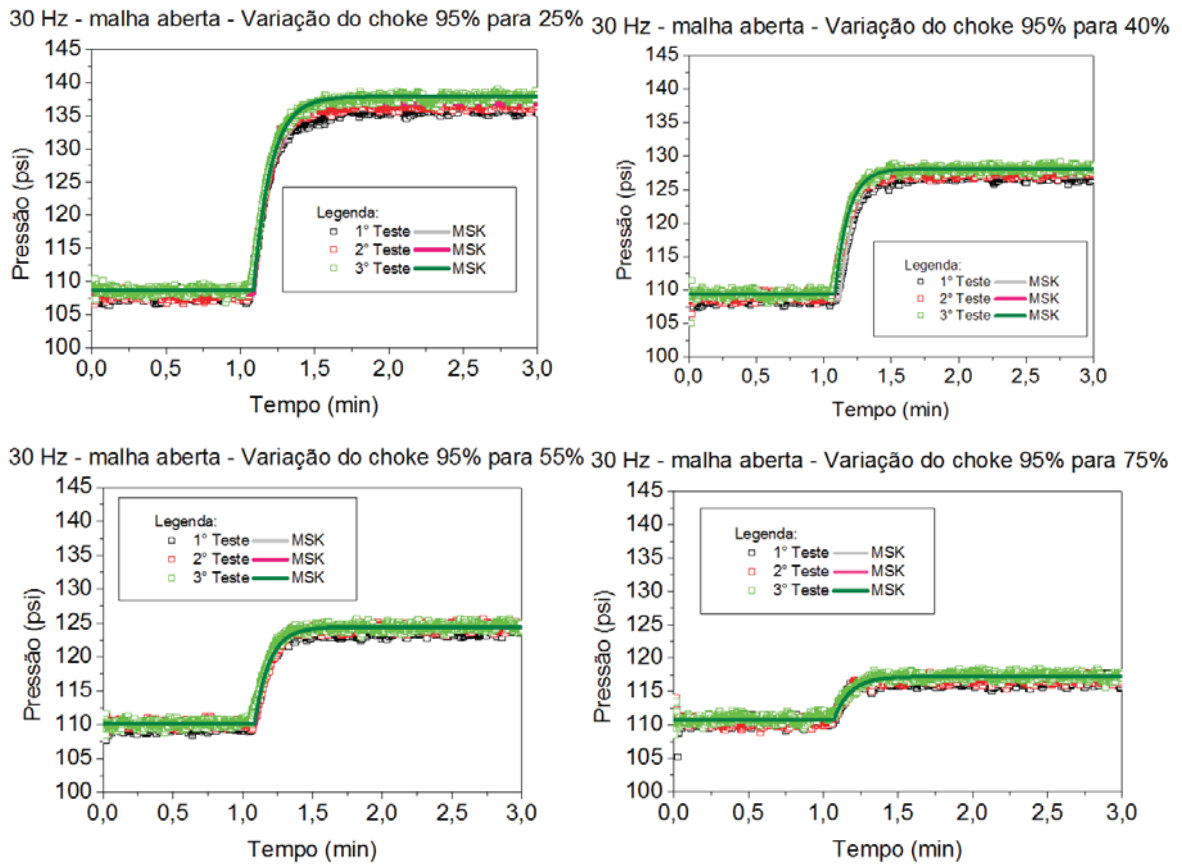


Figura 89 – Testes de identificação variando a abertura do *choke* e mantendo a bomba em **30 Hz**. Fonte: O autor.



## ANEXO D

Este anexo apresenta o conjunto de testes servo realizados para avaliar se uma estratégia de controle linear seria capaz de controlar o sistema sobre diferentes níveis operacionais. Sendo verdade, busca ainda encontrar a melhor sintonia dos parâmetros do controlador.

A Figura 45 e a Figura 46 apresentam os testes servo realizados a fim de avaliar os parâmetros do controlador encontrados pelos métodos de Cohen-Coon e Ziegler-Nichols. Partindo destes, variou-se os parâmetros buscando uma sintonia ótima. Testes foram realizados com a bomba em 20 Hz, 25 Hz e 30 Hz.

A Figura 90 apresenta testes servo onde manteve-se o  $\tau_I=0,1$  e variou-se o  $K_c$ , com a bomba em 20 Hz.

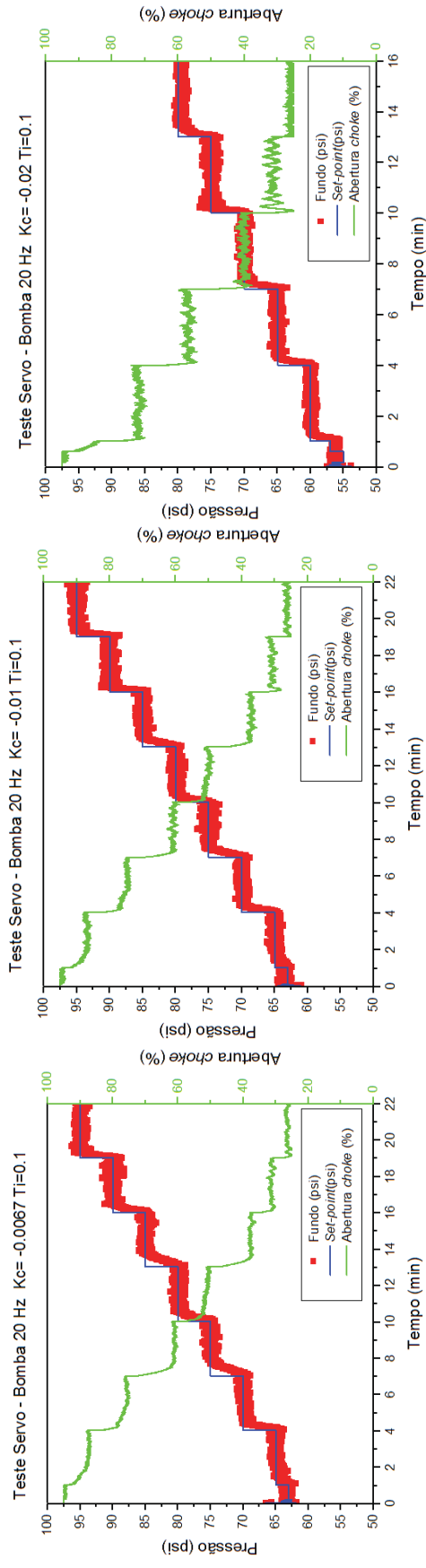


Figura 90 - Testes servo com  $\tau_I=0,1$  e  $K_c = -0,0067; 0,01$  e  $0,015$ . Bomba em 20 Hz

A Figura 91 apresenta testes com bomba a 25 Hz e 30 Hz, e  $\tau_1=0,1$  e  $K_c=-0,02$ :

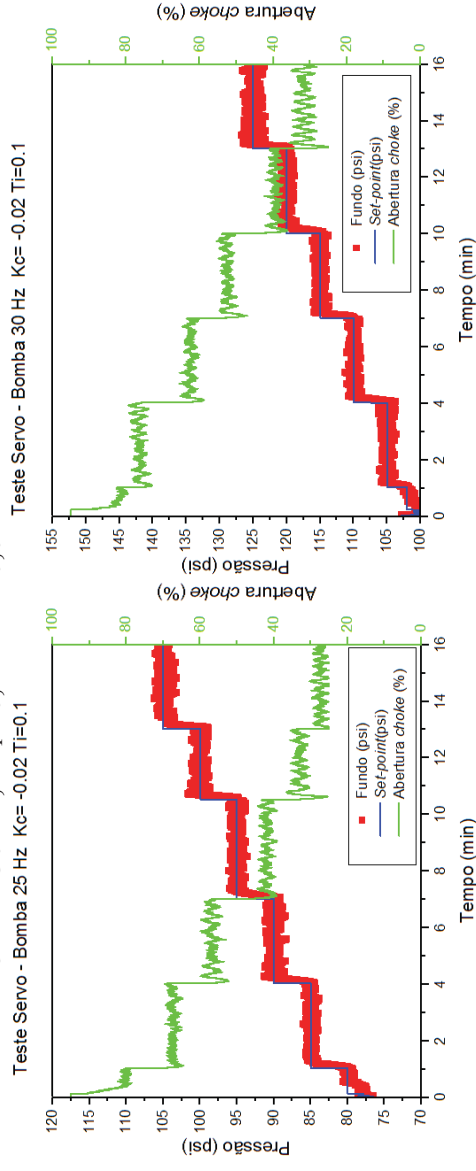


Figura 91 - Testes servo com  $\tau_1=0,1$  e  $K_c=-0,02$  e bomba em 25 Hz (esquerda) e 30 Hz (direita). Fonte: O autor.

Bomba a 20 Hz,  $\tau_1=0,15$  e variando  $K_c$  (Figura 92):

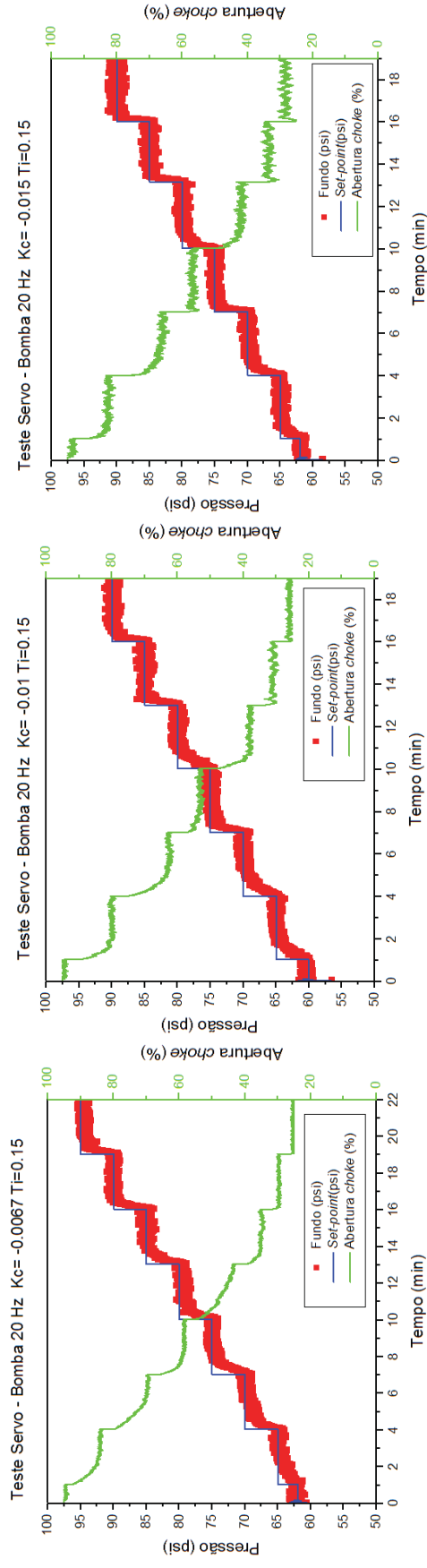


Figura 92 - Testes servo com bomba em 20 Hz,  $\tau_1=0,15$  e  $K_c$  variando. Fonte: O autor.

A Figura 93 mostra os testes com bomba a 25 Hz e  $T_i=0,15$  variando  $K_c$ :

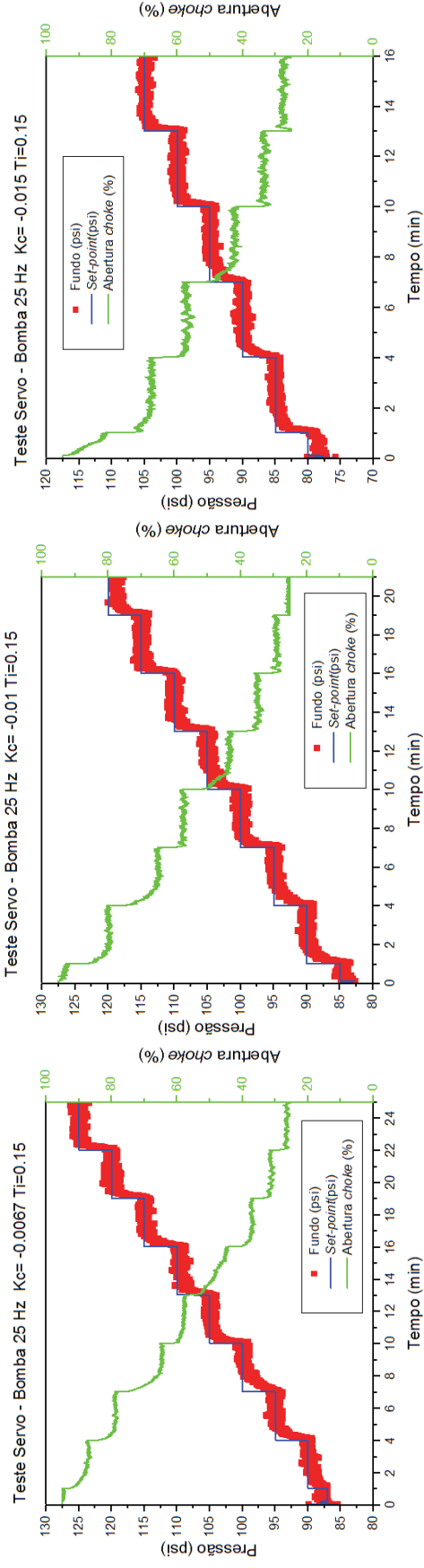


Figura 93 - Testes servo com bomba em 25 Hz,  $\tau_i=0,15$  e  $K_c$  variando. Fonte: O autor.

Na Figura 94 temos os testes com bomba a 30 Hz e  $T_i=0,15$  variando  $K_c$ :

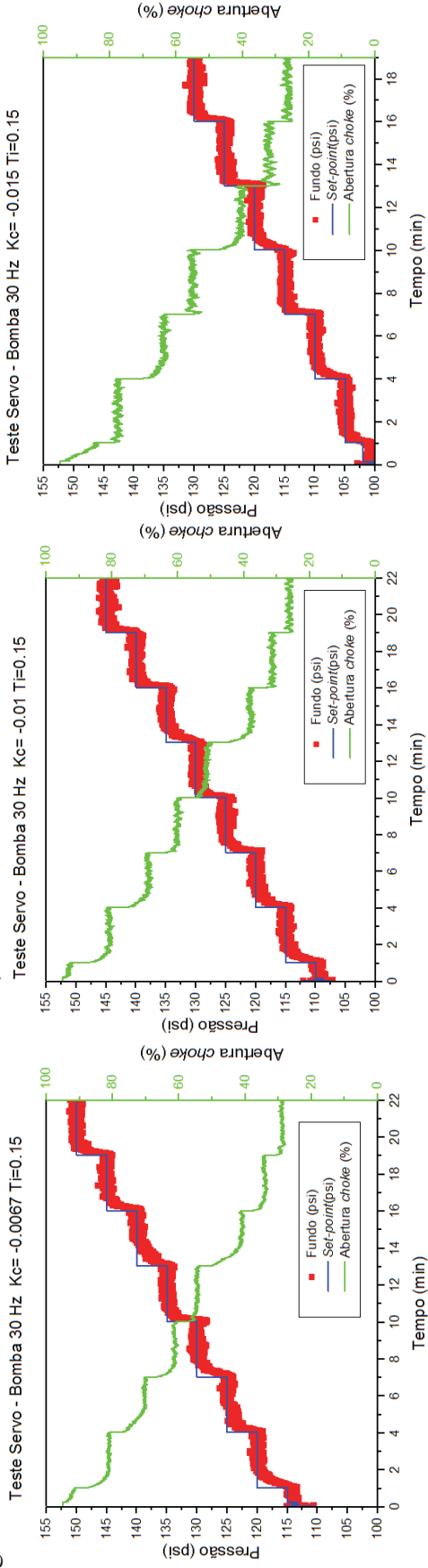


Figura 94 - Testes servo com bomba em 30 Hz,  $\tau_i=0,15$  e  $K_c$  variando. Fonte: O autor.

Bomba a 20 Hz e  $T_i=0,2$  e variando  $K_c$  (Figura 95):

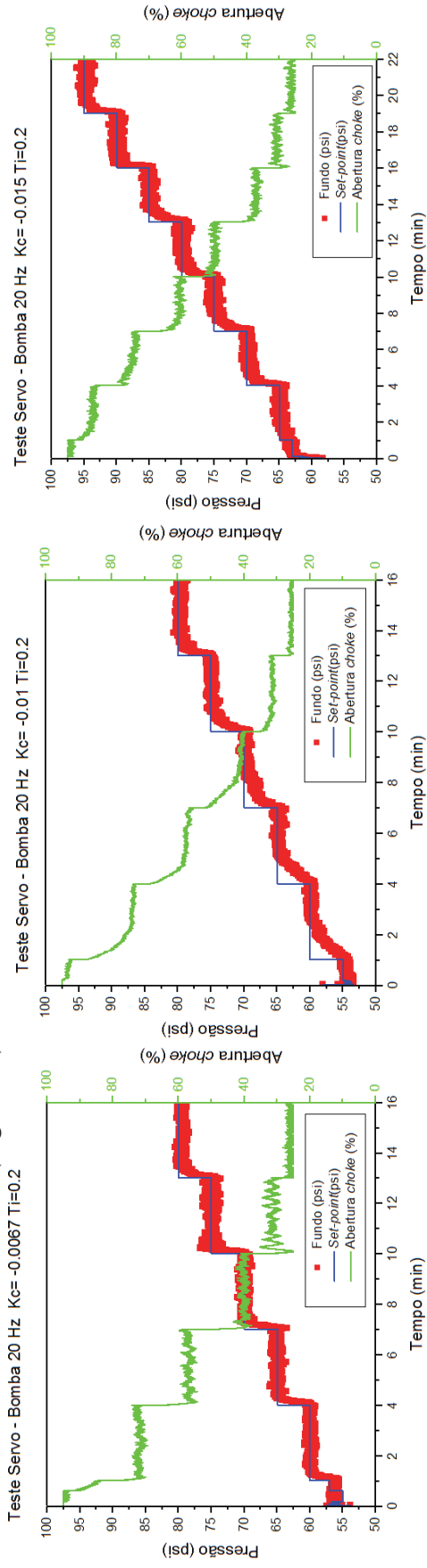


Figura 95 - Testes servo com bomba em 20 Hz,  $\tau_I=0,2$  e  $K_c$  variando. Fonte: O autor

## ANEXO E

O ANEXO E apresenta o comportamento do anular helicoidal sobre *kick* de gás em diversos estados operacionais. A expansão do gás, vazão e comportamento das pressões foram estudadas.

Na Figura 96, Figura 97, Figura 98, Figura 99 e Figura 100, **o poço estava aberto, sem circulação de fluido pela bomba** e em 1 minuto de teste o *kick* de gás entra no fundo do anular. As diferenças de pressão anular/reservatório foram de 20 psi, 30 psi, 40 psi, 50 psi e 100 psi.

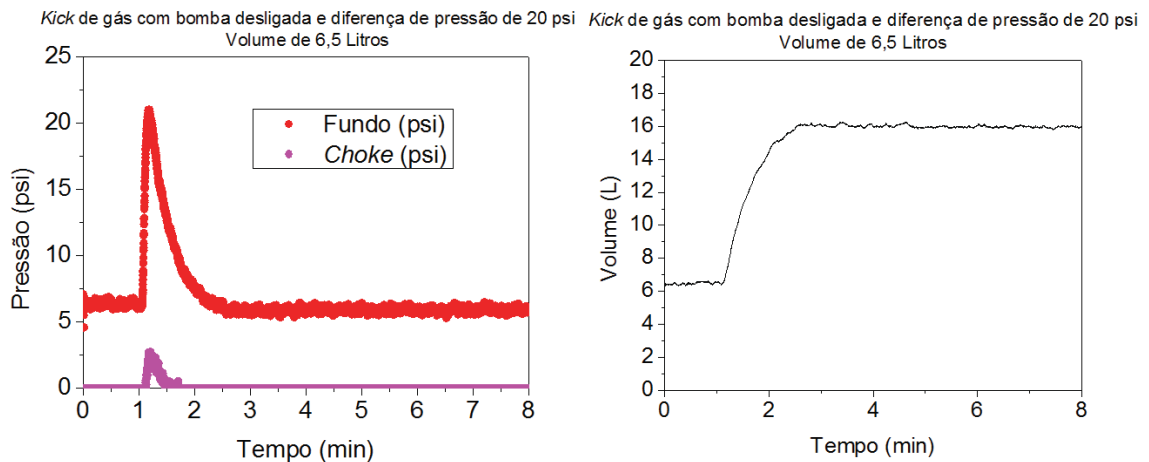


Figura 96 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório  
Fonte: O autor.

