

**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**CARLOS ALEXIS ALVARADO SILVA**

**O MÉTODO *GAIN SCHEDULING* NO CONTROLE DA PRESSÃO NA  
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Guaratinguetá - SP  
2016

**CARLOS ALEXIS ALVARADO SILVA**

**O MÉTODO *GAIN SCHEDULING* NO CONTROLE DA PRESSÃO NA  
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado

Guaratinguetá - SP  
2016

Silva, Carlos Alexis Alvarado  
S586m O Método Gain Scheduling no Controle da Pressão na Perfuração de Poços de Petróleo / Carlos Alexis Alvarado Silva – Guaratinguetá, 2016.  
163 f : il.  
Bibliografia: f. 113-116

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.  
Orientador: Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado

1. Poços de petróleo. 2. Engenharia de petróleo. 3. Petróleo.I. Título

CDU 622.323(043)

*CARLOS ALEXIS ALVARADO SILVA*

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: Projetos


APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. VICTOR ORLANDO GAMARRA ROSADO  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. MAURICIO GUIMARÃES DA SILVA  
IAE/ITA

## **DADOS CURRICULARES**

### **CARLOS ALEXIS ALVARADO SILVA**

NASCIMENTO 15.10.1989 – TRUJILLO/PERÚ

FILIAÇÃO Rosa del Pilar Silva Portilla  
Teodoro Edilberto Alvarado Alayo

2009/2013 Curso de Graduação  
Engenharia Mecânica – Universidad Nacional de Trujillo

*De modo especial, a mi Sassy por su fuerza y su amor incondicional, y a mi hijo que viene en camino, que sin conocerlo aún, fue mi fuente de incentivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça.

à minha mãe Rosa del Pilar, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivou meus estudos.

ao meu pai Teodoro, que com seu esforço e trabalho sempre tentou fazer o que era melhor para à minha família.

ao meu orientador, o Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado, pela oportunidade brindada.

à Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, por me acolher em suas salas de estudo.

à Agencia Nacional de Petróleo (ANP) programa PRH48, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

às pessoas que me brindaram de seu tempo e conhecimentos, meus professores o Dr. Fernando de Azevedo Silva e Dr. Mauro Hugo Mathias, e amigos, Alex e o Santiago.

ALVARADO, S. C. A. **O método *gain scheduling* no controle da pressão na perfuração de poços de petróleo.** 2016. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## RESUMO

Controlar a pressão de poços petrolíferos durante a perfuração pode ser um dos processos mais complexos e perigosos da etapa de exploração. O sistema de perfuração varia constantemente e aleatoriamente, isto principalmente, devido à mudança da profundidade de perfuração, a qual faz variar outros parâmetros do processo. Assim, a aplicação de um controle variante no tempo torna-se necessário. Este estudo propõe o projeto de um controlador *Gain Scheduling* (GS) no controle da pressão no fundo de poços durante a perfuração. Este controlador GS consiste na sintonia dos ganhos relacionados aos diferentes pontos operacionais, para este caso, a profundidade do poço. Primeiro, apresentam-se as teorias a serem utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho. Segundo, obtém-se o modelo matemático do processo o qual se fundamenta na mecânica dos fluidos. Da linearização do modelo, a função de transferência resultante apresenta um elemento integrador o que faz que a dinâmica do processo seja difícil de manipular. Também se adiciona um tempo de atraso, o que torna mais complexo o controle do processo. Na terceira parte, utilizaram-se três tipos de metodologias IMC (*Internal Model Control*) para sintonizar os ganhos do controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para diferentes profundidades de perfuração procurando o melhor desempenho, estabilidade e robustez do sistema. Finalmente, escolhe-se a estratégia de melhor desempenho (IMC de dois graus de liberdade) para especificar e montar a tabela do controlador GS, o qual é avaliado mediante simulações de problemas que geralmente ocorrem durante a perfuração, considerados como distúrbios, que verificam a sua viabilidade. Também, os resultados do sistema controlado por GS são comparados com os resultados de um outro controlador do tipo adaptativo de modelo de referência (CAMR). Verificando também melhor desempenho o controlador GS diante do CAMR.

**PALAVRAS CHAVE:** Gerenciamento da pressão de perfuração, perfuração de poços, controle da pressão em poços petrolíferos, controlador IMC, controlador *Gain Scheduling*.

ALVARADO, S. C. A. **The gain scheduling method in the pressure control in the oil wells drilling**. 2016. 163 f. Dissertation (Degree of Master of Science in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## ABSTRACT

Controlling the pressure of oil wells during drilling can be one of the most complex and dangerous processes of exploration stage. The drilling system is constantly end randomly changing due, among other things, the drilling depth, which varies other process parameters, accordingly to apply a time variant control becomes necessary. This study proposes the design of a Gain Scheduling controller to control the pressure at the bottom of wells during drilling. The GS controller is based on the corresponding tuning gains at different operating points in this case, the depth. First, presents the theories that will be used during development work. In the second part, was obtained a mathematical model of the process which is based on fluid mechanics. In the linearization of the, the final transfer function presents an integrating element which makes the process dynamics more difficult to handle. It becomes even more complex in the presence of time delay. In the third part, three IMC controllers' types were used to tuning the PID (Proportional, Integral and Derivative) controller gains for different depths of drilling looking for the best performance, stability and robustness. Finally, was chose the best performing strategy (IMC of two degrees of freedom) to specify and assemble the GS controller table, which is evaluated by simulations of problems that usually occur during drilling, considered as disturbances, which check its viability. Also, the results of the controlled GS system are compared with the results of another adaptive controller model of model reference (MRAC). Also verifying that the GS controller presents better performance than MRAC.

**KEYWORDS:** Manage Pressure Drilling, Wells drilling, Control of oil wells pressure, IMC controller, Gain Scheduling controller.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema fechado de recirculação de lama.....	28
Figura 2.2 - Tipos de brocas de perfuração mais empregadas. (a) Brocas com insertos (dentes) de Tungstênio. (b) Brocas de dente de aço. (c) Brocas PDC.....	30
Figure 2.3 - Representação da faixa de perfuração entre pressões características da zona geológica.....	31
Figure 2.4 - (a) Fissura da formação por causa de maior pressão de Poro. (b) Fissura da formação por causa de menor pressão de Fratura.....	32
Figura 2.5 - Sistema de Perfuração com MPD. A válvula e a bomba de contrapressão adiciona uma pressão mais ao sistema.....	34
Figura 2.6 - Conjunto de válvulas automatizadas de controle de pressão do poço durante a perfuração.....	36
Figura 2.7 - Tipos de respostas em malha aberta.....	40
Figura 2.8 - Componentes típicos no controle industrial em malha fechada.....	41
Figura 2.9 - Resposta de um processo ao degrau sem termo integral no controlador.....	44
Figura 2.10 - (a) Estrutura do controlador IMC (b) Arranjo de diagrama de blocos para um controlador clássico.....	47
Figura 2.11 - Estrutura de sistema retroalimentado com filtro no sinal de entrada proposto por Jin e Liu (2014).....	55
Figura 2.12 - Parâmetros ótimos do controlador IMC com dois graus de liberdade para quatro níveis de robustez.....	56
Figura 2.13 - Estrutura do Sistema controlado por CAMR.....	58
Figura 2.14 - Estrutura de controladores adaptativos de modelo de referencia a MIT RULE (a) e Lyapunov (b).....	59
Figura 2.15 - Sistema em malha fechada com controlador <i>Gain Scheduling</i> .....	60
Figure 3.1 - Poço dividido em dois volumes de controle.....	63
Figura 4.1 - Estrutura do modelo do processo implementado em <i>Simulink</i> .....	71
Figura 4.2 - Sinal de resposta do sistema de perfuração à entrada de uma função degrau positiva e negativa.....	72
Figura 4.3 - Comportamento da resposta do sinal de saída para diferentes pontos operacionais (profundidade).....	73