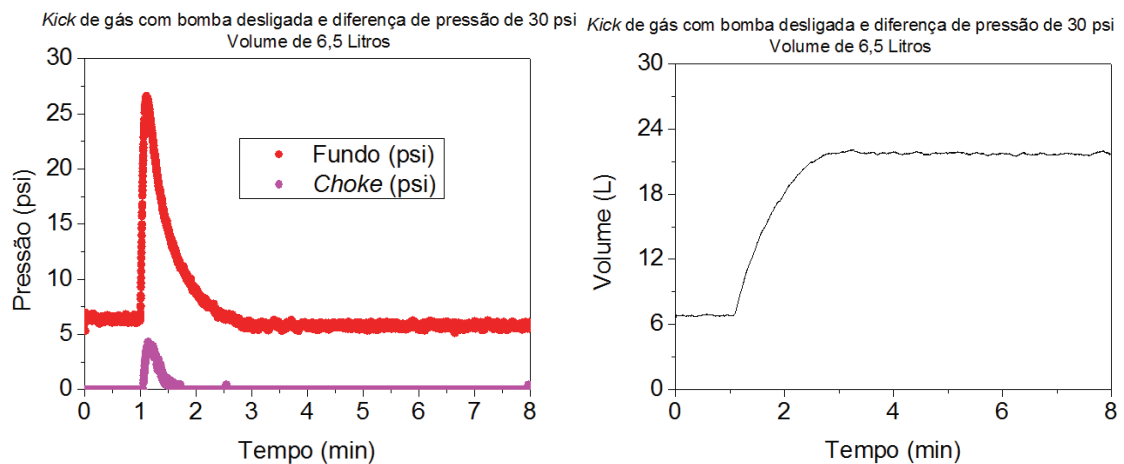


Figura 97 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório  
Fonte: O autor.

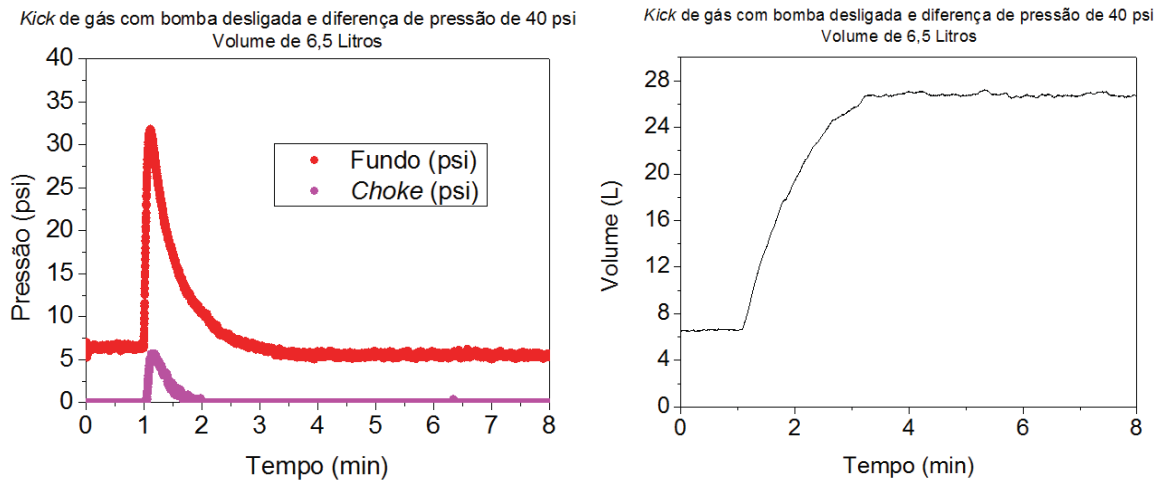


Figura 98 - Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 40 psi de diferença de pressão anular/reservatório  
 Fonte: O autor.

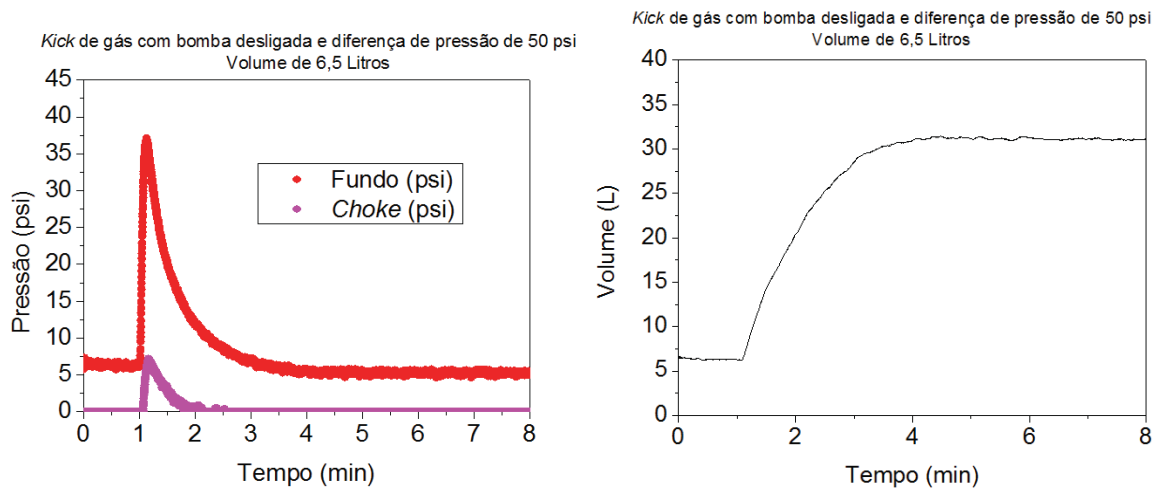
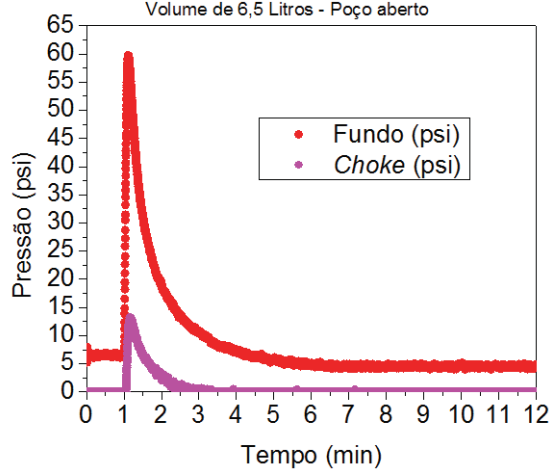


Figura 99 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 50 psi de diferença de pressão anular/reservatório  
 Fonte: O autor.

Kick de gás com bomba desligada e diferença de pressão de 100 psi



Kick de gás com bomba desligada e diferença de pressão de 100 psi

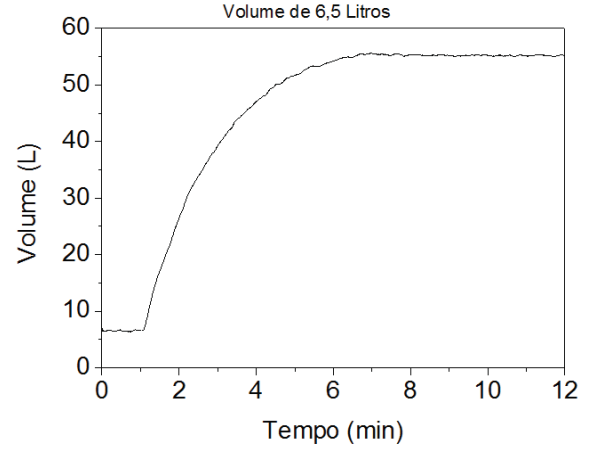


Figura 100 – Comportamento do poço aberto e sem circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda) e expansão do gás (direita). 100 psi de diferença de pressão anular/reservatório  
Fonte: O autor.

Na Figura 101, Figura 102, Figura 103, Figura 104, Figura 105 e Figura 106, o poço estava aberto, com circulação de fluido pela bomba e em 1 minuto de teste o *kick* de gás entra no fundo do anular. As diferenças de pressão anular/reservatório foram de 10 psi, 20 psi, 30 psi, 40 psi, 50 psi e 60 psi.

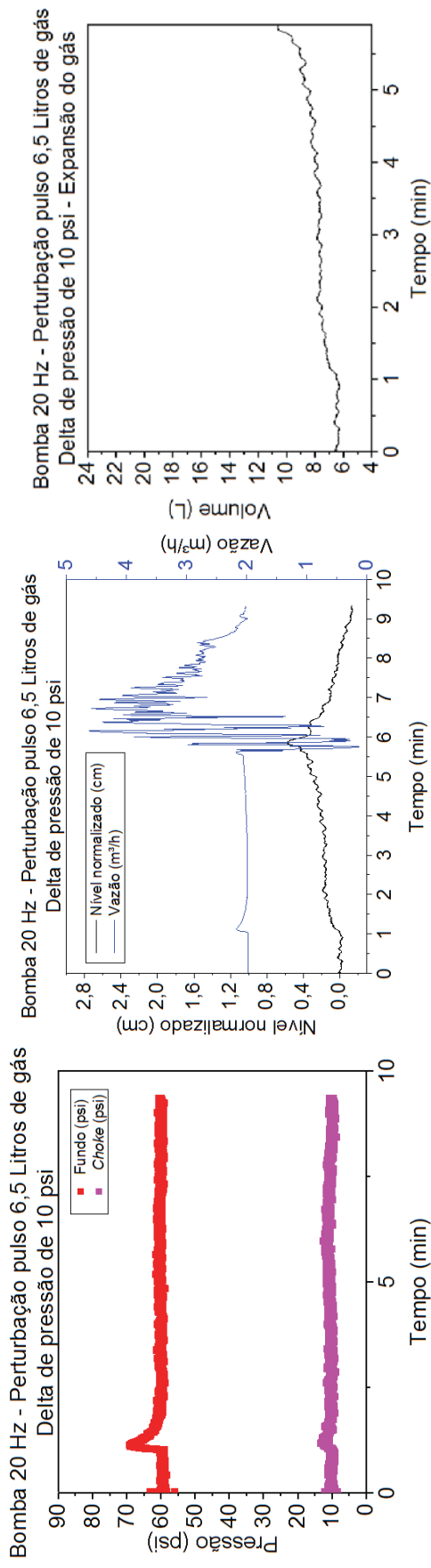


Figura 101 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.



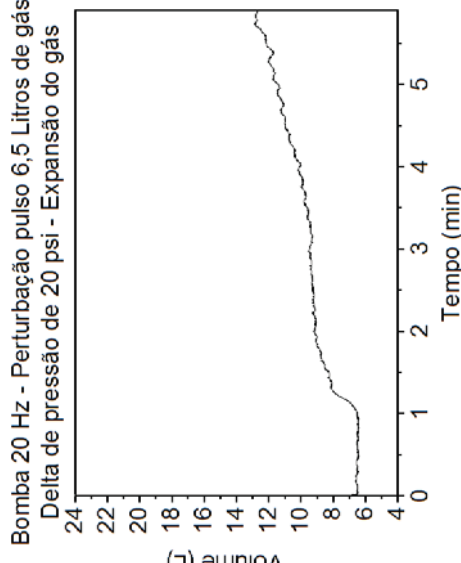
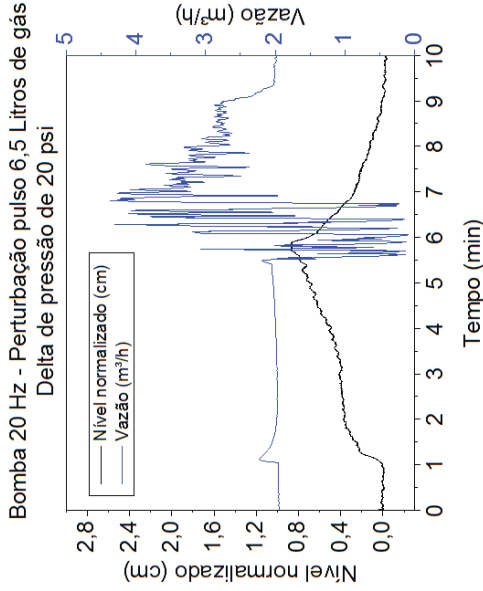
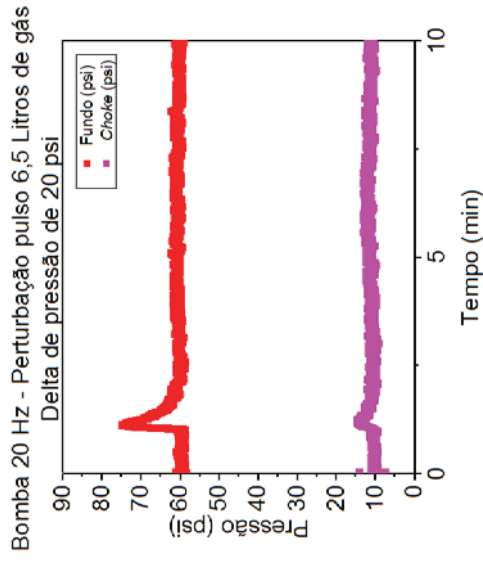


Figura 102 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.

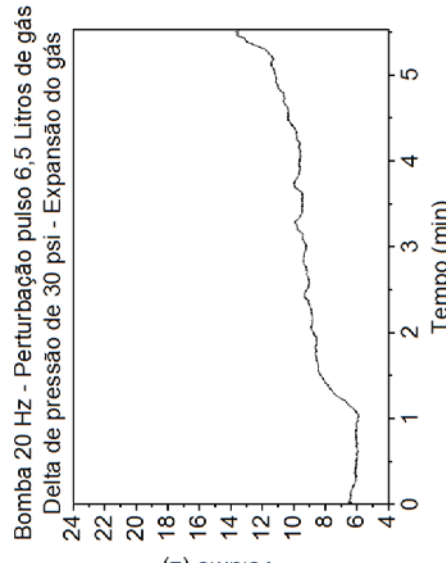
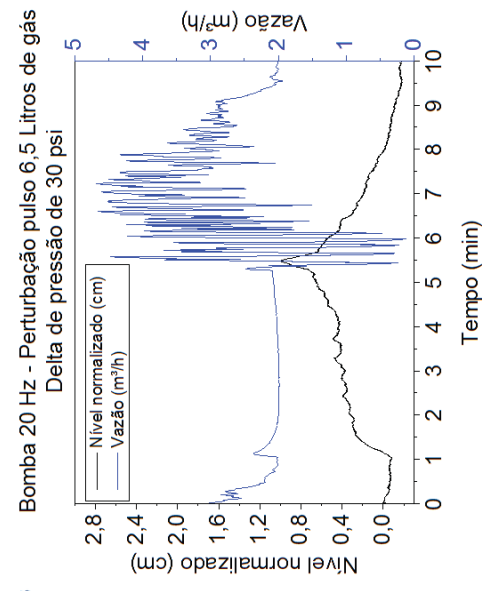
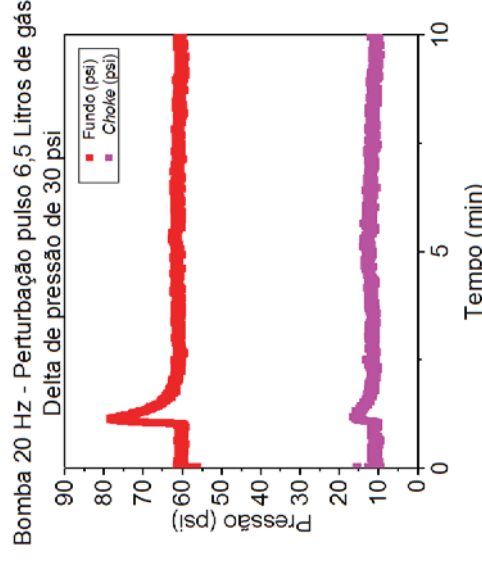


Figura 103 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.

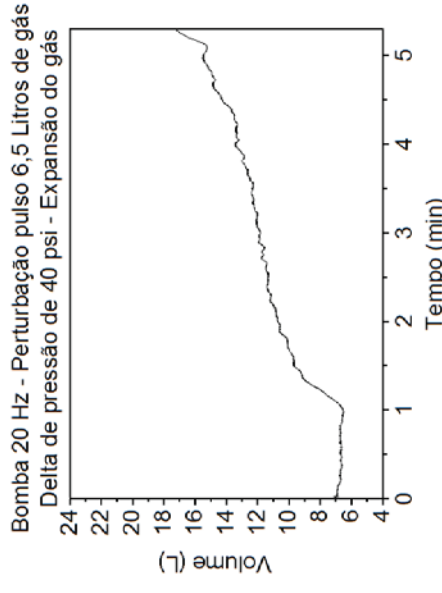
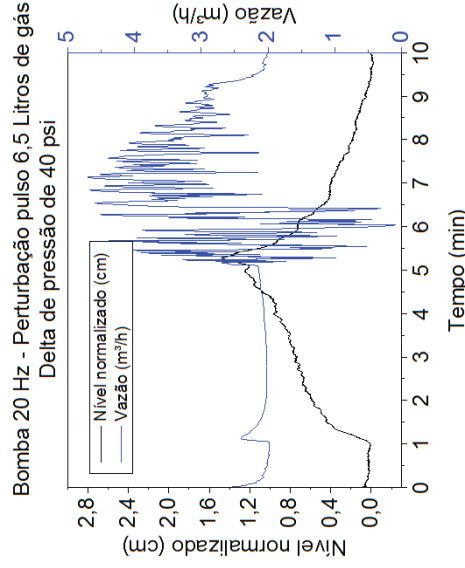
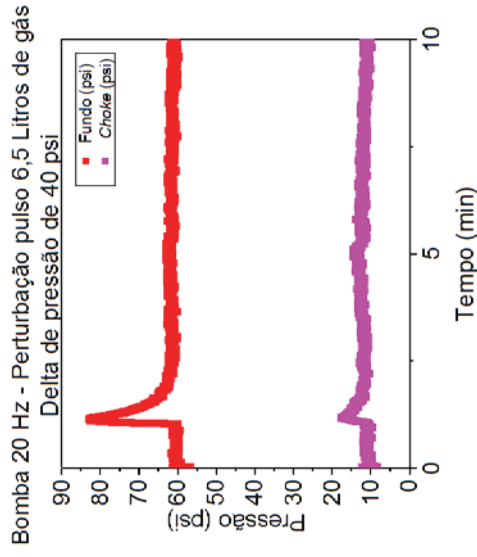


Figura 104 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 40 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.

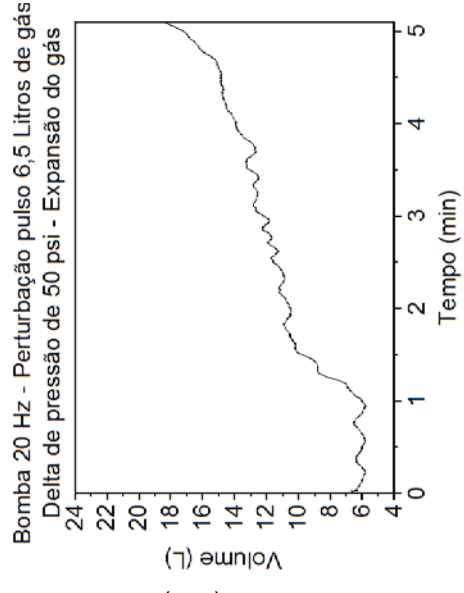
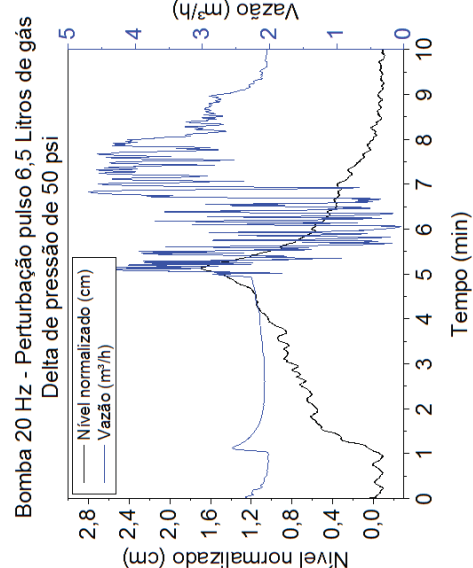
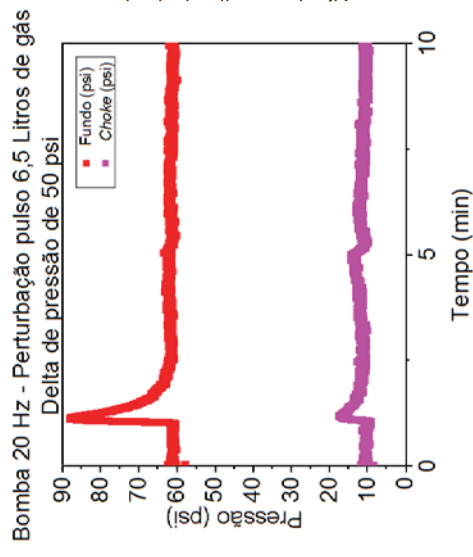


Figura 105 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 50 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.

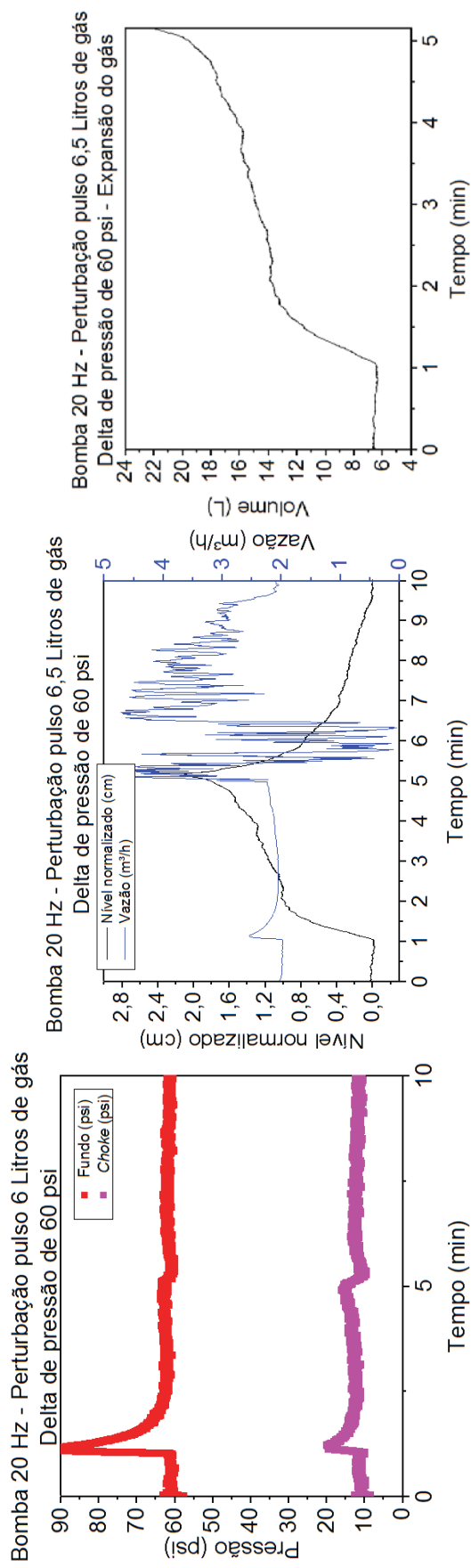


Figura 106 – Comportamento do poço aberto e com circulação quando sobre *kick* de gás (esquerda), expansão do gás (direita) e vazão e nível (meio). 60 psi de diferença de pressão anular/reservatório Fonte: O autor.

## ANEXO F

Este anexo apresenta os testes de identificação dos parâmetros *feedforward*.

A Figura 107 apresenta os resultados para uma diferença de pressão anular/reservatório de 10 psi variando a abertura da válvula reservatório de 0% para 30%, 35%, 40%, 45% e 50% em 1,5 minutos de teste.

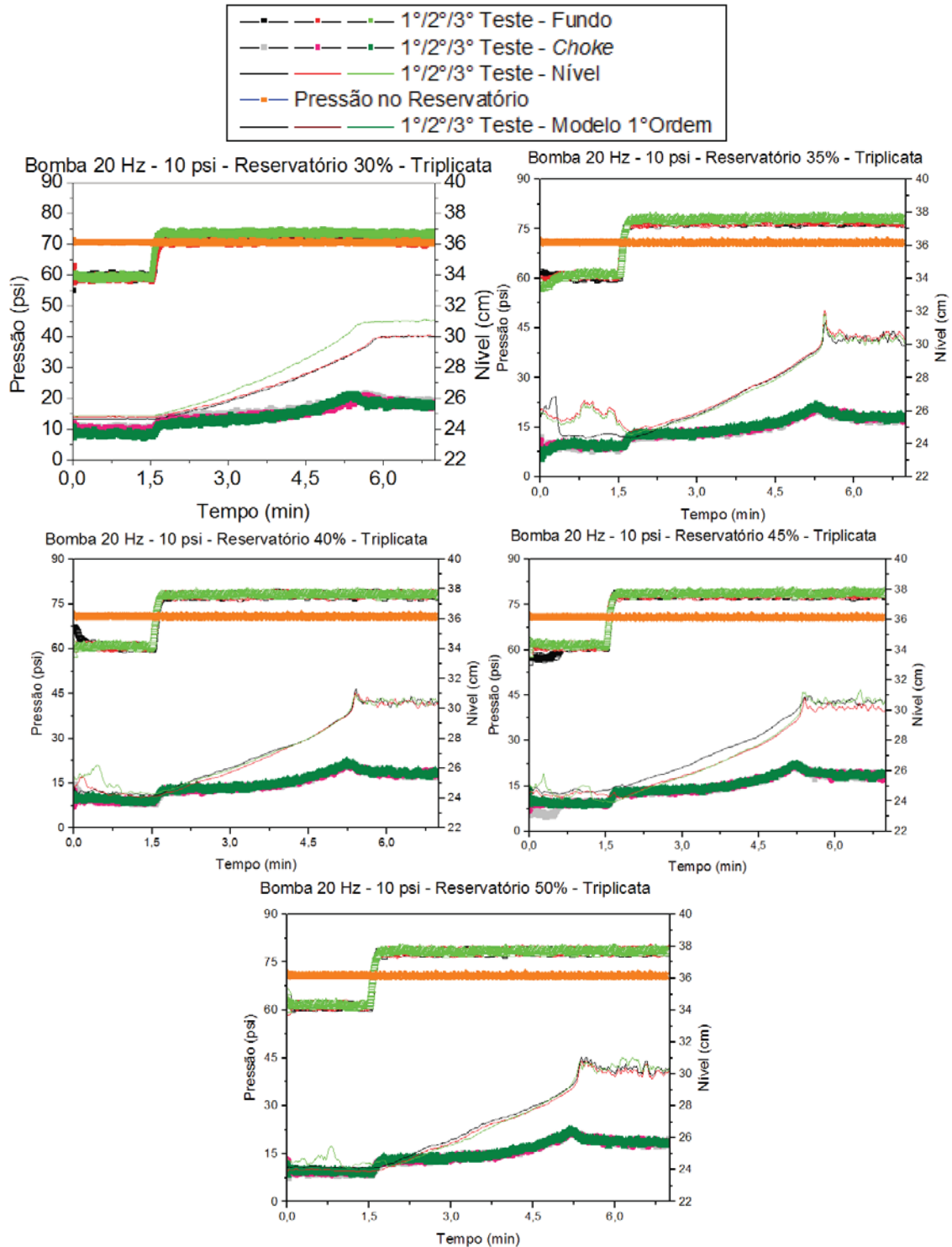


Figura 107 – Identificação dos parâmetros *feedforward* para diferença de pressão anular/reservatório de 10 psi e várias aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor.

A Figura 108 apresenta os resultados para uma diferença de pressão anular/reservatório de 20 psi variando a abertura da válvula reservatório de 30%, 35%, 40%, 45% e 50%.

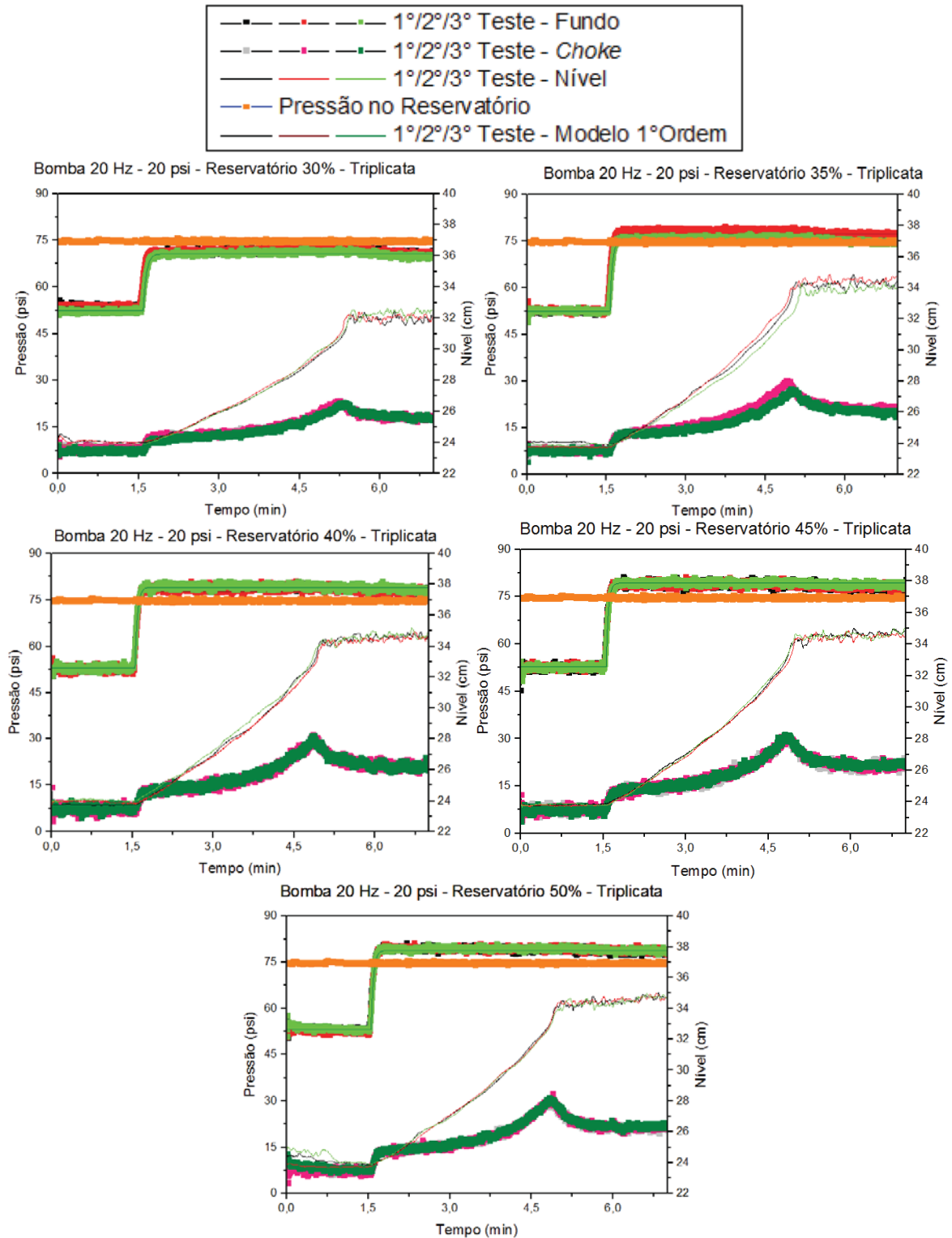


Figura 108 – Identificação dos parâmetros *feedforward* para diferença de pressão anular/reservatório de 20 psi e várias aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor.

A Figura 109 apresenta os resultados para uma diferença de pressão anular/reservatório de 30 psi variando a abertura da válvula reservatório de 30%, 35%, 40%, 45% e 50%.

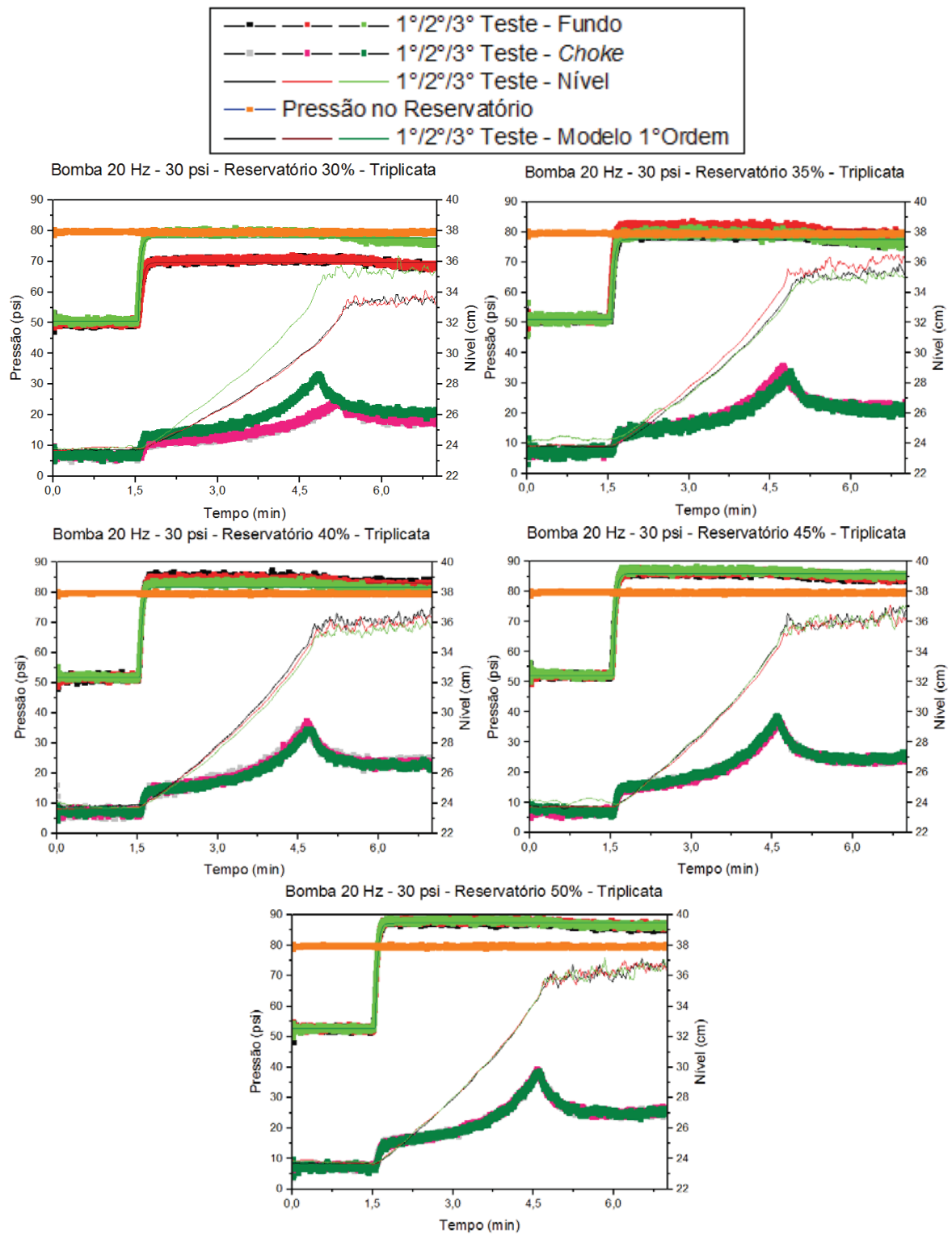


Figura 109 – Identificação dos parâmetros *feedforward* para diferença de pressão anular/reservatório de 30 psi e várias aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor.

O medidor de vazão foi instalado após os testes de identificação dos parâmetros *feedforward*. Sendo assim, alguns testes foram refeitos a fim de verificar o comportamento da vazão durante os testes de identificação. A Figura 110, Figura 111 e Figura 112 apresentam o comportamento da vazão para 10 psi, 20 psi e 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório:

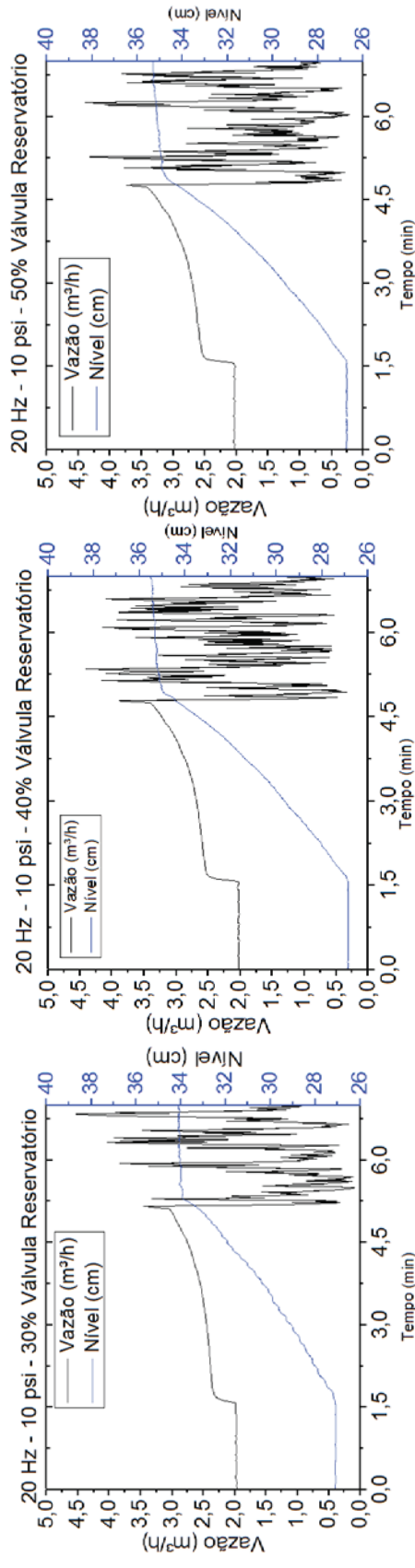


Figura 110 – Comportamento da vazão e nível durante os testes de identificação dos parâmetros *feedforward*. 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório e aberturas da válvula reservatório indo de 0% para 30% (esquerda), 40% (meio) e 50% (direita). Fonte: O autor.

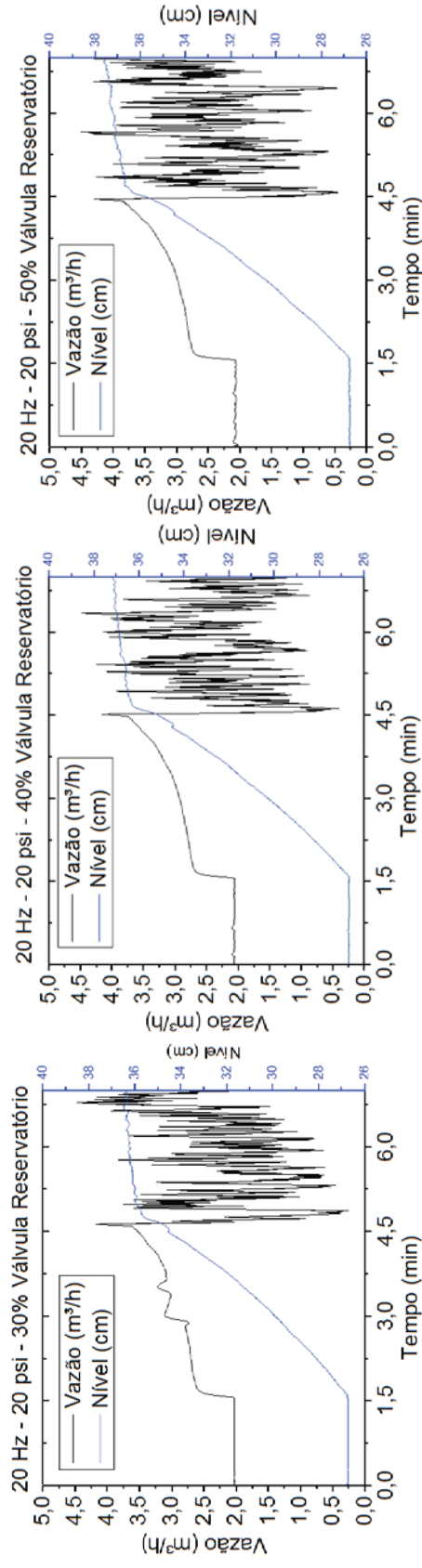


Figura 111 – Comportamento da vazão e nível durante os testes de identificação dos parâmetros *feedforward*. 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório e aberturas da válvula reservatório indo de 0% para 30% (esquerda), 40% (meio) e 50% (direita). Fonte: O autor.