Figura 4.4 - Dados experimentais da pressão do poço durante perfuração comparada com uma modelagem do processo com tempo de atraso.....	75
Figura 4.5 - Estrutura do sistema com controlador IMC implementado com <i>Simulink</i> .....	78
Figura 4.6 - Parâmetro $\tau_c$ – Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes profundidades de perfuração do controlador SIMC.....	80
Figura 4.7 - Profundidade de perfuração - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes parâmetros $\tau_c$ do controlador SIMC.....	80
Figura 4.8 - Parâmetro $\lambda$ – Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes profundidades de perfuração do controlador IMC proposto por Rivera (1986).....	82
Figura 4.9 - Profundidade de perfuração - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes parâmetros $\lambda$ do controlador IMC proposto por Rivera (1986).....	82
Figura 4.10 - Robustez do sistema Ms - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes profundidades de perfuração do controlador IMC com dois graus de liberdade.....	84
Figura 4.11 - Profundidade de perfuração - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes robustez do sistema Ms do controlador IMC com dois graus de liberdade.....	84
Figura 4.12 - Parâmetro $\tau_c$ – Parâmetro integrativo $t_I$ do controle SIMC.....	85
Figura 4.13 - Parâmetro $\lambda$ – Parâmetro integrativo $t_I$ do controle IMC proposto por Rivera (1986).....	86
Figura 4.14 - Robustez do sistema Ms - Parâmetro integrativo $t_I$ do controle IMC com dois graus de liberdade.....	87
Figura 4.15 - Profundidade de perfuração – Parâmetro derivativo $t_D$ do controle IMC proposto por Rivera (1986) e SIMC proposto por Skogestad (2003).....	89
Figura 4.16 - Profundidade de perfuração - Parâmetro derivativo $t_D$ para diferente robustez do sistema Ms do controlador IMC com dois graus de liberdade.....	90
Figura 4.17 - Robustez do sistema Ms - Parâmetro derivativo $t_D$ para diferentes profundidades de perfuração do controlador IMC com dois graus de liberdade.....	90
Figura 4.18 - Estrutura do CAMR em linguagem <i>Simulink</i> .....	92
Figure 5.1 - Estrutura do Controlador GS no linguagem <i>Simulink</i> .....	93
Figura 5.2 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.....	95

Figura 5.3 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos do rastreo do sinal de referência.....	95
Figura 5.4 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos do rastreo do sinal de referência.....	96
Figura 5.5 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos do rastreo do sinal de referência.....	96
Figura 5.6 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos do rastreo do sinal de referência.....	97
Figura 5.7 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos do rastreo do sinal de referência.....	97
Figura 5.8 - Representação do distúrbio ao problema de perda de potencia e\ou conexão de tubos.....	98
Figura 5.9 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.....	99
Figura 5.10 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.....	99
Figure 5.11 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.....	100
Figura 5.12 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.....	100
Figura 5.13 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.....	101

Figura 5.14 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos do rastreo do sinal de referência.....	101
Figura 5.15 - Simulação do distúrbio ao problema do influxo.....	102
Figura 5.16 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos na presença de influxos.....	103
Figura 5.17 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.....	103
Figura 5.18 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.....	104
Figura 5.19 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.....	104
Figura 5.20 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.....	105
Figura 5.21 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.....	105
Figura 5.22 - Simulação do distúrbio ao problema de perda de lama.....	106
Figura 5.23 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos na perda de lama.....	107
Figura 5.24 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos na perda de lama.....	107
Figura 5.25 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos na perda de lama.....	108

Figura 5.26 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos na perda de lama.....	108
Figura 5.27 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos na perda de lama.....	109
Figura 5.28 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos na perda de lama.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros PID de diferentes controladores IMC.....	57
Tabela 3.1 - Nomenclatura e especificação do tipo de variáveis do modelo proposto por Kaasa (2006).....	64
Tabela 4.1 - Requisitos de desempenho do projeto do controlador.....	68
Tabela 4.2 - Parâmetros fixos usados na modelagem de um sistema de perfuração.....	69
Tabela 4.3 - Parâmetros que variam segundo a profundidade de perfuração, usados na modelagem de um sistema de perfuração.....	69
Tabela 4.4 - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro $\tau_c$ usando o método de controle SIMC.....	79
Tabela 4.5 - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro $\lambda$ usando o método de controle IMC proposto por Rivera (1986).....	81
Tabela 4.6 - Parâmetro proporcional $k_C$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo robustez usando o método de controle IMC com dois graus de liberdade.....	83
Tabela 4.7 - Parâmetro integrativo $t_I$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro $\lambda$ usando o método de controle IMC.....	86
Tabela 4.8 - Parâmetro integrativo $t_I$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo robustez usando o método de controle IMC com dois graus de liberdade.....	87
Tabela 4.9 - Parâmetro derivativo $t_D$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro $\tau_c$ e $\lambda$ aplicando os métodos de controle SIMC e IMC respectivamente.....	88
Tabela 4.10 - Parâmetro derivativo $t_D$ para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo robustez usando o método de controle IMC com dois graus de liberdade.....	89
Tabela 4.11 - Ganhos para serem montados no controlador GS.....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A(x)$	Área da secção transversal do fluxo
$A_i$	Matriz de estado de um ponto operacional
$B_i$	Matriz de entrada de um ponto operacional
$C(s)$	Função de Transferência do controlador
$C_i$	Matriz de saída de um ponto operacional
$D$	Sinal de distúrbio.
$D_i$	Matriz de transmissão direta de um ponto operacional
$e$	Sinal do erro
$f$	Fator de atrito de Darcy
$f(s)$	Filtro do controlador IMC
$F$	Força
$F(s)$	Filtro de referência do controlador IMC de dois graus de liberdade
$F_a$	Fator de atrito anular
$F_c$	Fator de atrito da coluna de perfuração
$F_{\text{grav}}$	Força de gravidade
$F_R$	Força resultante
$F_{\text{sup}}$	Força superficial
$g$	Gravidade
$G(s)$	Função de Transferência do processo real
$\bar{G}(s)$	Função de Transferência do modelo do processo
$\bar{G}_-$	Modelo do Processo da parte de fase mínima
$\bar{G}_+$	Modelo do Processo da parte de fase não mínima
$h$	Profundidade de perfuração
$h_b$	Profundidade da broca
$H_p$	Potência hidráulica da bomba principal de lama
$J_a$	Matriz linearizada de estado
$J_b$	Matriz linearizada de entrada
$J_c$	Matriz linearizada de saída
$J_d$	Matriz linearizada de transmissão direta
$k$	Coefficiente de perdas
$K$	Ganho do modelo do processo
$t_D$	Termo Derivativo
$K_L$	Coefficiente de perdas por unidade de comprimento
$t_I$	Termo Integral
$k_C$	Termo Proporcional
$L$	Comprimento do poço
$m$	Massa
$\dot{m}$	Fluxo mássico por unidade de tempo
$M$	Massa total do sistema
$M_a$	Massa de a região anular
$M_c$	Massa de a região da coluna de perfuração
$N$	Propriedade extensiva
$p$	Pressão do sistema
$P$	Pressão máxima do sistema
$P_b$	Pressão da broca