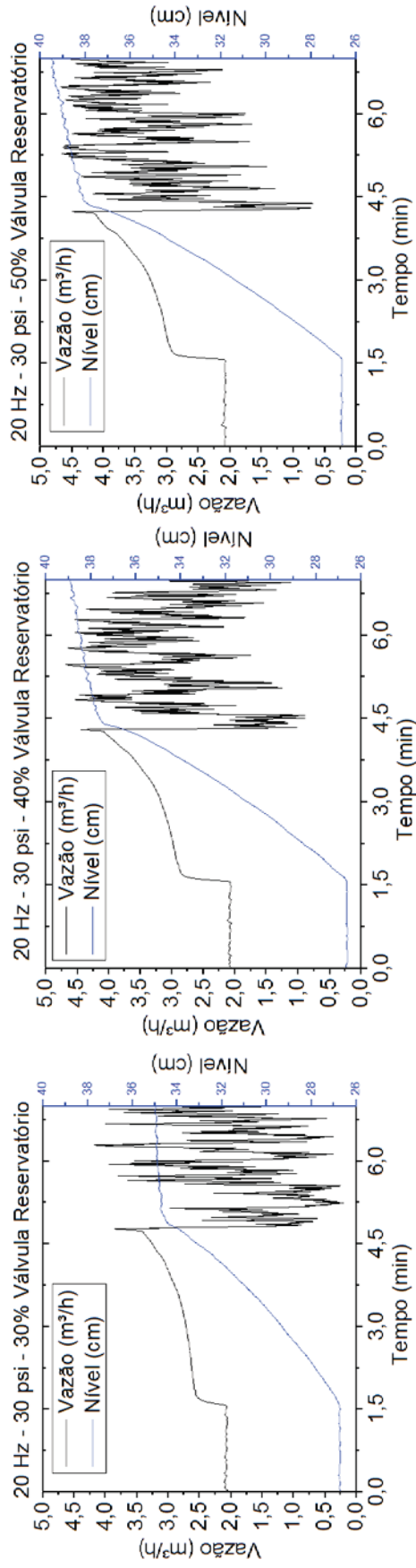


Figura 112 – Comportamento da vazão e nível durante os testes de identificação dos parâmetros *feedforward*. 30 psi de diferença de pressão anular/reservatório e aberturas da válvula reservatório indo de 0% para 30% (esquerda), 40% (meio) e 50% (direita). Fonte: O autor.



## ANEXO G

O ANEXO G apresenta os testes regulatório realizados por estratégia *feedback*.

A Figura 113, Figura 114 e Figura 115 apresentam testes regulatório com diferença de pressão anular/reservatório de 10 psi:

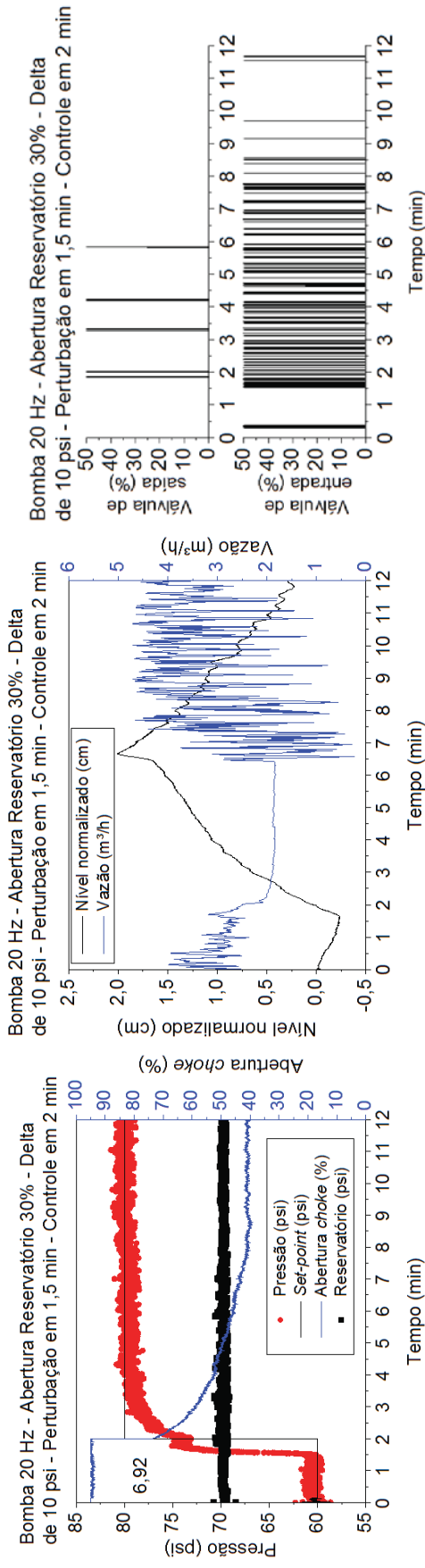


Figura 113 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

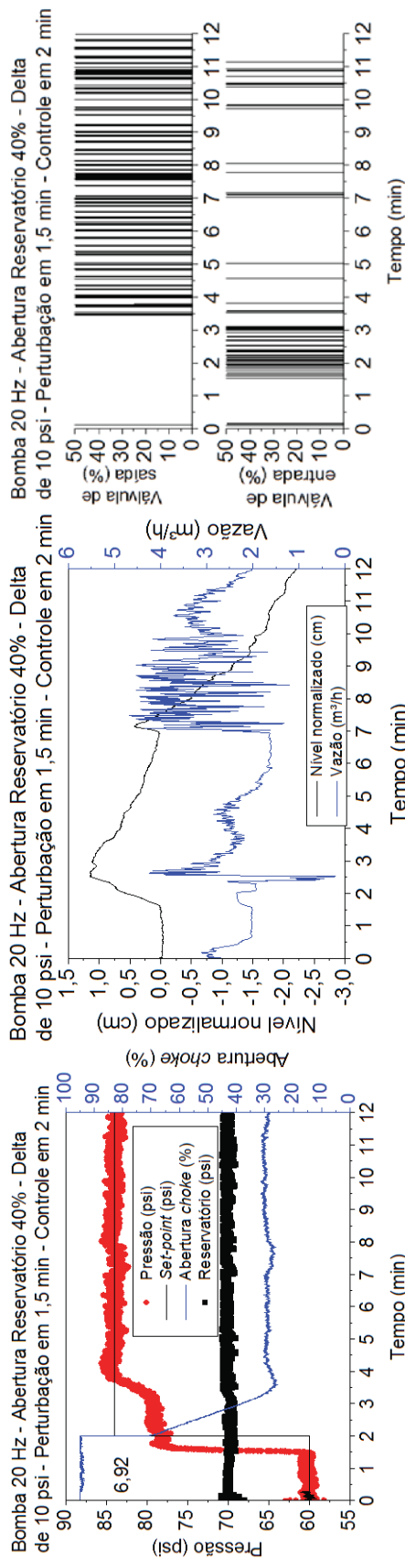


Figura 114 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

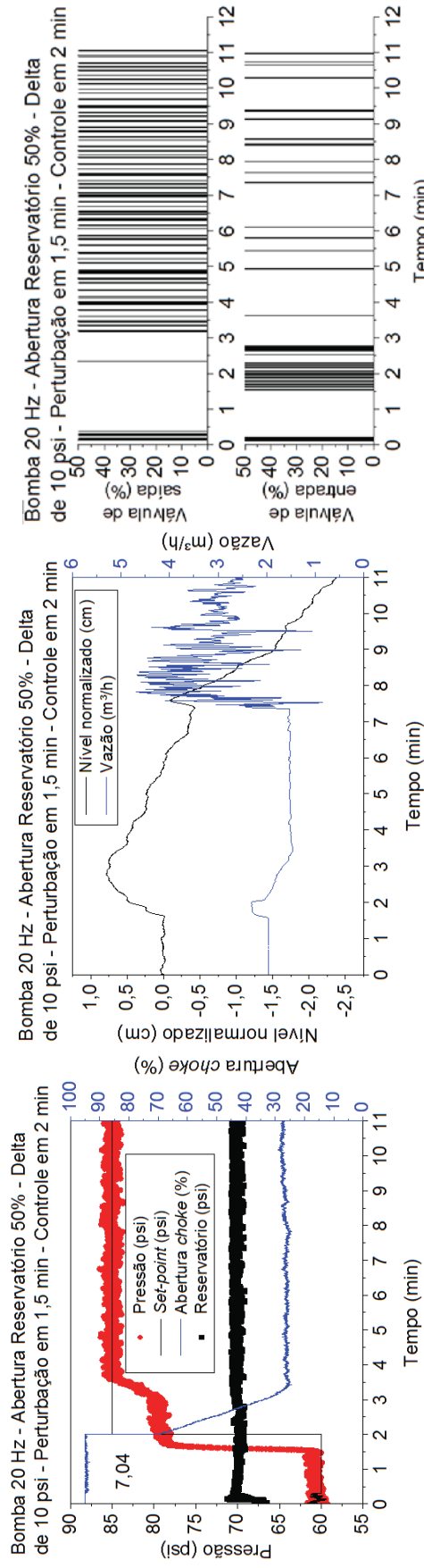


Figura 115 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

A Figura 116. Figura 117 e Figura 118, uma diferença de pressão anular/reservatório de 15 psi:

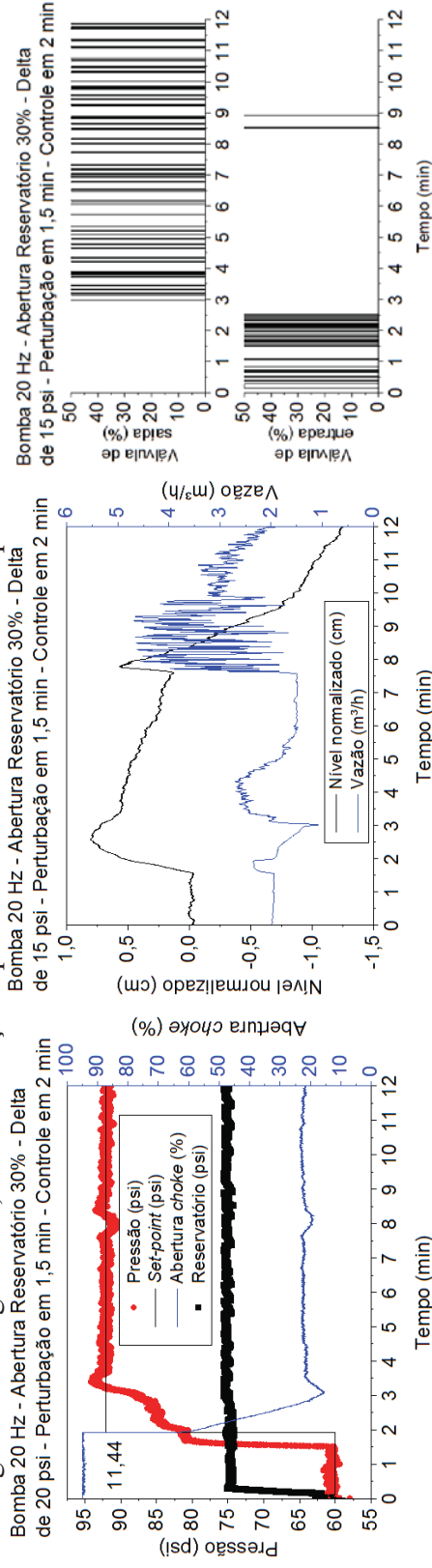


Figura 116 –Regulatório *feedback*. ΔPressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

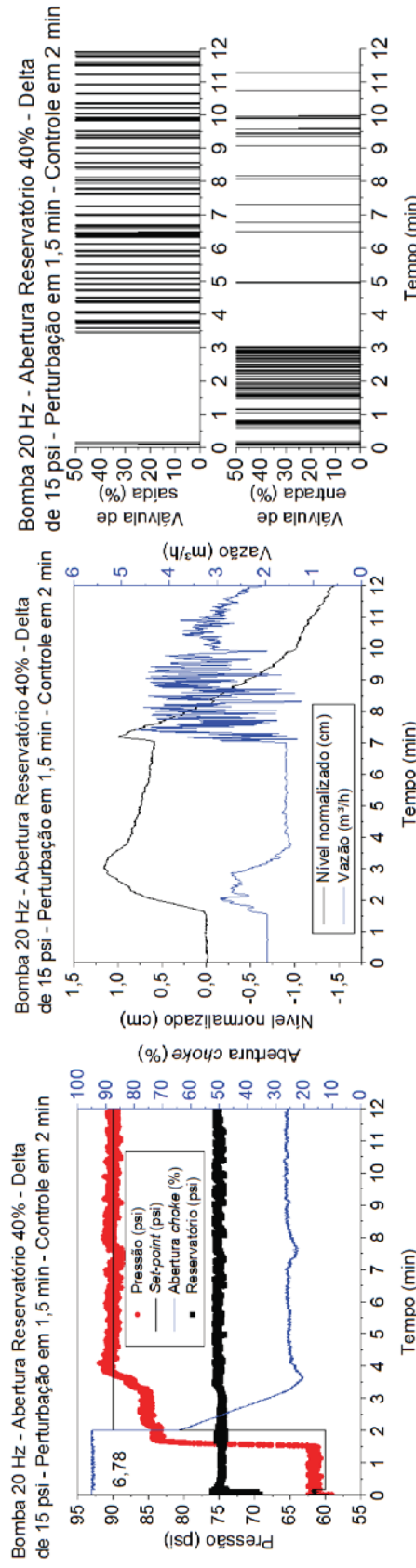


Figura 117 –Regulatório *feedback*. ΔPressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

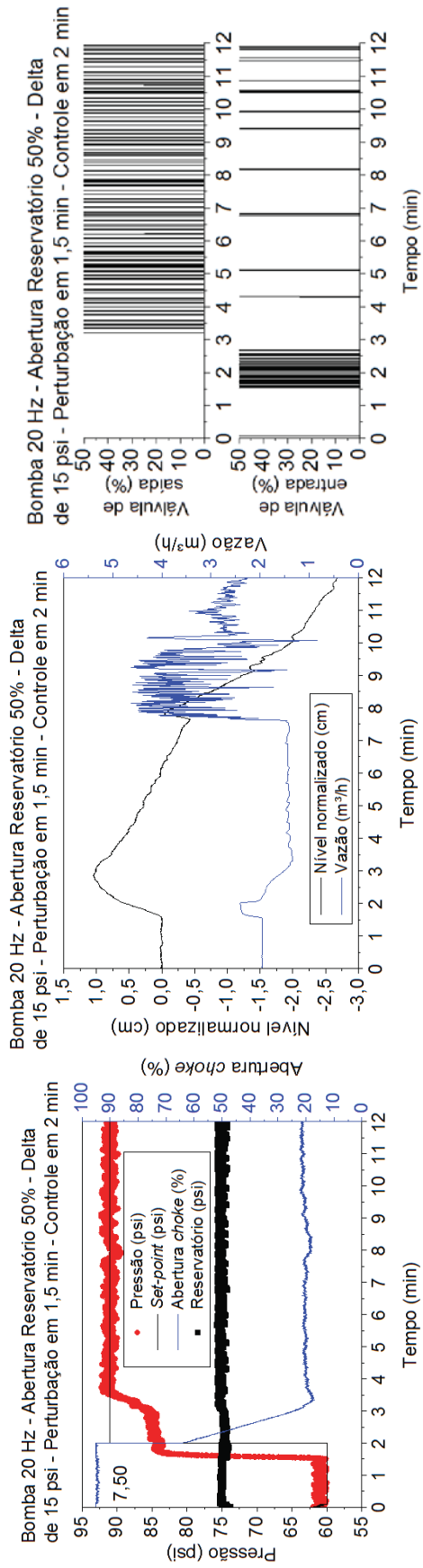


Figura 118 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

Na Figura 119, Figura 120 e Figura 121, uma diferença de pressão anular reservatório de 20 psi foi utilizada:

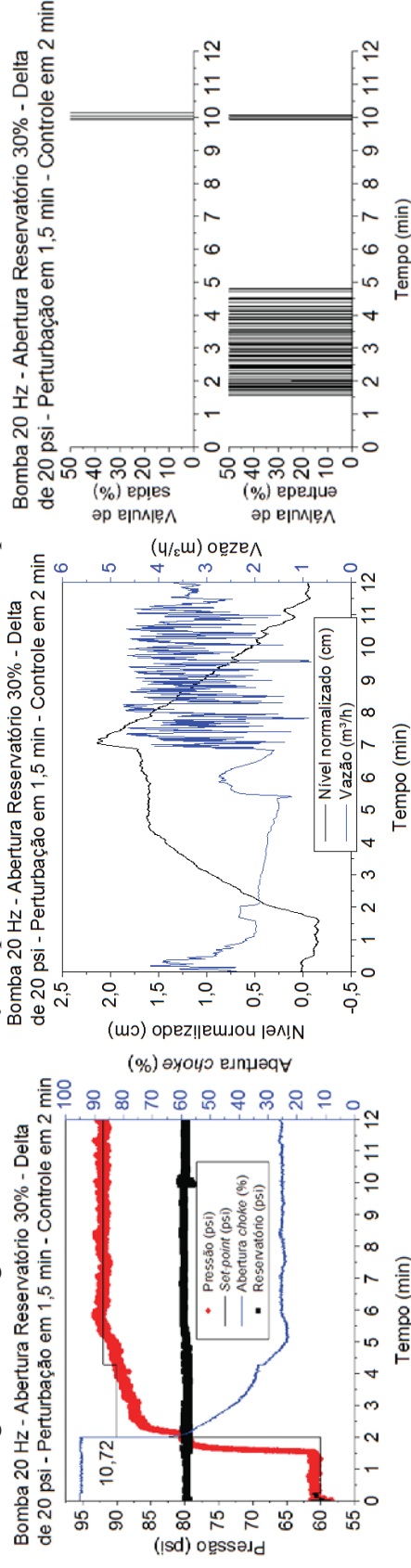


Figura 119 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

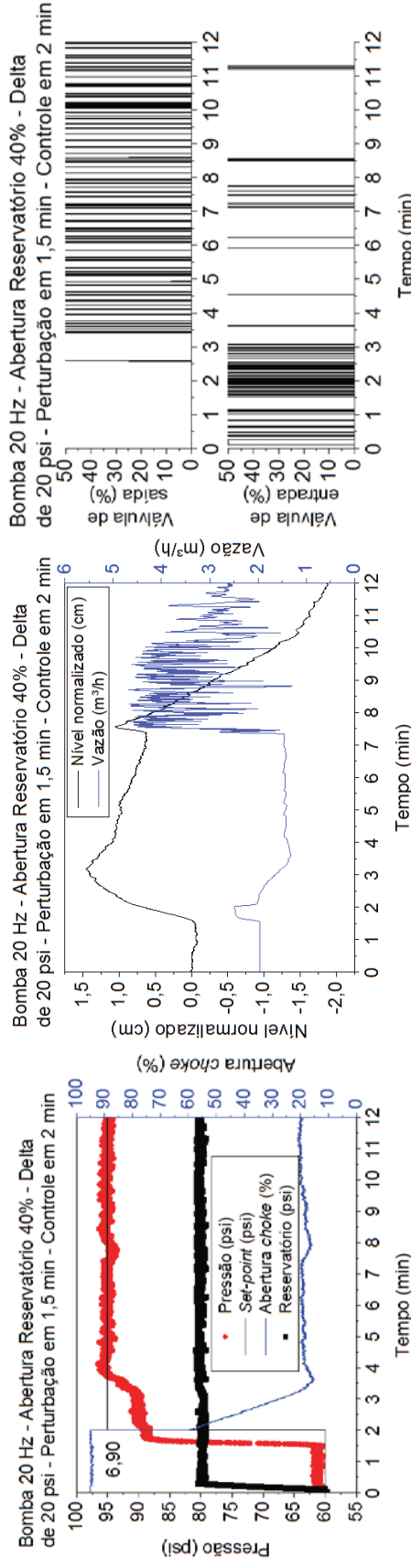


Figura 120 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

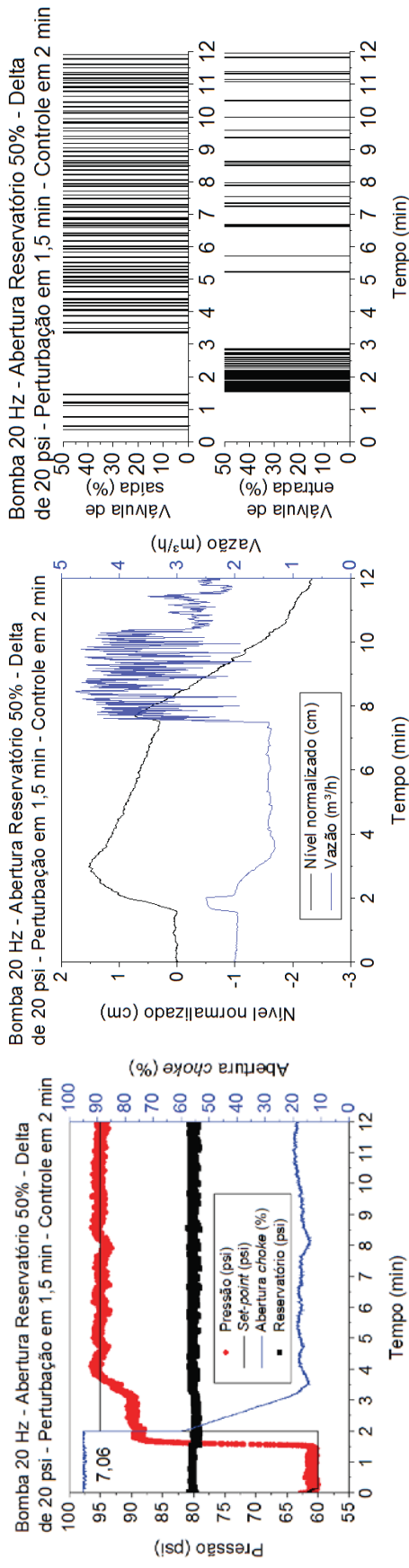


Figura 121 –Regulatório *feedback*.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi.Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Novo *set-point* em 2 min .Pressão no fundo, no reservatório e manipulada (esquerda); Nível e vazão (meio); Controle do reservatório (direita) Fonte: O autor.

## ANEXO H

O ANEXO H apresenta os testes regulatório realizados com a reconfiguração da lei de controle *feedback* ↔ *feedforward*. A perturbação acontecia no minuto 1,5 e o controlador automaticamente identificava o *kick* e mitigava-o mudando a lei de controle *feedback* ↔ *feedforward*. Nos gráficos temos pressões e manipulada (superior, esquerdo); Nível e vazão (superior, direito); ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito):

A Figura 122, Figura 123, Figura 124 apresentam testes realizados com 10 de diferença de pressão anular/reservatório:

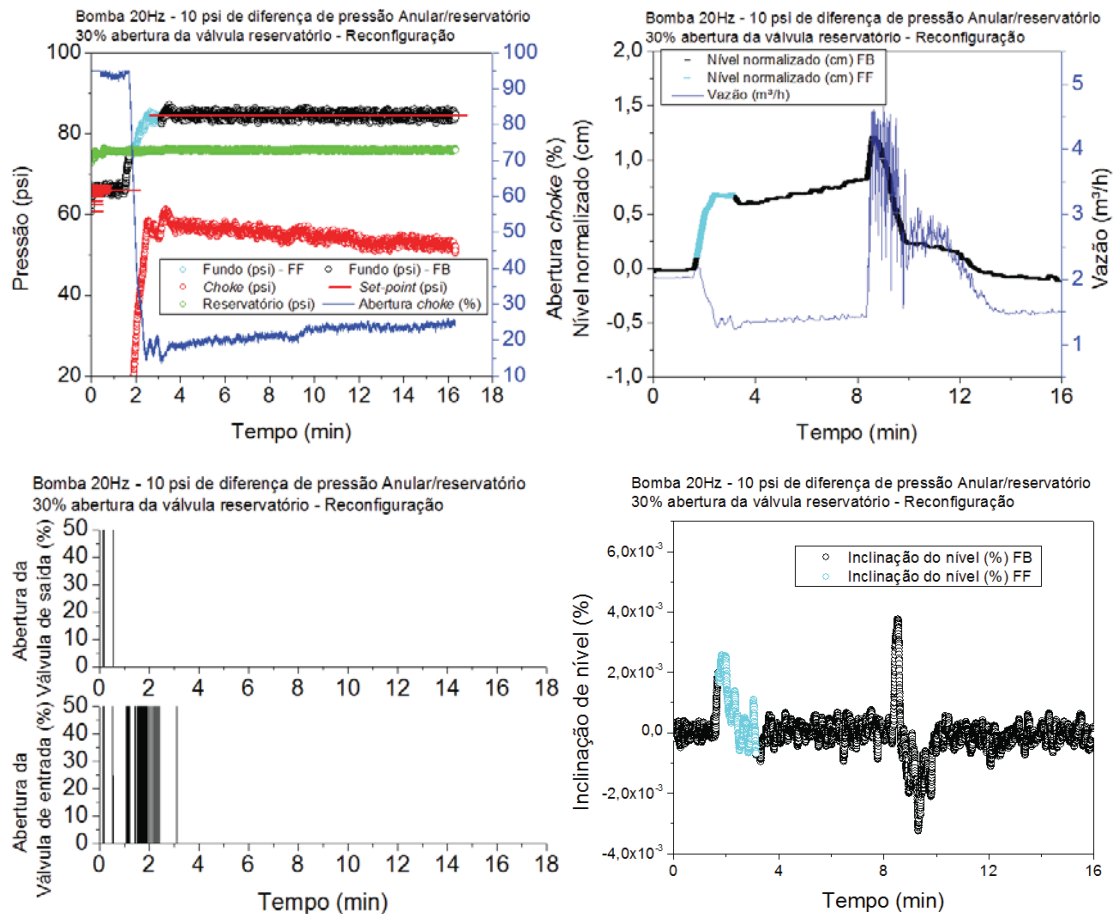


Figura 122 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi. Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

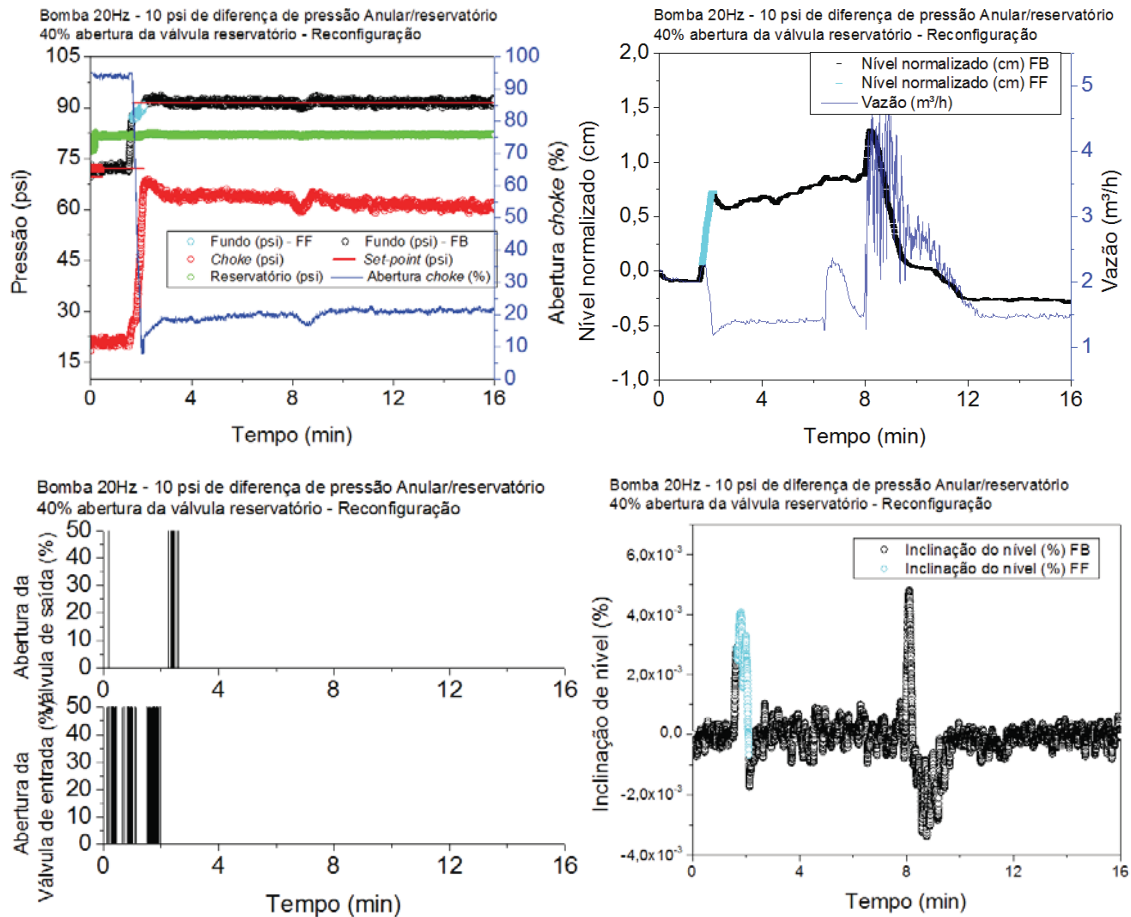


Figura 123 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi. Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.



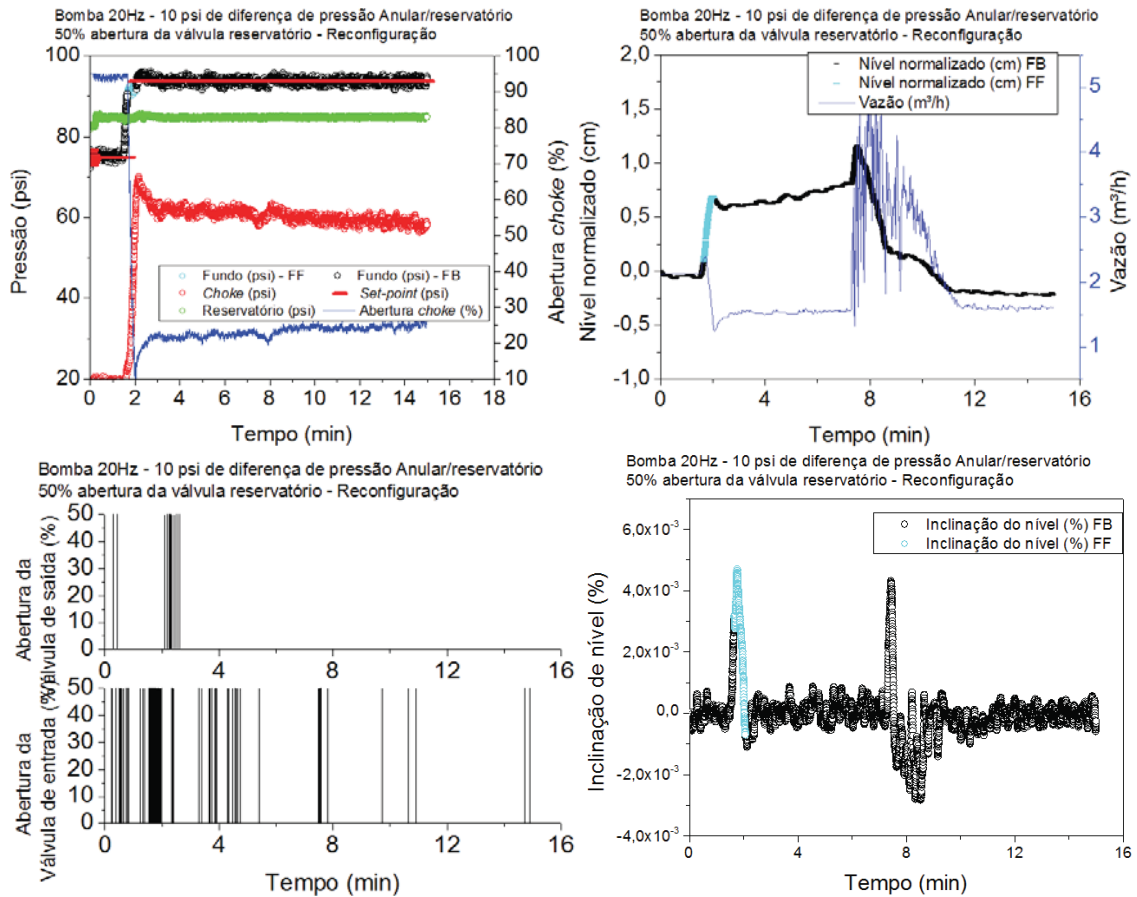


Figura 124 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 10psi. Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

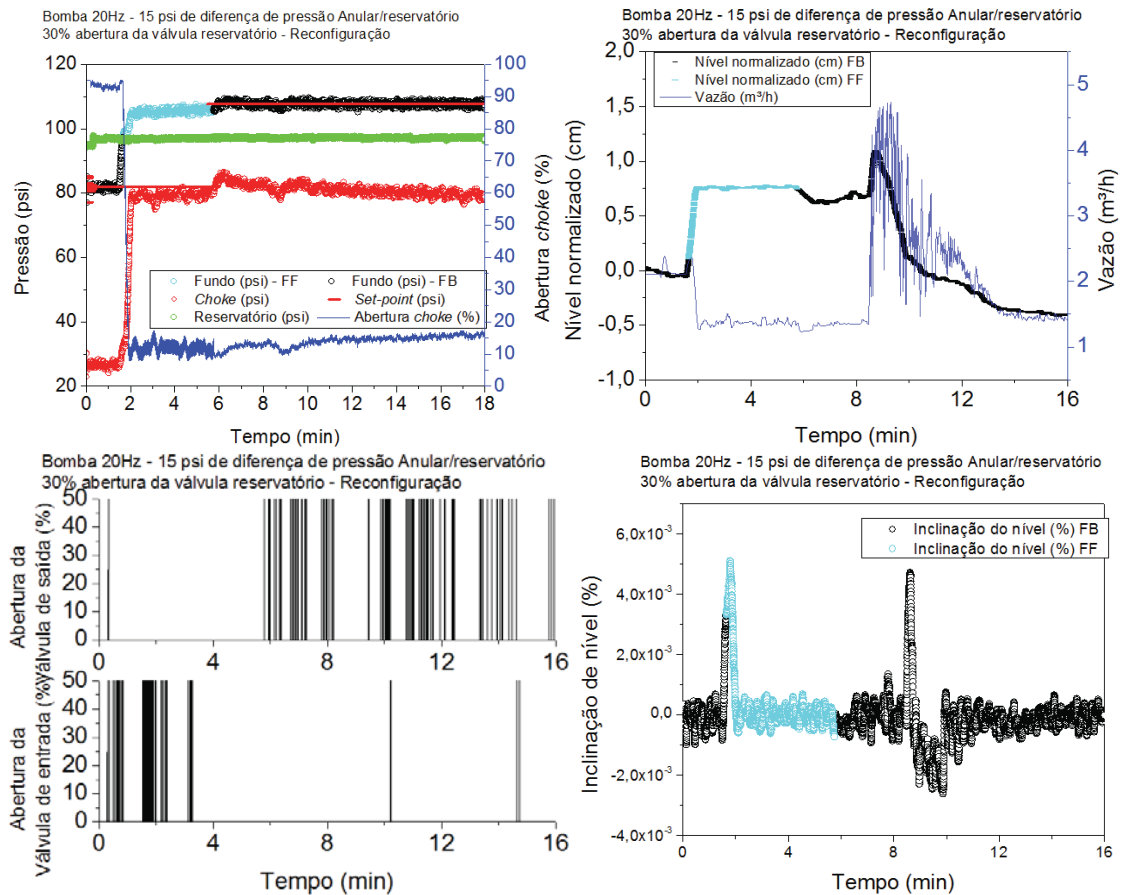


Figura 125 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi. Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

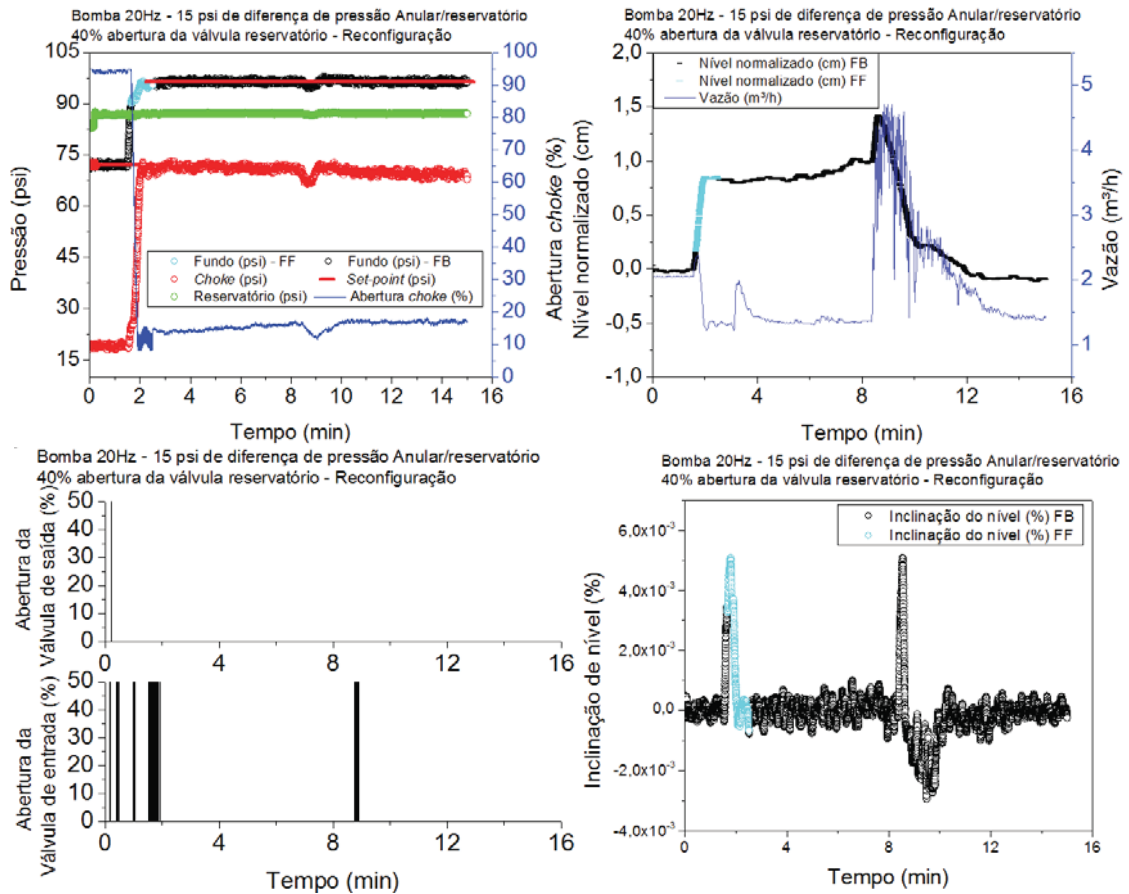


Figura 126 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi. Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

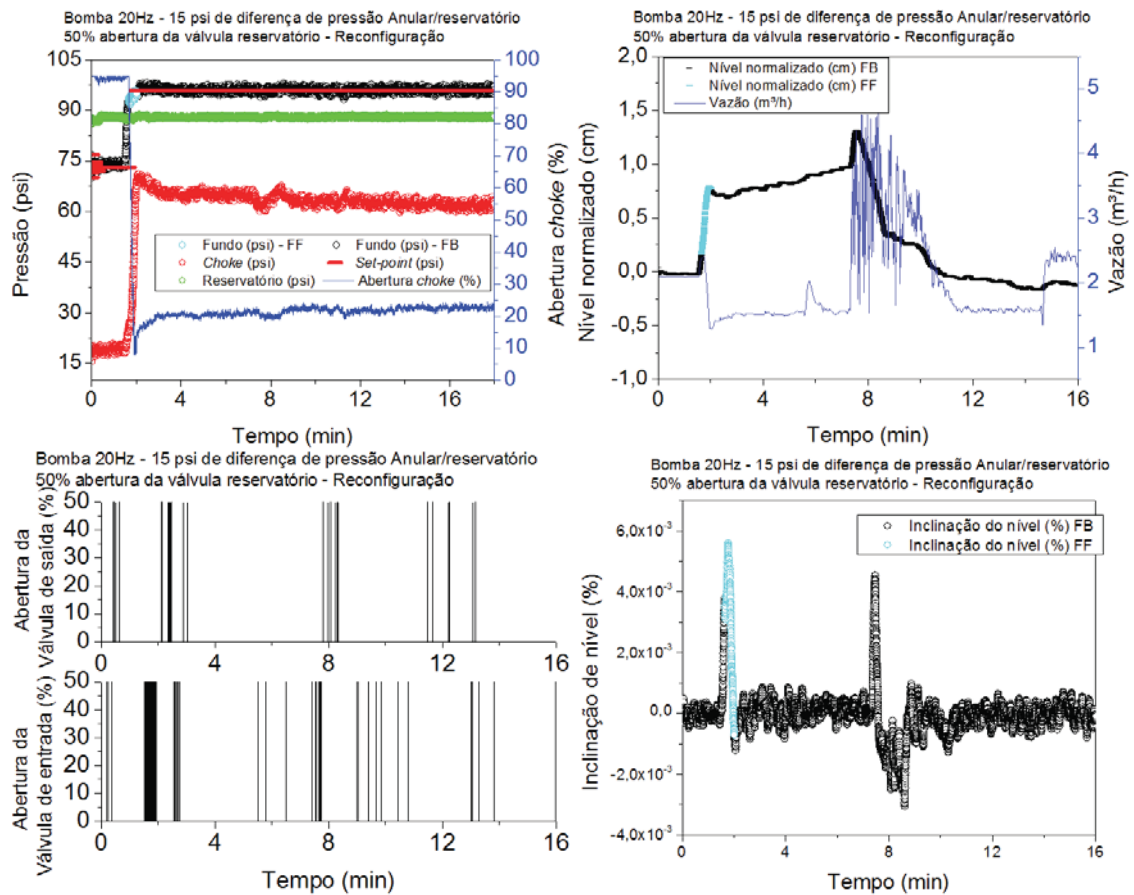


Figura 127 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 15psi. Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