$P_e$	Pressão de estrangulamento
$p_{fratura}$	Pressão de fratura
$P_{hs}$	Pressão hidrostática
$P_{hd}$	Pressão hidrodinâmica
$p_o$	Pressão do sistema em um ponto operacional
$P_p$	Pressão da bomba principal
$p_{poço}$	Pressão do poço
$p_{poro}$	Pressão de Poro
$q$	Vazão do fluido
$q(s)$	Função de transferência do controlador IMC
$q_b$	Vazão que passa pela broca
$q_c$	Vazão da bomba de contra pressão
$q_e$	Vazão da válvula de estrangulamento
$q_p$	Vazão da bomba principal
$q_{res}$	Vazão do reservatório
$Q$	Vazão na superfície do poço
$r$	Sinal de referência
$R(s)$	Função de Transferência da referencia
$Re$	Número de Reynolds
$S(x)$	Perímetro da secção transversal do fluxo
$s$	variável da Transformada de Laplace
$\hat{s}$	Variável transformada da Transformada de Laplace
$t$	Tempo
$T$	Temperatura do sistema
$T_o$	Temperatura do sistema em um ponto operacional
$u$	Sinal de saída do atuador
$U(s)$	Função de Transferência do sinal de controle
$u_c$	Sinal de saída do controlador (sinal de controle)
$V_a$	Volume de a região anular
$V_c$	Volume de a região da coluna de perfuração
$x$	Variável de estado
$\dot{x}$	Variável de estado por unidade de tempo
$x$	Posição vertical negativa
$x_o$	Condição inicial da variável de estado
$y$	Sinal de saída do sistema
$Y(s)$	Função de Transferência da saída do sistema
$\alpha$	parâmetro transformado do modelo do processo
$\beta$	Modulo de compressibilidade
$\epsilon$	Função da sensibilidade
$\lambda$	Parâmetro do controlador IMC
$\Delta p$	Caída de pressão
$\eta$	Propriedade extensiva por unidade de massa
$\eta$	Sensibilidade complementar
$\theta$	Tempo de atraso do sistema
$v$	Velocidade do fluido
$v_s$	Velocidade do fluxo vertical
$\rho_o$	Densidade da lama em um ponto operacional
$\bar{\rho}$	Densidade media da lama
$\rho$	Densidade da lama

$\rho_a$	Densidade de a região anular
$\rho_c$	Densidade de a região da coluna de perfuração
$\sigma$	Parâmetro adicional do controlador IMC de dois graus de liberdade
$\sigma_w$	Esforço cortante
$\tau$	Constante de tempo do processo de primeira ordem
$\tau_c$	Constante de tempo do sistema desejado

### **Subscritos**

des	Equação desejada
ent	Refere-se ao fluxo mássico de entrada
saí	Refere-se ao fluxo mássico de saída

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

GS	<i>Gain Scheduling</i>
CPFP	Controle da Pressão no Fundo do Poço
MPD	<i>Manage Pressure Drilling</i>
PID	Proporcional, Integrativo e Derivativo.
RCD	Rotary Control Devide
PDC	<i>Polycrystalline Diamond Compact</i>
PFP	Pressão no Fundo do Poço
IMC	Internal Model Control
SIMC	Simple Internal Model Control
IACD	<i>International Association of Drilling Contractors</i>
POITDA	Primeira Ordem Integrativo com Termo de Atraso
CAMR	Controle Adaptativo por Modelo de Referência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	21
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE CPFP.....	23
1.3	OBJETIVOS.....	24
1.4	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	25
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
<b>2</b>	<b>DEFINIÇÕES E FUNDAMENTOS.....</b>	<b>27</b>
2.1	SISTEMA DE PERFURAÇÃO DE POÇO.....	27
2.2	MARGENS DA PRESSÃO GEOLÓGICA.....	31
2.3	GERENCIAMENTO DA PRESSÃO DE PERFURAÇÃO (MPD).....	33
2.4	PROBLEMAS COMUNS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS.....	36
<b>2.4.1</b>	<b>Adição de novas tubulações.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Perda de lama.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Perda da circulação do fluido.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Perda de potência.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Influxo (e /ou <i>Kick</i>).....</b>	<b>38</b>
2.5	MODELO DO PROCESSO.....	39
2.6	CONTROLADOR PID.....	41
<b>2.6.1</b>	<b>Controlador IMC.....</b>	<b>46</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Controlador SIMC.....</b>	<b>51</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Controlador de IMC com dois graus de liberdade.....</b>	<b>54</b>
2.7	CONTROLE ADAPTATIVO DE MODELO DE REFERÊNCIA (CAMR).....	57
2.8	O MÉTODO <i>GAIN SCHEDULING</i> (GS).....	60
<b>3</b>	<b>MODELAMENTO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE PERFURAÇÃO... </b>	<b>62</b>
3.1	MODELO NÃO LINEAR.....	62
3.2	MODELO LINEARIZADO.....	65
<b>4</b>	<b>PROJETO DO CONTROLADOR.....</b>	<b>68</b>
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO PROCESSO.....	68
<b>4.1.1</b>	<b>Modelo do processo de primeira ordem com elemento integrativo.....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Adição do tempo de atraso no sistema.....</b>	<b>74</b>
4.2	PROJETO DO CONTROLADOR PID.....	75
<b>4.2.1</b>	<b>Projeto do controlador IMC.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Projeto do controlador SIMC.....</b>	<b>76</b>

4.2.3	<b>Projeto do controlador IMC com dois graus de liberdade.....</b>	77
4.3	ANÁLISE DO CONTROLADOR <i>GAIN SCHEDULING</i> .....	78
4.3.1	O método <i>GS</i> no ganho proporcional aplicando o controlador SIMC.....	79
4.3.2	O método <i>GS</i> no ganho proporcional aplicando o controlador IMC.....	81
4.3.3	O método <i>GS</i> no ganho proporcional aplicando o controlador IMC com dois graus de liberdade.....	83
4.3.4	O método <i>GS</i> no ganho integrativo aplicando o controlador SIMC.....	85
4.3.5	O método <i>GS</i> no ganho integrativo aplicando o controlador IMC.....	86
4.3.6	O método <i>GS</i> no ganho integrativo aplicando o controlador IMC com dois graus de liberdade.....	87
4.3.7	O método <i>GS</i> no ganho derivativo aplicando o controlador SIMC e IMC....	88
4.3.8	O método <i>GS</i> no ganho derivativo aplicando o controlador IMC com dois graus de liberdade.....	89
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DO CAMR EM <i>SIMULINK</i> .....	91
5	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....</b>	93
5.1	CONTROLE DA PRESSÃO DESEJADA.....	94
5.2	SIMULAÇÃO DA PERDA DE POTÊNCIA.....	98
5.3	SIMULAÇÃO DO INFLUXO.....	102
5.4	SIMULAÇÃO DA PERDA DE LAMA.....	106
6	<b>CONCLUSÕES.....</b>	111
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	113
	<b>ANEXO I – Modelagem do Processo de Perfuração.....</b>	117
	<b>APÊNDICE A - Linearização do Modelo do Processo de Perfuração.....</b>	128
	<b>APÊNDICE B – <i>Scripts</i> em MATLAB: Ajuste de Curvas.....</b>	132
	<b>APÊNDICE C – Análise Independente dos Controladores IMC.....</b>	134
	<b>APÊNDICE D – Análise Comparativa dos Controladores IMC.....</b>	158

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A crescente necessidade humana de óleo e gás para produzir energia tem o potencial de explorar novos reservatórios em ambientes mais árduos e hostis, como por exemplo, a exploração de poços complexos em águas profundas nas plataformas marítimas (*offshore*). Contudo, este ainda é um enorme negócio no qual se investem grandes somas de dinheiro em exploração que envolve centenas de bilhões de dólares cada ano no mundo (KEY WORLD ENERGY, 2014).