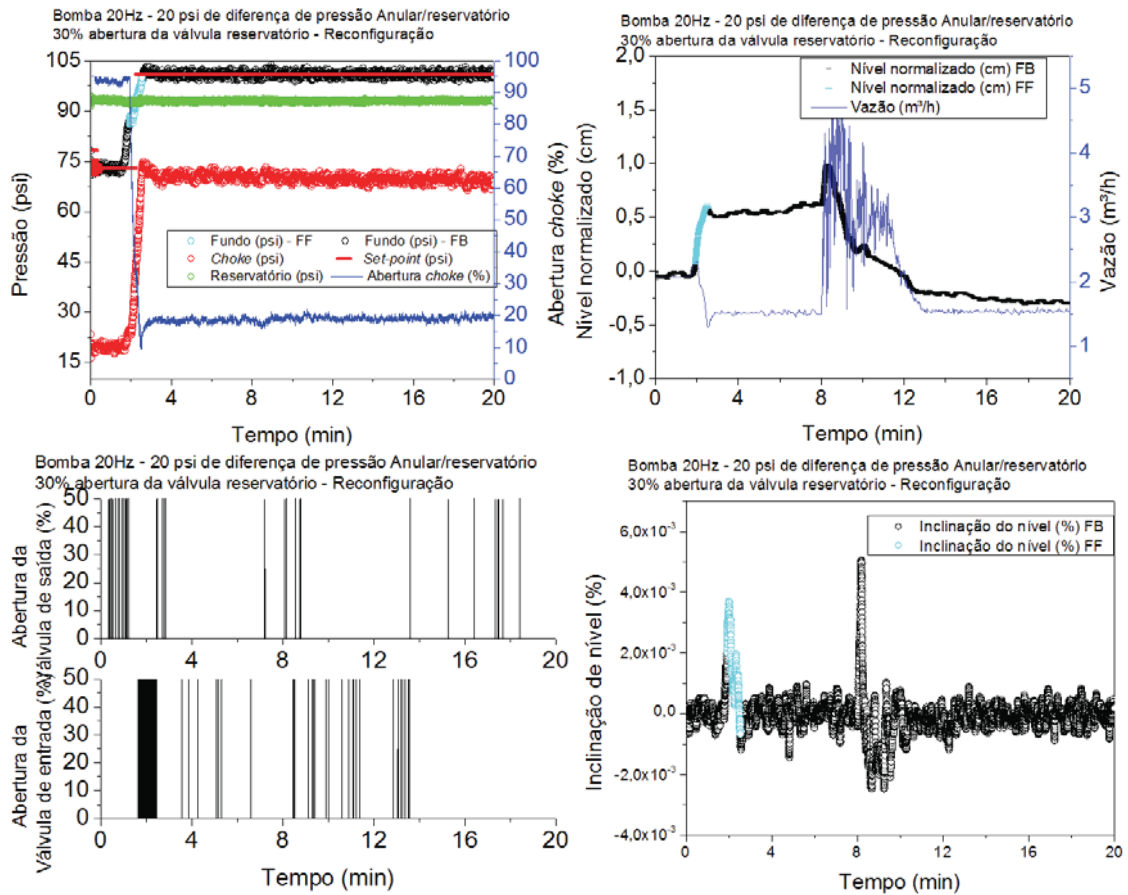


Figura 128 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi. Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

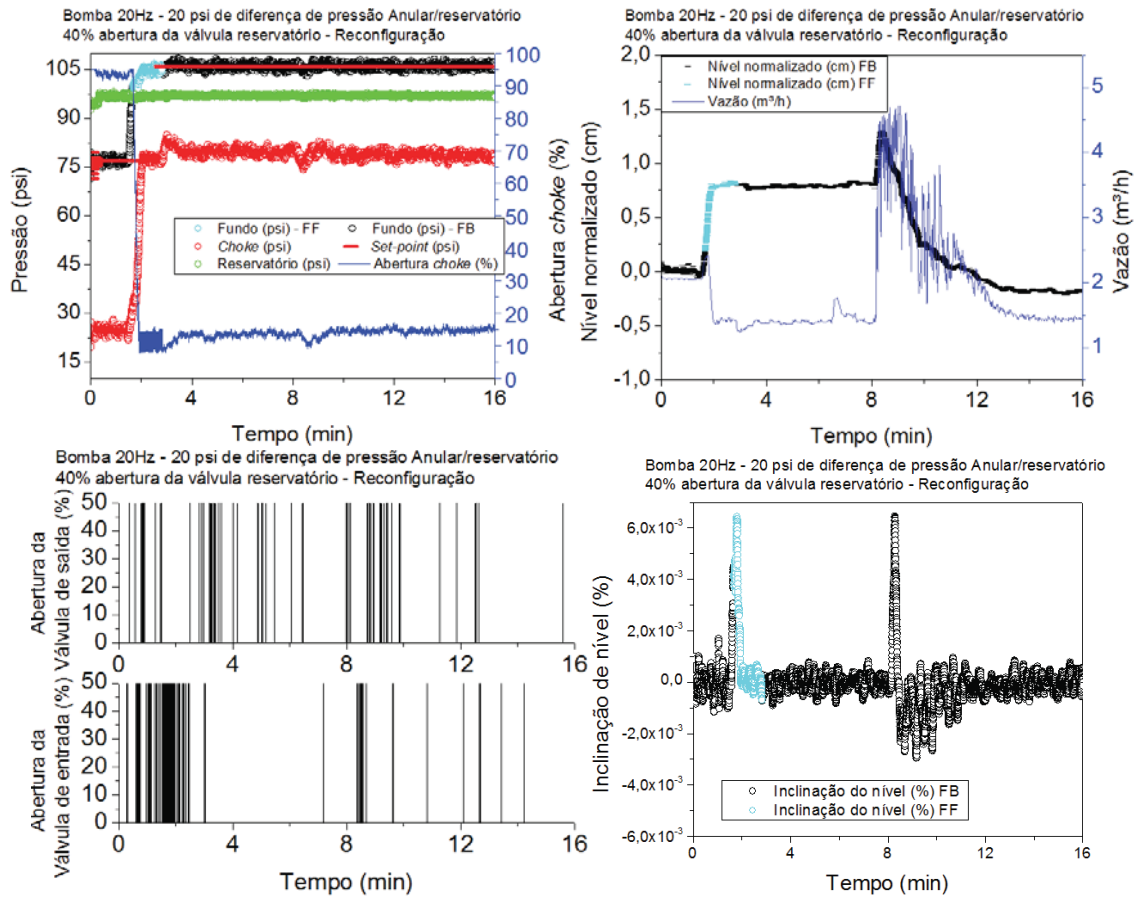


Figura 129 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi. Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

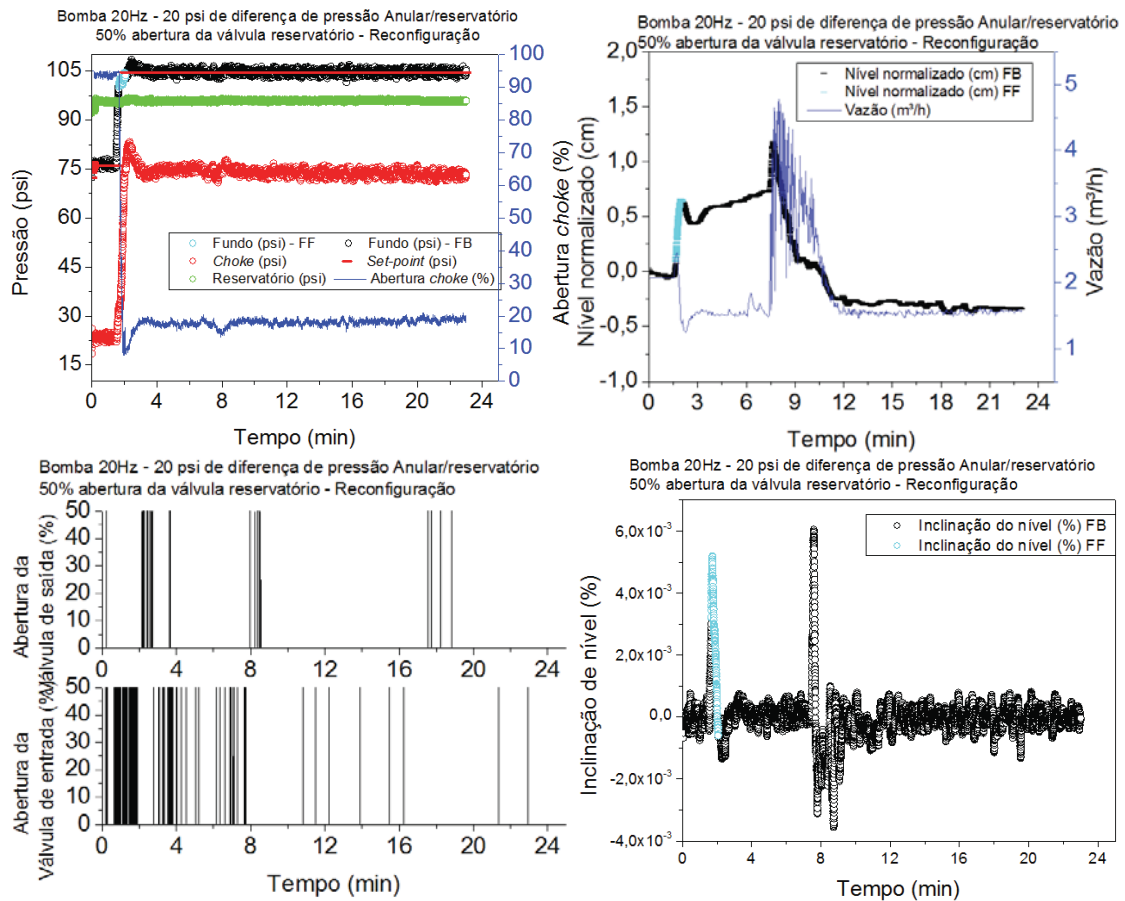


Figura 130 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 20psi. Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

Para a estratégia por reconfiguração da lei de controle foi possível realizar testes com 25 psi de diferença de pressão anular/reservatório e controlar a perturbação. Na estratégia *feedback*, o controle nesta condição operacional não foi possível. A Figura 131, Figura 132 e Figura 133 apresentam os resultados:

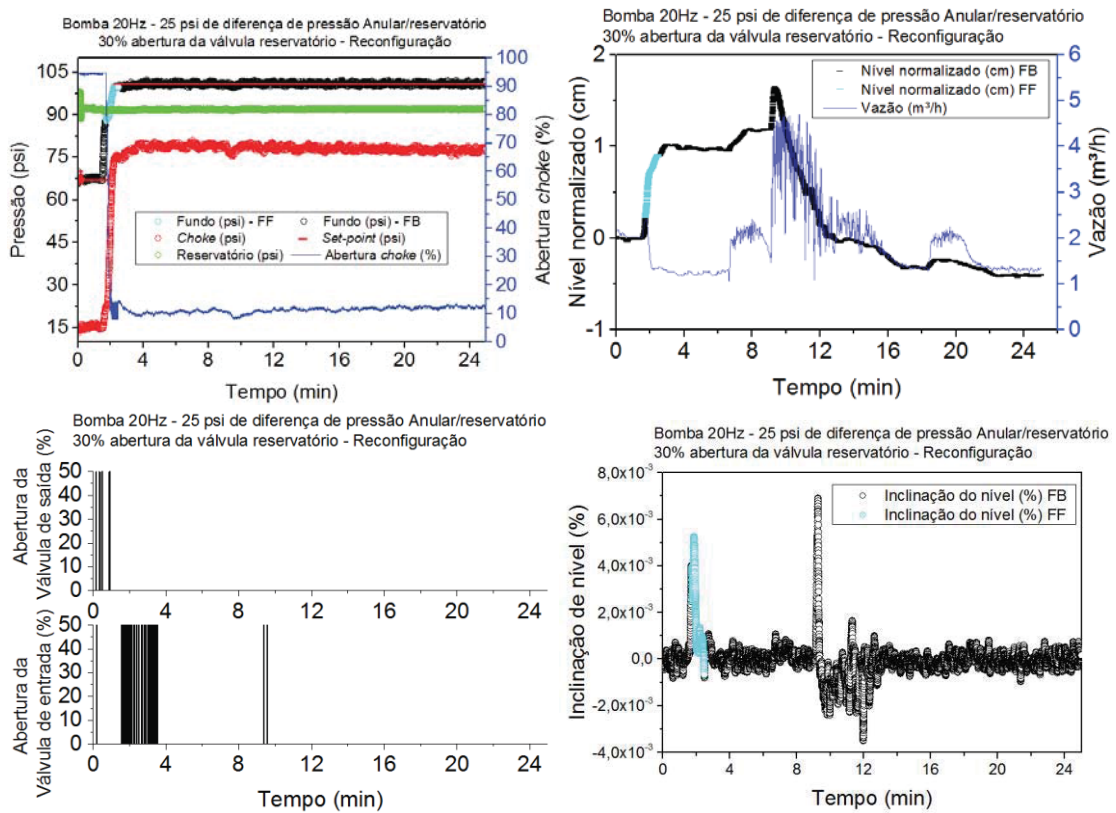


Figura 131 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 25psi. Entrada de gás em 1,5 min (30% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.



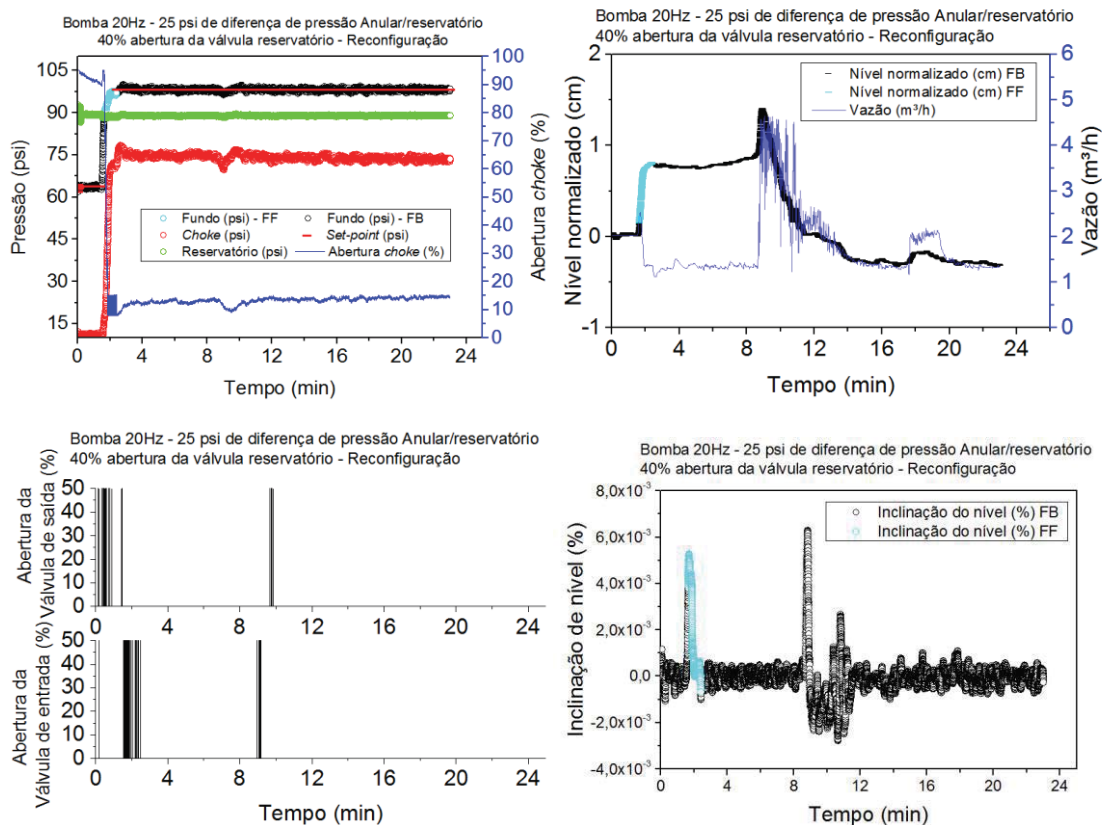


Figura 132 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 25psi. Entrada de gás em 1,5 min (40% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

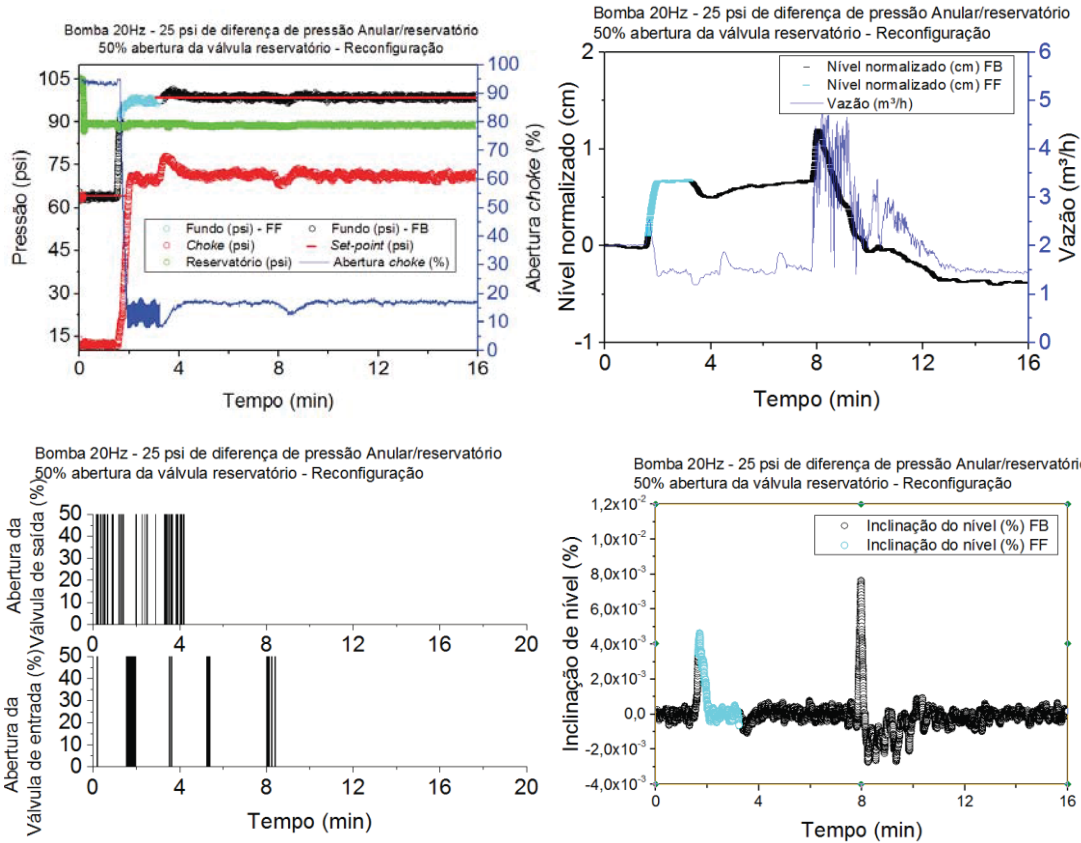


Figura 133 – Regulatório reconfiguração.  $\Delta$ Pressão anular/reservatório 25psi. Entrada de gás em 1,5 min (50% válvula reservatório). Pressões e manipulada (superior, esquerdo), nível e vazão (superior, direito), ação das válvulas de controle da pressão do reservatório (inferior, esquerdo) e inclinação do nível (inferior, direito). Fonte: O autor.

## ANEXO I

### Simulação do *kick* de gás em malha aberta e comparação com o experimental

As simulações do *kick* de gás em malha aberta para 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório são apresentadas pela Figura 134.