A exploração de depósitos petrolíferos para a obtenção de petróleo primário divide-se em três etapas: a prospecção, perfuração e a extração. A prospecção é a localização de bacias sedimentares por meio de análise detalhada do solo e subsolo. Depois de localizado o local onde provavelmente haverá uma reserva de petróleo, é feita a perfuração que é a criação de um meio de conexão entre as jazidas e a superfície normalmente chamada de poço de perfuração. Quando é realizada a primeira perfuração e se obtém sucesso, são feitas outras perfurações para saber a extensão da bacia petrolífera e ver se é realmente viável realizar o próximo passo: a extração. A extração é o processo de levar o combustível fóssil à superfície (ABIMBOLA *et al*, 2014).

A fase mais custosa, difícil e perigosa da exploração de petróleo é, geralmente, a perfuração. Esta etapa consiste na aplicação de uma força sobre a sonda de perfuração que é composta por uma torre metálica que sustenta a coluna de perfuração com uma broca na sua extremidade. A coluna de perfuração é composta por tubos de 9 - 27 metros de comprimento que são conectados entre si (ABIMBOLA *et al*, 2015).

Durante a perfuração de poços de petróleo podem-se criar uns dos mais terríveis cenários originando, grandes perdas econômicas, danos ambientais e até perdas humanas como são os acidentes ocorridos na Plataforma de Enchova (Bacia de Campos, RJ) em 1984 e 1988. O primeiro resultou em 37 óbitos imediatos; o segundo, na destruição total do convés e da torre, totalizando um prejuízo de 500 milhões de dólares. A plataforma de Piper Alpha (no Mar do Norte, em 1988), o qual, resultou no óbito de 165 dos 228 trabalhadores presentes no

dia do acidente (72% do contingente). Todos estes acidentes simbolizam o grande potencial de perigo que existe nas plataformas de petróleo entre outros (FREITAS *et al*, 2001).

A prevenção de explosões e o controle de influxo (maior pressão encontrada no subsolo durante a perfuração) da formação de gás/fluido é uma preocupação importante em qualquer operação. Desta maneira, pesquisadores e cientistas devem assegurar que a aplicação de tecnologias avançadas no controle de processos continue diminuindo riscos e otimizando custos de produção associados com a obtenção dos hidrocarbonetos.

Uma variável importante durante a perfuração que se deve tomar em conta para manter a seguridade total do processo é o controle da pressão no fundo do poço (CPFP). Nas operações de perfuração, precisa-se da circulação de um fluido durante a perfuração com a finalidade de retirar os restos rochosos próprios da perfuração. Este fluido é chamado lama e é bombeada pela coluna de perfuração que flui através da broca no fundo do poço. Esta lama atua como esfriador da broca, transporta restos rochosos (*cuttings*) para fora do poço, e também mantém a pressão no fundo do poço no nível desejado. Este tipo de perfuração é chamado de perfuração convencional (LANDET, 2011).

Na perfuração convencional, a única resposta amplamente aceita para um influxo é ativação dos preventores de explosões (principal elemento de ligação entre a cabeça do poço no fundo do mar e a plataforma) fechando o poço completamente. A nova tecnologia de perfuração (MPD - *Manage Pressure Drilling*) utiliza a técnica de manter a pressão controlada no fundo do poço adicionando uma pressão de controle além da pressão hidrodinâmica (gerada pela bomba principal de circulação de fluido) e a pressão hidrostática (própria da profundidade). Esta nova pressão é produzida pela manipulação da válvula de estrangulamento (GODHVAN *et al*, 2011).

Normalmente, nas plataformas marítimas (*offshore*), um operador ajusta manualmente o motor de arranque da válvula, em operações MPD manuais. A válvula deve ser fechada para reduzir o aumento de pressão no fundo no caso seja excessiva. Na verdade, é uma tarefa difícil devido à rápida flutuação da pressão. No entanto, na operação de perfuração manual, a possibilidade de erros é bastante elevada, bem como há limitações sobre o tempo de resposta. Por tanto, é necessário a utilização de um controle para manter a pressão no fundo da maneira desejada (REHM *et al*, 2008).

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE CPFP

No ano 2006, Kaasa apresentou um modelamento matemático do processo de perfuração que consistia na obtenção da pressão no fundo do poço em função de variáveis mensuráveis na superfície.

Em Belfort (2009), montou uma bancada experimental do sistema de perfuração baseado na análise de similaridade. A unidade experimental obedeceu as exigências cinemática e dinâmica mais não a geométrica. Tal exigência é difícil de representar numa bancada experimental por causa da variação da profundidade do sistema de perfuração a não ser que a coluna de perfuração da unidade experimental fosse um capilar de diâmetro infinitamente pequeno. A despeito disso, aplicou-se um método de controle do tipo PID para certas aberturas da válvula de estrangulamento.

Em Pedersen (2009), empregou o método de controle adaptativo tipo Modelo de Referência. Estes tipos de controles baseiam-se na sintonização dos valores dos parâmetros do controlador minimizando o erro entre a saída do sistema e a saída do modelo de referência. Pedersen utilizou o controle adaptativo ao modelo matemático de Kaasa (2006) simulando problemas típicos que se apresentam na perfuração de poços como perdas de circulação, perda de potência, influxos, entre outros problemas os quais serão abordados no próximo capítulo. No mesmo ano Landet (2011) aplicou um controle não linear em MPD em plataformas com a discretização do modelo proposto por Kaasa (2006). Estes dois últimos trabalhos não foram implementadas fisicamente.

No trabalho de Reitsma e Couturier (2012) desenvolveram um controlador PI para o controle da pressão dum sistema de perfuração do tipo MPD em tempo real. O sistema controlado apresentou bom desempenho mais se tornou instável quando mudaram os pontos operacionais de perfuração como profundidade, vazão da bomba principal, propriedades do fluido, etc, fazendo com que a sintonização destes parâmetros para diferentes pontos operacionais seja necessária.

Karimi (2014) apresentou um método de toma de decisão rápida e exata, o qual seleciona automaticamente os parâmetros de controle para casos de influxos. Shishavan (2014) desenvolveu um projeto de controle utilizando um controlador não linear manipulando as variáveis de vazão de saída da válvula de estrangulamento e a taxa de penetração de

perfuração do poço. Este controlador multivariado melhorou o desempenho de perfuração durante as operações normais de perfuração e aumentou a segurança em situações de influxo de gás indesejadas. Entretanto, todos os resultados obtidos foram simulados para processos invariantes no tempo (profundidade de perfuração e volume constante).

Um trabalho que não envolve o CPF, mas é usado como modelo para o desenvolvimento deste trabalho é apresentado por Shehhi e Boiko (2015). Neste trabalho apresentou-se um controlador empregando o método de *Gain Scheduling* (GS) para controlar a pressão dentro de um separador bifásico de óleo e gás. Os controladores PI foram especificados a partir da análise de 64 modos de operação correspondentes a determinadas gamas de valores de vazões de gás e de nível de líquido, obtendo os ganhos do controlador para os diferentes pontos operacionais. E finalmente, se fez uma análise comparativa do sistema de separação controlado com o GS e um controle PI do tipo robusto, mostrando-se o GS com melhor desempenho.

### 1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é determinar e especificar os parâmetros PID no controle da pressão na perfuração de poços petrolíferos, em cada trecho operacional do processo, considerando-se diferentes profundidades de perfuração. As profundidades representam os diferentes pontos operacionais. As quais são consideradas variáveis modificáveis para efeitos da obtenção dos respectivos ganhos do controlador PID para diferentes pontos operacionais. A implementação destes ganhos numa tabela, obtidos para os diferentes pontos operacionais, é chamado de controlador *Gain Scheduling*.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- A obtenção da modelagem matemática, as equações de estado e a linearização do sistema de perfuração de poços de petróleo.
- O estudo e a avaliação do desempenho de três tipos de metodologias de controle: IMC (*Internal Model Controller*), SIMC (Simple IMC), e IMC com dois graus de liberdade, para efeito de sintonia dos parâmetros PID no controle da pressão na base do poço.

- Também, a implementação de um controlador adaptativo modelo de referencia (CAMR) no controle do sistema para efeitos de avaliação do desempenho e especificação do controlador escolhido neste estudo.
- Implementar a estrutura e a simulação do sistema usando o método *Gain Scheduling* no controle da pressão nas diferentes profundidades de perfuração do poço de petróleo.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

As estratégias de controle são comuns na indústria e fornecem redução de custos e confiabilidade para diferentes processos. A automação para a tecnologia de construção de poços ainda é um conceito emergente, em discussão dentro da comunidade técnica. Kennett e Smith (1991) são pioneiros em apresentar a discussão sobre automação para a indústria de perfuração e listar as principais preocupações para implementação no terreno: a complexidade do processo, confiabilidade, etc. Além disso, os autores apresentam as vantagens alcançadas por outras indústrias em tempo, segurança, custos, etc (FOLSTA; MARTINS, 2012).

Embora o sistema de controle moderno seja uma realidade em muitas áreas industriais (refinarias, petroquímicas e plantas de gás), não é amplamente utilizado para unidades de produção *offshore* (plataformas marítimas). Nas plataformas marítimas, existe pouca acessibilidade aos recursos por causa da localização das instalações distantes à costa, na aplicação de um controle mais avançado precisa-se de instrumentos mais sofisticados e custosos, assim como também pessoal qualificado para sua manipulação (CAMPOS, 2013).

Na atualidade, os tipos de controle em sistemas de perfuração estão sendo estudados consideravelmente devido aos benefícios que implicariam o ótimo controle do desenvolvimento do sistema global. Nesses estudos, geralmente, o sistema de perfuração é modelado com funções de transferência de primeira ordem e sem considerar o tempo de atraso, com a metodologia de controle do tipo IMC (*Internal Model Controller*).

Neste estudo, a diferença com os outros trabalhos está no modelo do processo real, o qual é dado por uma função de transferência de primeira ordem, adicionado de um termo integrativo. Assim como, adicionasse um tempo de atraso no processo de perfuração do poço, parâmetro bem mais próximo da realidade considerando-se o instante da aquisição dos dados reais e a ação do controle.

A fim de determinar e especificar qual o tipo de controle que leva o sistema a ter as melhores características e melhor desempenho, compara-se e avalia-se o desempenho de três tipos de controles de pressão. Obtêm-se os resultados da simulação de três controles com a metodologia tipo IMC, SIMC (Simples IMC) e IMC de dois graus de liberdade, respectivamente, aplicados na perfuração de poços de petróleo.

A modelagem dinâmica do processo de perfuração apresenta condições que fazem com que o processo seja muito instável e para compensar esta instabilidade opta-se por aplicar controles mais complexos, porém, este trabalho propõe o projeto do controlador GS com os ganhos que melhor desempenho apresente dos três métodos de controle mencionados acima. O método GS usa uma programação simples, e é de fácil implementação na prática industrial comparado com outros tipos de controle avançado.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação desenvolvida apresenta os seguintes capítulos: No capítulo I se faz uma introdução ao problema do controle da pressão durante a perfuração de poços petrolíferos assim como a proposta do projeto do controlador. No Capítulo II serão definidos conceitos fundamentais para entender o procedimento da perfuração, as pressões principais geológicas e teorias de controle que serão usadas no capítulo IV. No Capítulo III deve-se compreender a dinâmica da planta e representar ela em forma de algumas equações matemáticas. Estas equações constituem o modelo matemático da planta. Um modelo de planta pode ser representado por leis físicas ou por processamento dos dados obtidos da realização de vários experimentos tipo entrada – saída. (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1989). Neste estudo se utilizará o primeiro método. Uma vez obtido o modelo da planta pode-se prosseguir com o desenho do controlador. No Capítulo IV, o controlador é projetado para atender os requisitos ótimos de desempenho para o modelo da planta. O capítulo V compreende a simulação do processo com os principais problemas que ocorrem durante a perfuração de poços do petróleo. Isto representará o comportamento (tempo de estabilidade, amortecimento, etc.) do sistema tudo. Além disso, serão discutidos os resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo VI serão apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 DEFINIÇÕES E FUNDAMENTOS