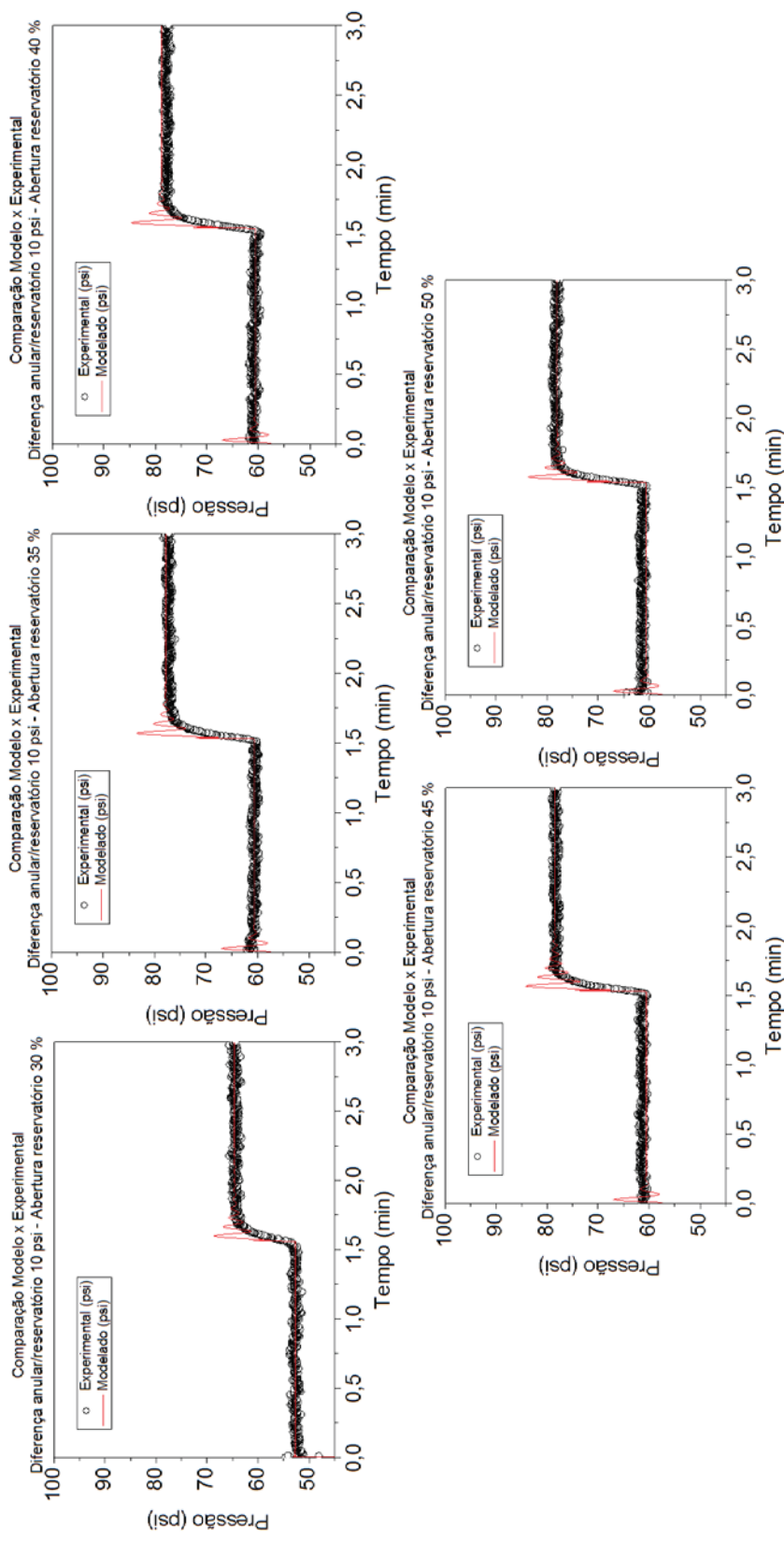


Figura 134 - Simulação de *kick de gás* em malha aberta com entrada de gás em 1,5 minutos de teste. 10 psi de diferença de pressão anular/reservatório e diversas aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor.

As simulações do *kick* de gás em malha aberta para 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório são apresentadas pela Figura 135.

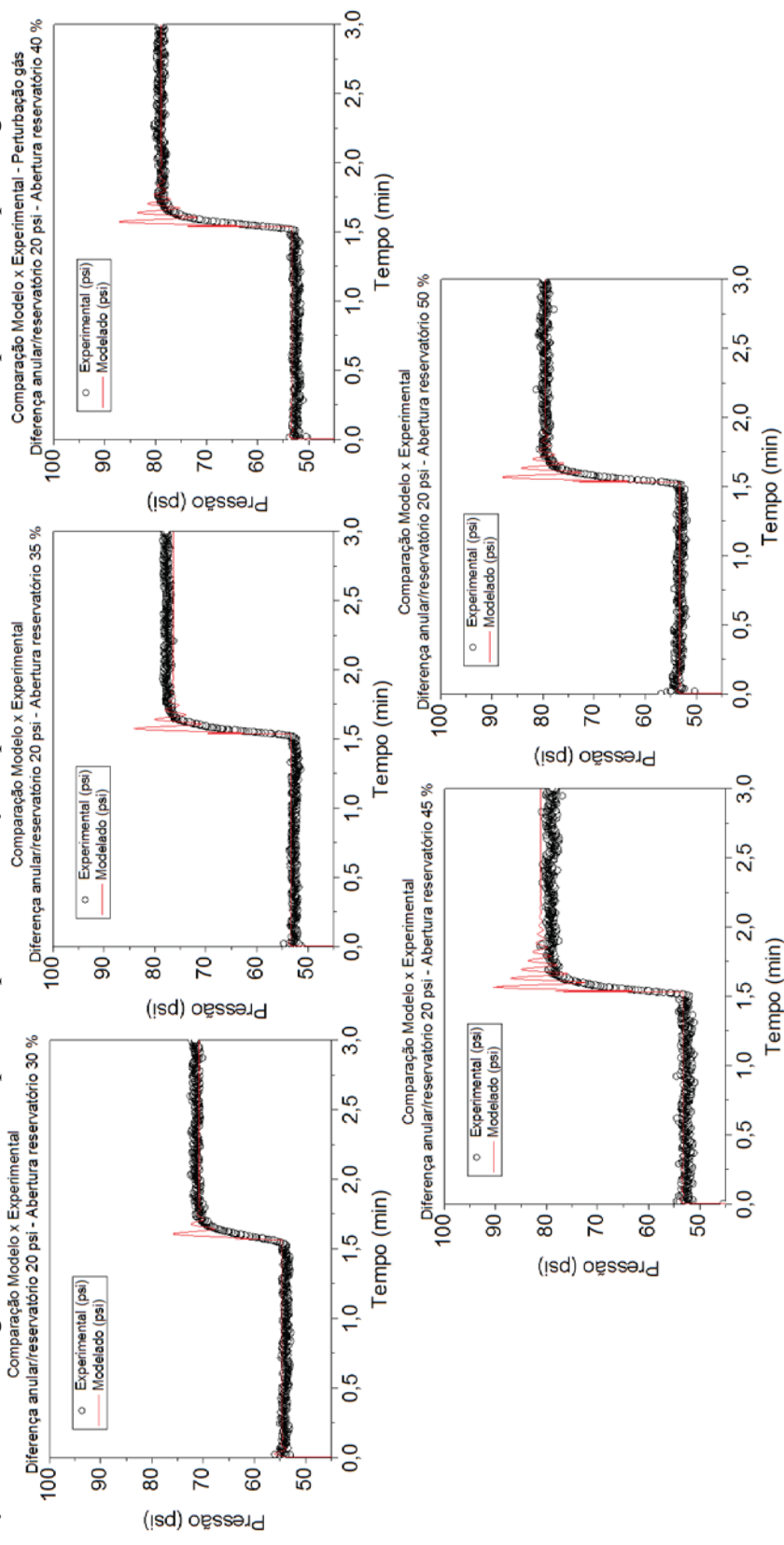
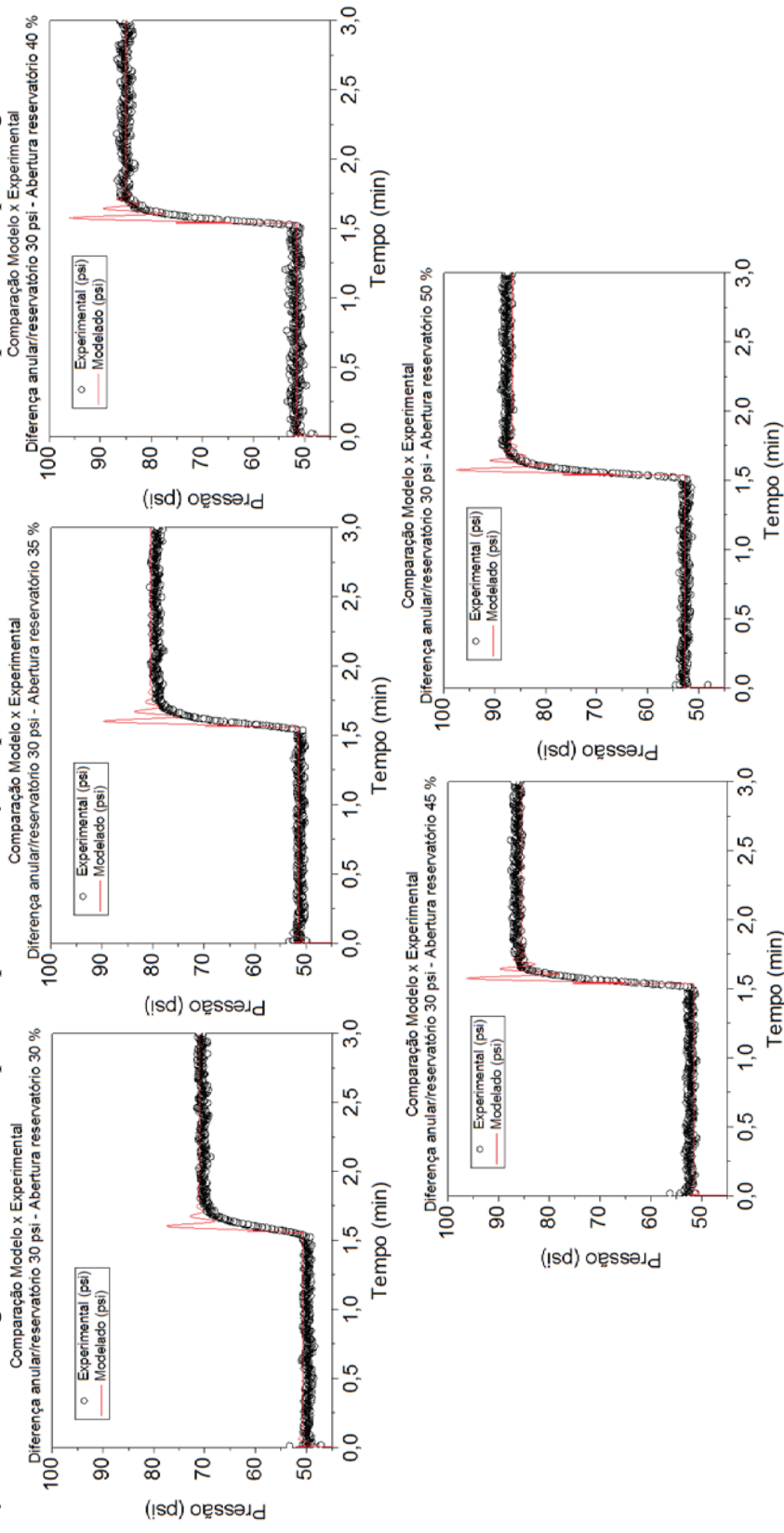


Figura 135 - Simulação de *kick de gás* em malha aberta com entrada de gás em 1,5 minutos de teste. 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório e diversas aberturas da válvula reservatório. Fonte: O autor.

As simulações do *kick* de gás em malha aberta para 20 psi de diferença de pressão anular/reservatório são apresentadas pela Figura 135.



## Simulação de testes regulatório: Estratégia *feedback*

As simulações dos testes regulatório com estratégia *feedback* são apresentados pela Figura 136, Figura 137, Figura 138, Figura 139, Figura 140, Figura 141, Figura 142, Figura 143 e Figura 144.

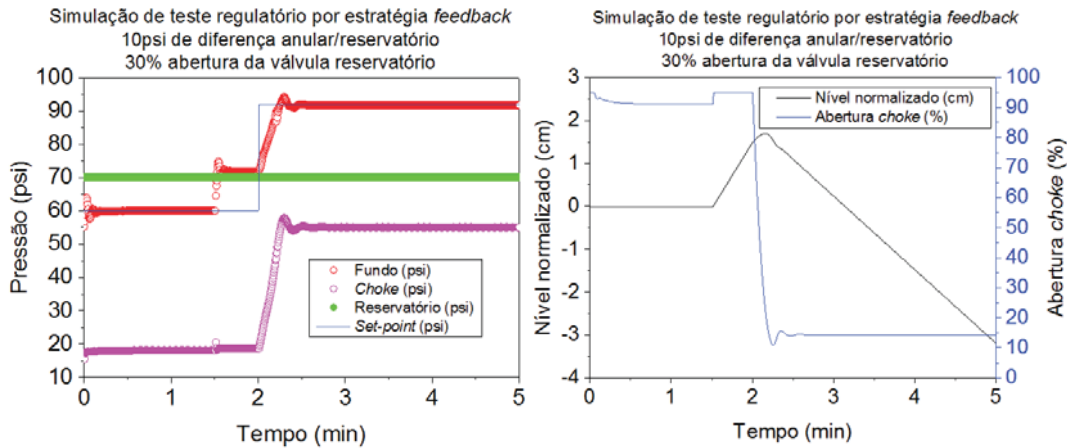


Figura 136 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor.

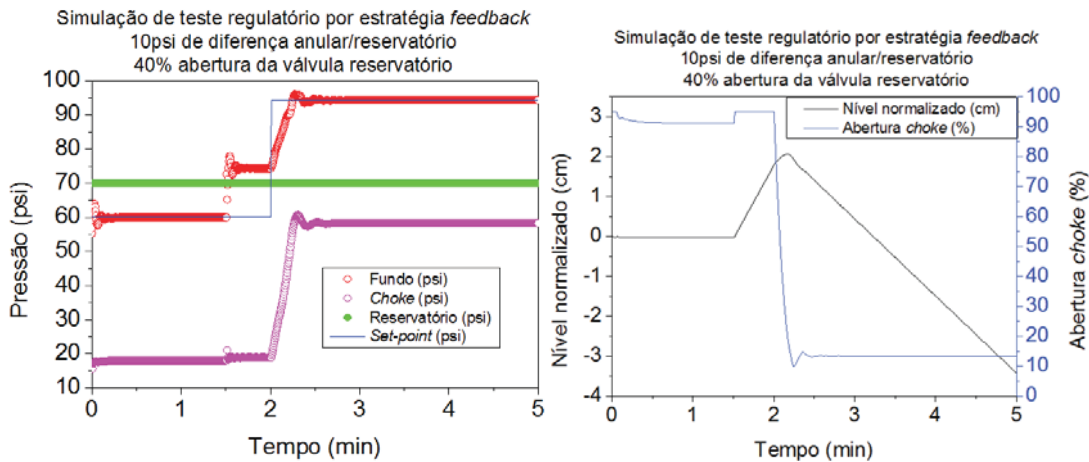


Figura 137 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 40%. Fonte: O autor.

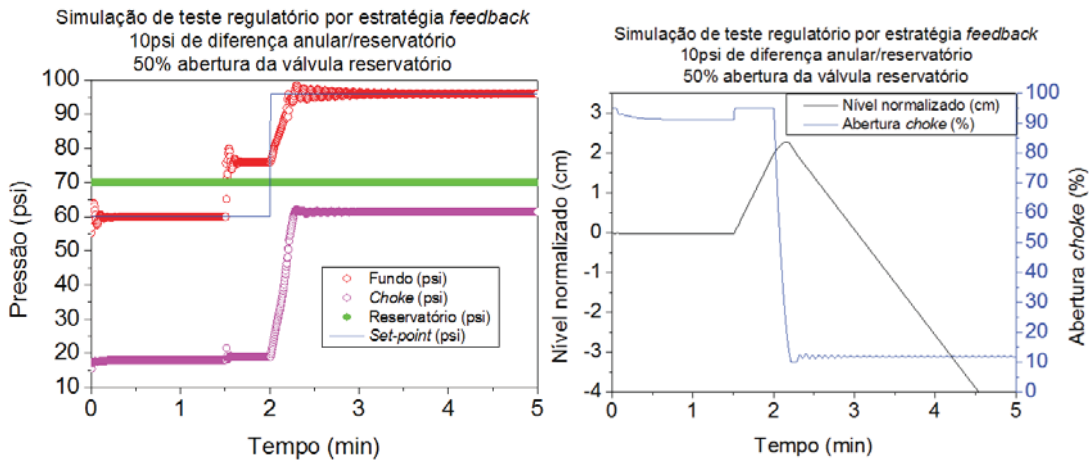


Figura 138 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 10 psi e abertura da válvula reservatório em 50%. Fonte: O autor.

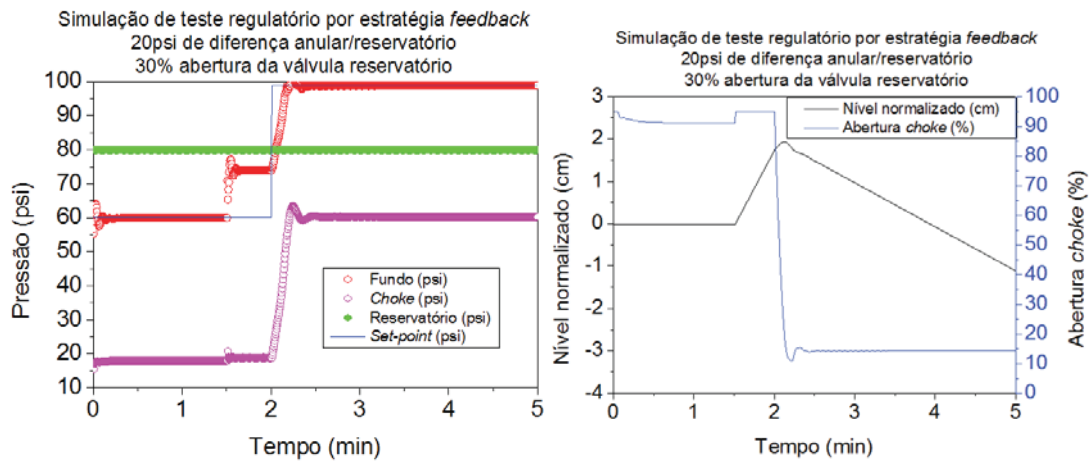


Figura 139 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 20 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor.

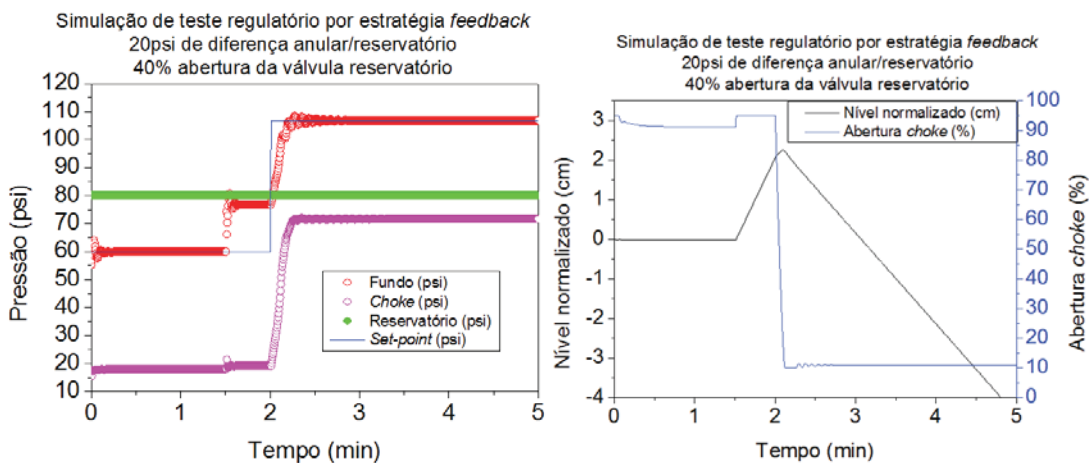


Figura 140 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 20 psi e abertura da válvula reservatório em 40%. Fonte: O autor.

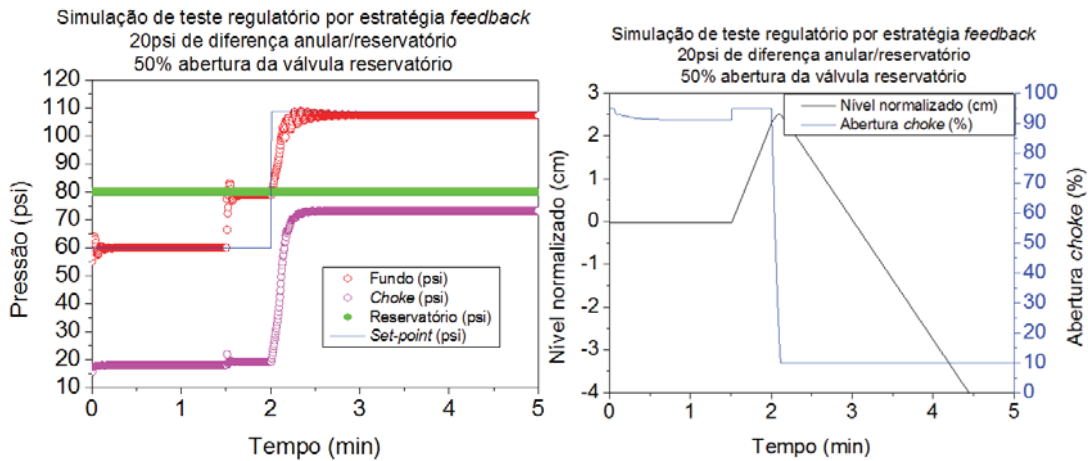


Figura 141 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 20 psi e abertura da válvula reservatório em 50%. Fonte: O autor.