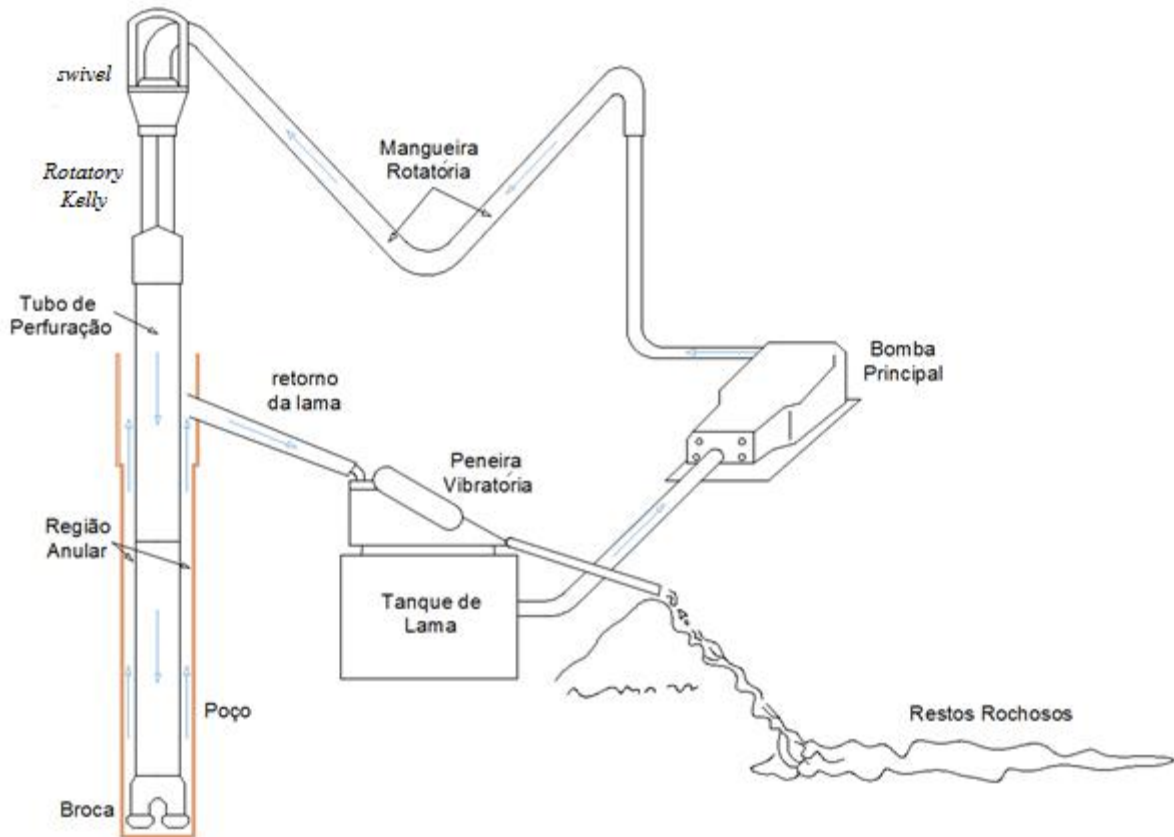
### 2.1 SISTEMA DE PERFURAÇÃO DO POÇO

Os componentes principais do sistema de perfuração são apresentados nesta seção com a finalidade de retratar um esboço global das partes principais do sistema com a circulação do fluido. A Figura 2.1 mostra o deslocamento do fluido. O coração da circulação do sistema é a bomba de lama que produz a pressão e a vazão que se precisa para que o fluido percorra o sistema em sua totalidade.

Na saída da bomba de lama, o fluido passa por meio de tubos e uma mangueira flexível para uma articulação giratória conhecida como *swivel* para logo terminar na coluna de perfuração. A coluna de perfuração consiste de uma *rotatory kelly*, tubos de perfuração, colares de perfuração e de uma broca. O *swivel* faz possível a conexão entre a *rotatory kelly* e a mangueira estática. A *rotatory kelly* é um dispositivo de secção poligonal utilizado para juntar a mesa de rotação com a coluna de perfuração, assim como também faz possível o movimento vertical da perfuração. É relevante sinalizar que a mesa de rotação faz virar a coluna de perfuração. Além disso, existe outro elemento que intervém na rotação da broca chamado de RCD (*Rotary Control Device*). O RCD é um sistema que faz possível o direcionamento da perfuração. Os tubos da coluna são muito importantes, as adições destes fazem possível a perfuração do poço. O fluido viaja através da tubulação até chegar ao fundo do poço onde se encontra a broca. O fluido sai através das ranhuras e espaços da broca com muita força e se dirige à zona anular levando consigo restos rochosos feitos pela perfuração. A região anular é um volume cilíndrico que envolve a coluna de perfuração que é gerada pela mistura de lama e restos rochosos. Uma vez que o fluido abandona a zona anular chega à superfície onde passa pela etapa de limpeza através de uma peneira vibratória e diferentes tipos de filtros. Isto é feito de modo que o fluido de perfuração possa ser reutilizado.

Um dado importante que se deve ressaltar é a função do misturador de lama, o qual garante que o líquido volte para a bomba de lama e que tenha a composição certa de acordo com as medições. Isto é feito através da adição de substâncias que alteram as propriedades tais como a densidade e viscosidade do fluido. (CORRÊA, 2003; REHM *et al*, 2008; BELFORT, 2009; LJONES, 2013)

Figura 2.1 - Sistema fechado de recirculação de lama.



Fonte: (LJONES, 2013)

### Bomba de lama

A principal função da bomba de lama é a subministrar potência ao sistema de perfuração para que circule uma quantidade suficiente de lama que limpe a broca de particulado rochoso, e levá-las à superfície. A bomba providencia a velocidade necessária que junto com as propriedades do fluido mantêm limpo o poço. Em geral, as bombas usadas em plataformas de perfuração são bombas de deslocamento positivo alternado de dois e três pistões. (ROGERS, 1953)

A potência hidráulica que utiliza a bomba pode-se determinar mediante a equação (2.1)

$$H_p = \frac{PQ}{1.714} \quad (2.1)$$

Sendo  $H_p$  a potência hidráulica da bomba principal de lama em hp,  $P$  pressão máxima do sistema (PSI) e  $Q$  a vazão na superfície do poço (gpm) (AZAR; SAMUEL, 2007)

### Fluido de Perfuração

Os fluidos de perfuração são aqueles utilizados para auxiliar a perfuração dos poços. Este fluido precisa ter características muito especiais para que atinja as suas finalidades. As características principais dos fluidos de perfuração são:

- Refrigerar e lubrificar as brocas e tubos de perfuração.
- Ter uma viscosidade suficiente para arrastar os cascalhos formados no fundo do poço para a superfície.
- Ter um peso suficiente para superar a pressão de formação, chama-se de formação à estrutura rochosa do solo ou subsolo criada pela perfuração, prevendo o ingresso de óleo, gás ou água.
- Não alterar suas características com o aumento da temperatura do fundo do poço, à medida em que a perfuração prossegue.
- Não penetrar, a traves de seu filtrado (o líquido que a lama perde entre o poço e as formações), nas formações que estejam sendo perfuradas.

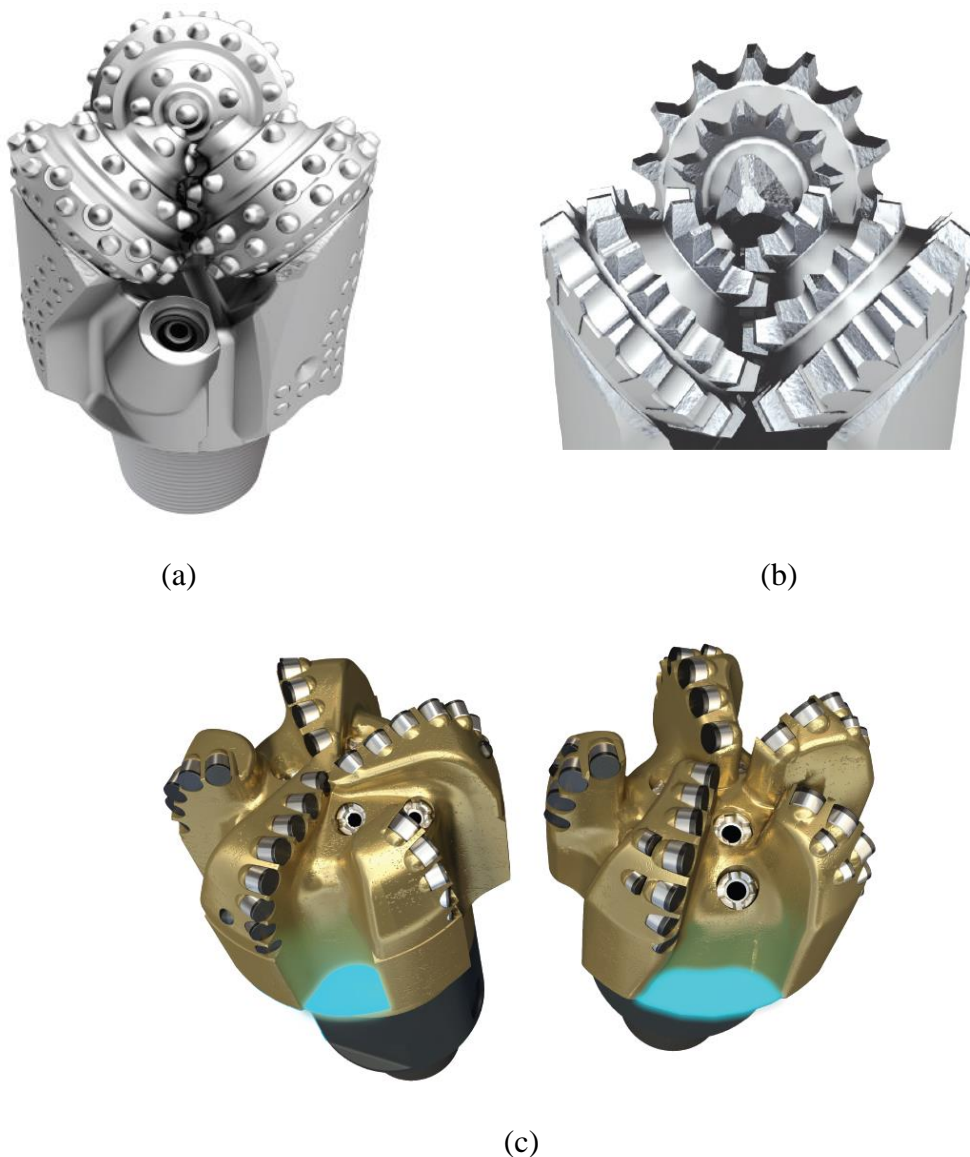
Para manter estas características, e algumas mais, na perfuração há muitos tipos diferentes de lama, dependendo das propriedades das formações geológicas a serem perfuradas. Assim, existe: as lamas à base de água (as mais comuns); as de base de óleo, hoje evitadas, devido aos problemas ambientais; as de base em soluções catódicas, atualmente muito utilizadas, devido à estabilidade de suas características; e muitas outras (ROGERS, 1953; CORRÊA, 2003).

### Broca de Perfuração

Há uma grande variedade de brocas de perfuração e de seus fabricantes. Elas são manufaturadas para cada tipo de regiões, diâmetros de poço e pressões. As brocas de perfuração são classificadas quanto a sua dureza e fabricadas para perfurar zonas moles, medias, duras. O princípio fundamental do trabalho das brocas é o de raspagem ou de trituração do fundo do poço, e para isto são empregadas laminas ou dentes, que podem ser

de aço ou de pastilhas de tungstênio. Como as brocas de perfuração são um dos itens mais onerosos na perfuração, torna-se necessário o estudo muito cuidadoso, para a otimização de sua utilização, a fim de serem empregadas em menor número possível e com o máximo de rendimento (CORRÊA, 2003). Na atualidade se utilizam brocas PDC (Diamante Policristalino), este tipo de broca possui incrustações de diamante artificial. As brocas PDC têm apresentado excelentes resultados em todo tipo de rochas; moles, médias e duras.

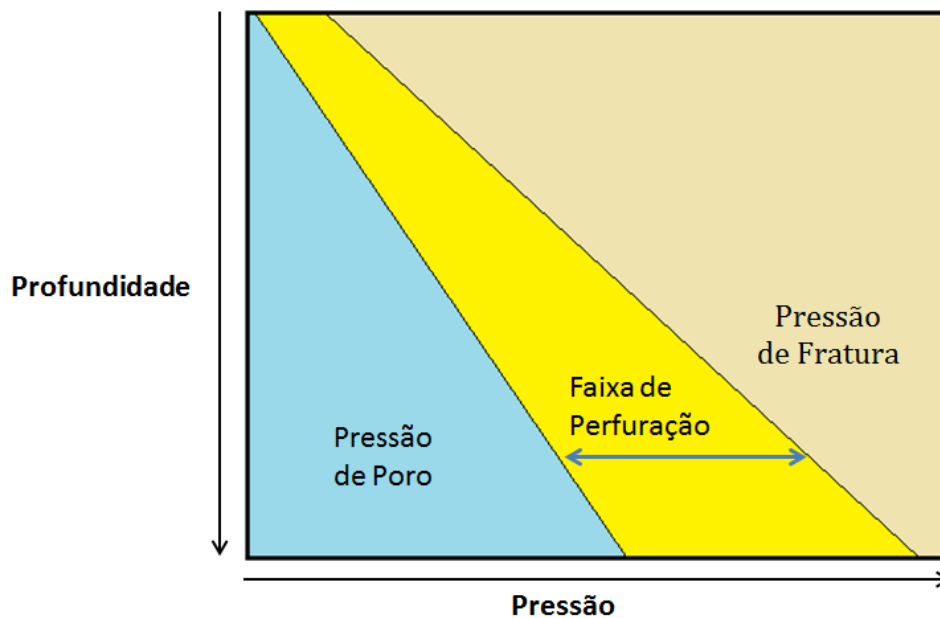
Figura 2.2 - Tipos de brocas de perfuração mais empregadas. (a) Brocas com insertos (dentes) de Tungstênio. (b) Brocas de dente de aço. (c) Brocas PDC.



## 2.2 MARGENS DA PRESSÃO GEOLÓGICA

Durante a perfuração existem certos limites de pressão que devem ser tomados em consideração, pressões próprias e dependentes da geologia da região a ser perfurada, principalmente dois: a pressão do poro e a pressão de fratura (perfis de pressão) que serão definidas a seguir. Na Figura 2.3 mostram-se os perfis de pressão mencionados e a faixa possível de perfuração num plano de pressão versus profundidade de perfuração. Sendo a zona amarela a faixa de perfuração permitida ideal.

Figure 2.3 - Representação da faixa de perfuração entre pressões características da zona geológica.



Fonte: (REHM *et al.*, 2008)

Todas as formações são porosas até certo ponto, estes poros podem conter água, gás, óleo ou uma combinação destas. A pressão exercida pelos fluidos dentro destes poros é chamada “pressão de poro”. (BREYHOLTZ, 2008)

A quantidade de pressão que a formação pode suportar antes de falhar é conhecida como a pressão de fratura. Ela pode também ser definida como a pressão à qual a formação se fratura e o fluido circulante é perdido. (REHM, 2008)

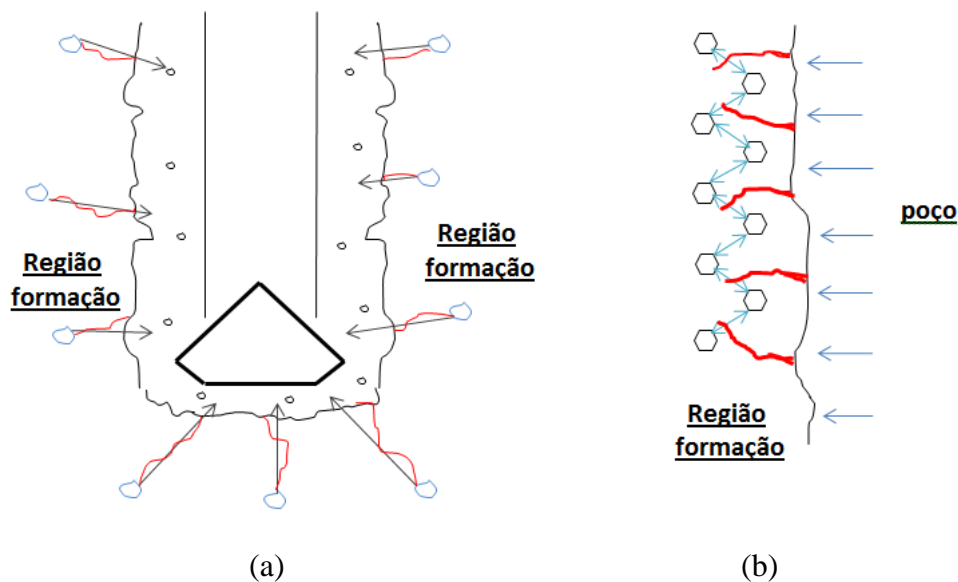
O sucesso da perfuração depende no manejo da pressão no poço. É importante que a pressão do poço fique entre estes dois valores segundo a equação (2.2).