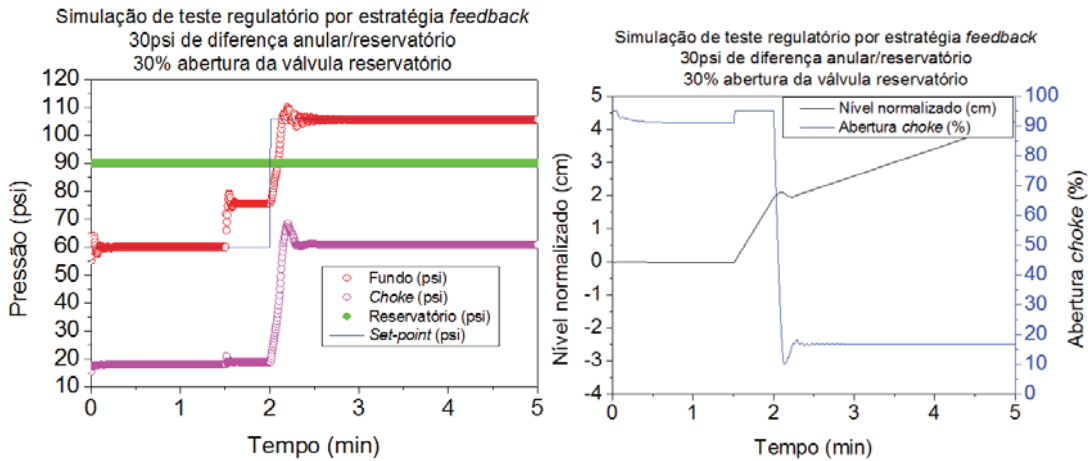


Figura 142 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 30%. Fonte: O autor.

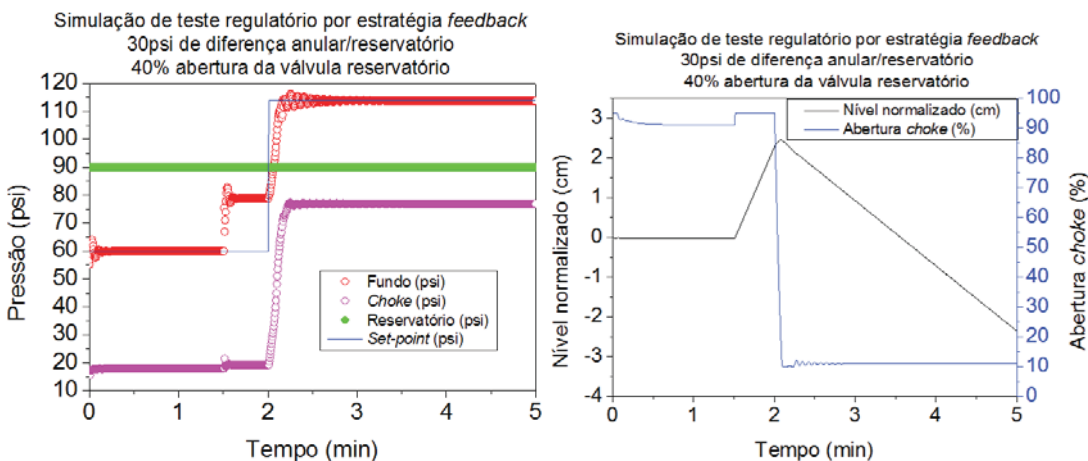


Figura 143 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 40%. Fonte: O autor.



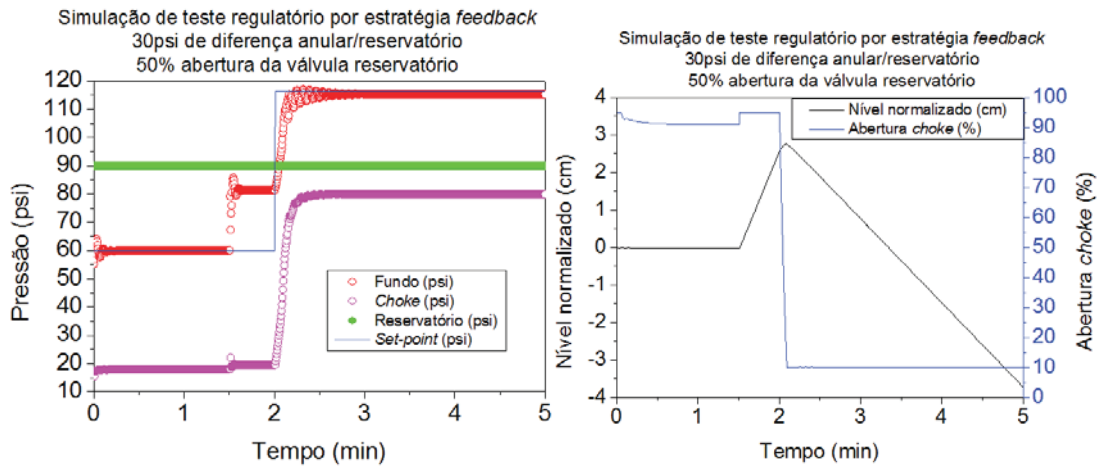


Figura 144 - Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle estratégia *feedback*. Diferença de pressão 30 psi e abertura da válvula reservatório em 50%. Fonte: O autor.

## Simulação de testes regulatório: Estratégia com Reconfiguração de controle

As simulações dos testes regulatório empregando-se estratégia com reconfiguração de controle são apresentados pela Figura 145, Figura 146, Figura 147, Figura 148, Figura 149, Figura 150, Figura 151, Figura 152 e Figura 153.

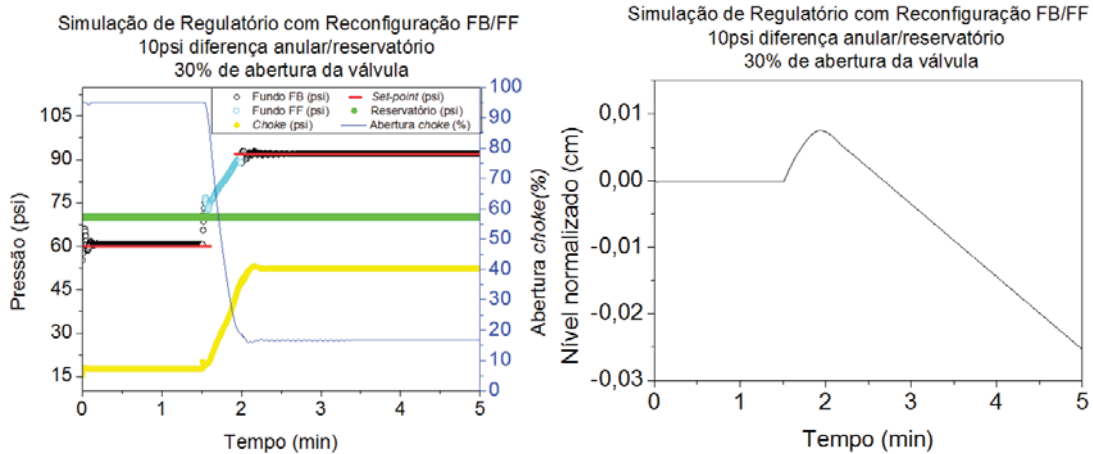


Figura 145 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

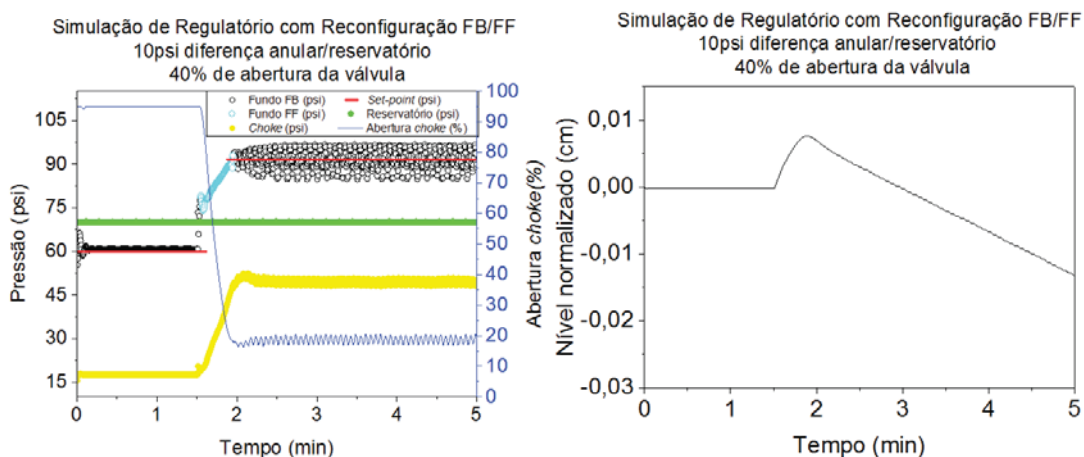


Figura 146 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 40% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

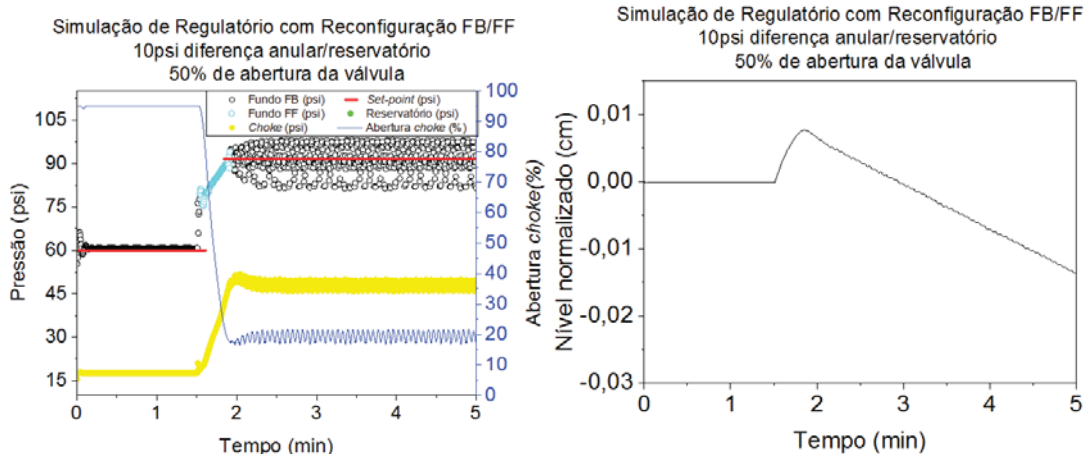


Figura 147 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 10 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

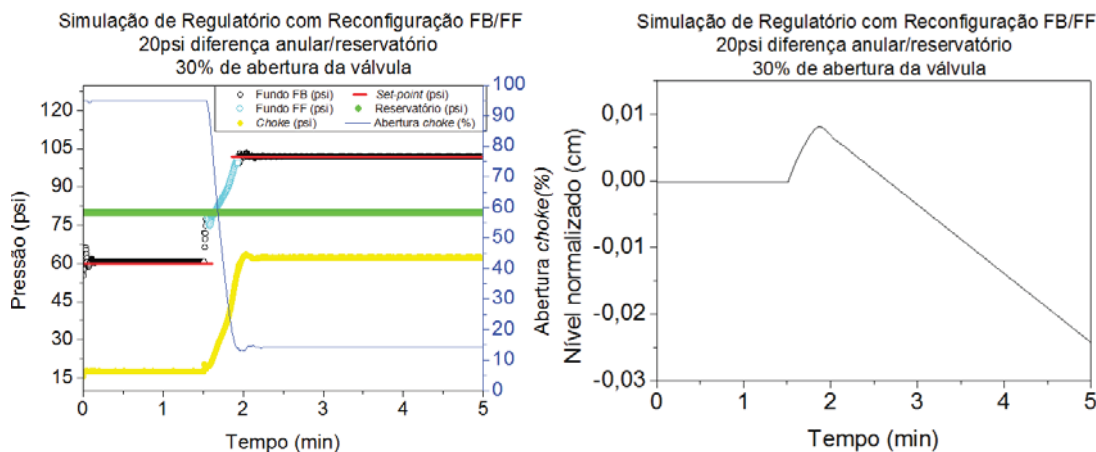


Figura 148 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

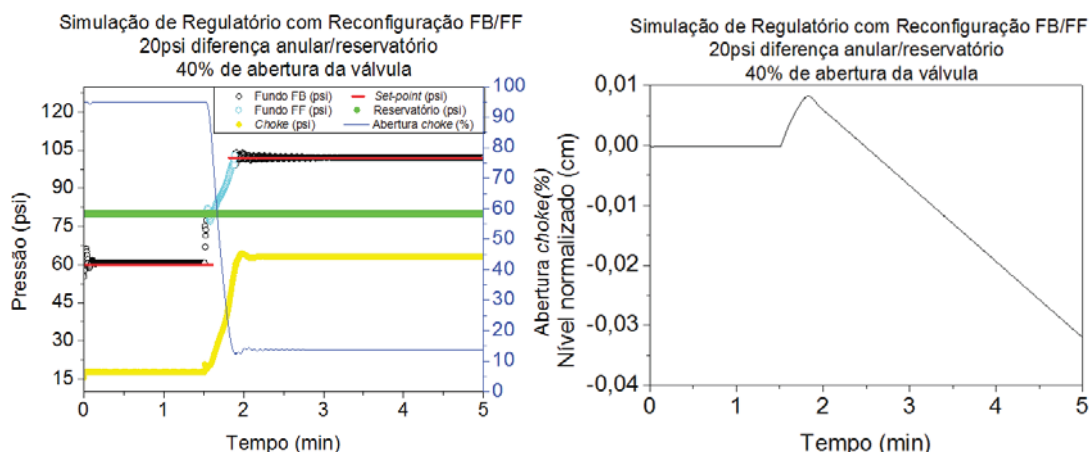


Figura 149 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 40% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

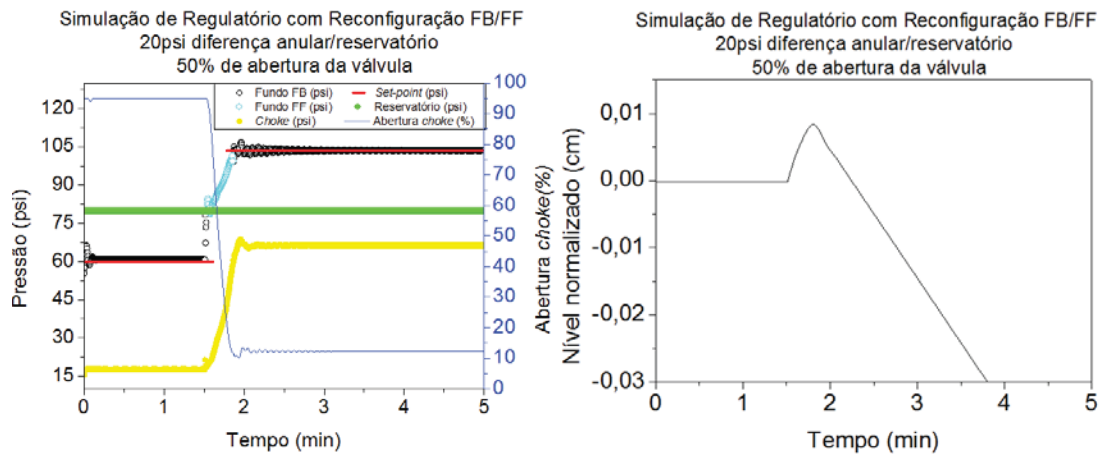


Figura 150 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

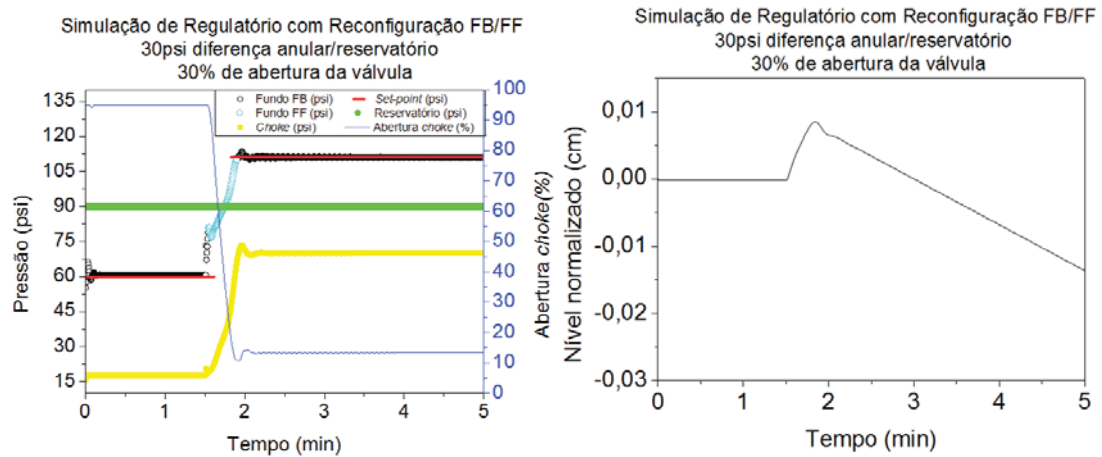


Figura 151 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 30 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 30% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

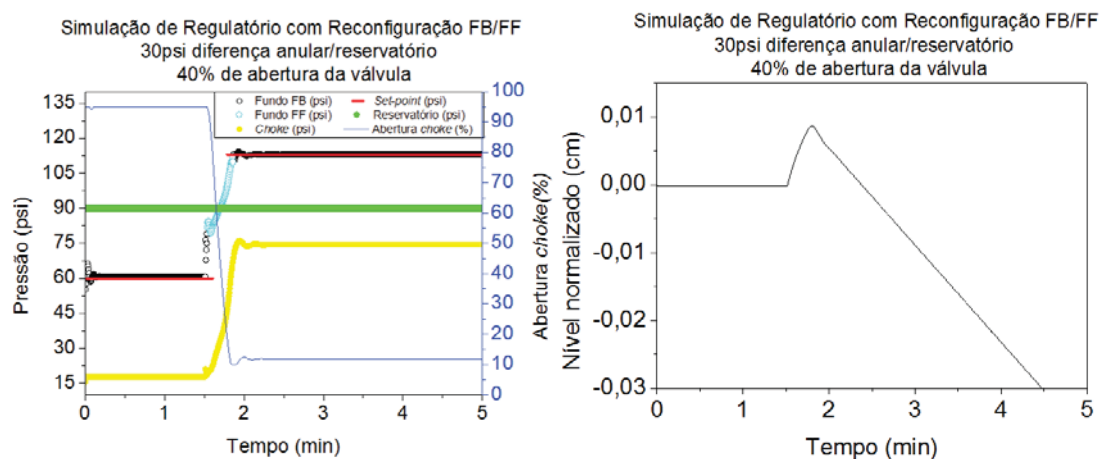


Figura 152 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.

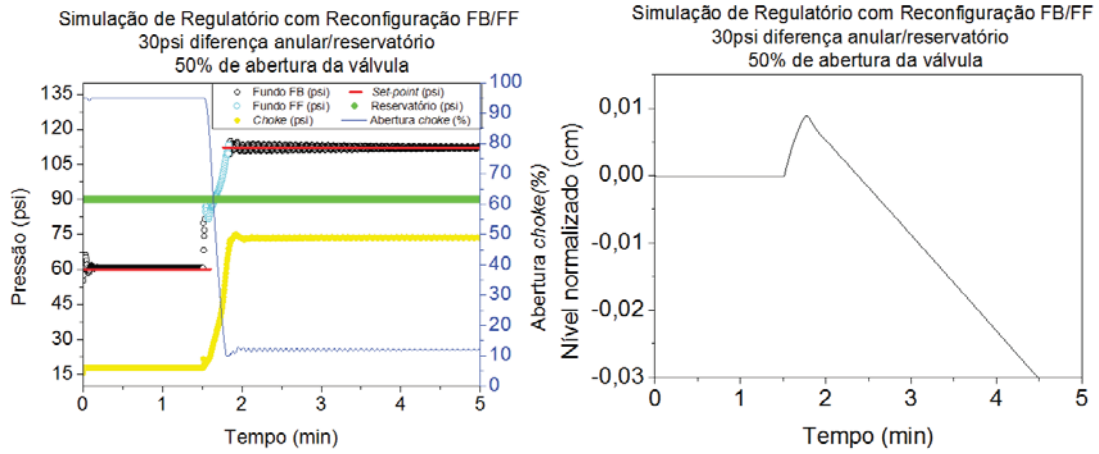


Figura 153 – Simulação de teste regulatório com entrada de gás em 1,5 minutos de teste e controle por reconfiguração da lei de controle. 20 psi e diferença de pressão anular/reservatório e 50% de abertura da válvula reservatório. Fonte: O autor.