$$p_{\text{poro}} < p_{\text{poço}} < p_{\text{fratura}} \quad (2.2)$$

No caso em que a pressão do poço seja maior que a pressão de fratura (equação 2.3), a formação rochosa se fraturará e gerará uma erupção subterrânea, devido a que a lama fluirá do poço à zona de formação. (Figura 2.4b) Uma erupção subterrânea é muito difícil controlar e pode resultar em uma situação perigosa e destrutiva. Nas plantas *offshore* ao contrario das *onshore* (plataformas de extração terrestres), é muito provável que se gere uma cratera embaixo da plataforma ocasionando a perda severa de toda a instalação.

$$p_{\text{poro}} < p_{\text{fratura}} < p_{\text{poço}} \quad (2.3)$$

Figure 2.4 - (a) Fissura da formação por causa de maior pressão de Poro. (b) Fissura da formação por causa de menor pressão de Fratura.



A pressão de poro tem que ser sempre menor que a pressão exercida pelo peso do fluido (equação 2.4). Se não fosse o caso, o fluido dentro dos poros fluiría da zona de maior pressão à de menor pressão ocasionando a quebra da formação (Figura 2.4a). Se o fluxo é grande, o fenômeno é chamado *kick* e se é incontrolável chama-se de *blow out* (explosão).

$$p_{poço} < p_{poro} < p_{fratura} \quad (2.4)$$

Com a finalidade de prevenir influxos desde a formação, é necessário que a pressão hidrostática do fluido de perfuração seja maior que a pressão do poro. Contudo, também é importante que a pressão hidrostática não supere a pressão de fratura. A pressão hidrostática é proporcional à altura da coluna do fluido de perfuração e a sua densidade. Assim, é possível controlar a densidade do fluido de perfuração e manter a pressão hidrostática dentro da faixa dada pela pressão do poro e a pressão de fratura.

Entretanto, para controlar a pressão do fundo também deve ser considerada a pressão hidrodinâmica que aparece quando o fluido flui através do sistema. Como o fluido experimenta perdas de pressão por atrito através do sistema, a pressão total no fundo da broca é a soma da pressão hidrostática e a pressão hidrodinâmica. (REHM *et al*, 2008; LJONES, 2013; KANKANAMGE, 2013)

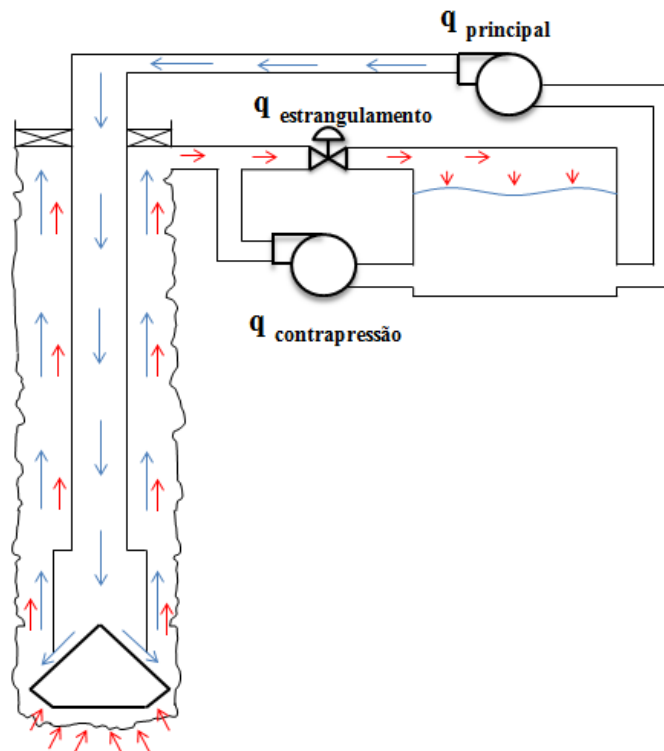
O desejo de manter a pressão entre estes limites gera a necessidade de um controle preciso aos câmbios de pressão no poço. A técnica utilizada na atualidade para fazer isto possível é chamada de MPD.

### 2.3 GERENCIAMENTO DA PRESSÃO DE PERFURAÇÃO (MPD)

A definição do *Manage Pressure Drilling* ou Gerenciamento da Pressão de Perfuração segundo a *International Association of Drilling Contractors* (IADC) é um processo de perfuração adaptativo usado para controlar com precisão o perfil de pressão no fundo do poço. É chamado de adaptativo por que modifica a pressão do fundo do poço de acordo ao tipo de geologia da região subministrando mais ou menos pressão ao sistema de perfuração.

O que diferencia ao MPD do método de perfuração convencional é a habilidade de controlar a pressão do poço sem mudar a densidade da lama. Isto é possível selando a entrada do sistema, adicionando uma válvula de estrangulamento ( $q_e$ ) e uma bomba de contrapressão ( $q_c$ ) na saída do sistema de perfuração, como se mostra na Figura 2.5. A região anular também está selada para criar um sistema pressurizado. A implementação de uma válvula na saída da região anular adiciona uma variável de controle sobre a pressão no fundo do poço. Muitas vezes durante a perfuração dependendo da região geológica precisa-se de mais pressão no sistema, a bomba principal ( $q_p$ ) pode gerar uma vazão limitada é por isso que numa perfuração convencional usualmente se modificam as propriedades da lama para o qual se deve parar a perfuração e trocar toda a lama. No MPD isto não é necessário já que se pode manipular a outra variável de controle inserida ( $q_e$ ) (AZAR; SAMUEL, 2007; REITSMA; COUTURIER, 2012; GABALDON *et al*, 2014).

Figura 2.5 - Sistema de Perfuração com MPD. A válvula e a bomba de contrapressão adiciona uma pressão mais ao sistema.



Fonte: (AZAR; SAMUEL, 2007).

Observa-se que existem três tipos de pressões fundamentais que geram e influenciam na pressão no fundo do poço durante a perfuração: a pressão hidrostática ( $P_{hs}$ ), pressão hidrodinâmica ( $P_{hd}$ ) e a pressão gerada pelo acionamento da válvula de estrangulamento na saída do poço  $P(q_e)$ . A pressão hidrostática gera-se devido ao próprio peso do fluido numa determinada profundidade. A pressão hidrodinâmica origina-se pela causa da ação da bomba principal que bombeia o fluido até a saída do poço. Finalmente, o estrangulamento do fluido na saída do poço adiciona outra pressão sobre o sistema, de fato, o tema de estudo deste trabalho consiste na manipulação desta variável de vazão da válvula de estrangulamento ( $q_e$ ) para manter a pressão requerida de perfuração (REHM, 2008; REITSMA; COUTURIER, 2012). Assim, define-se

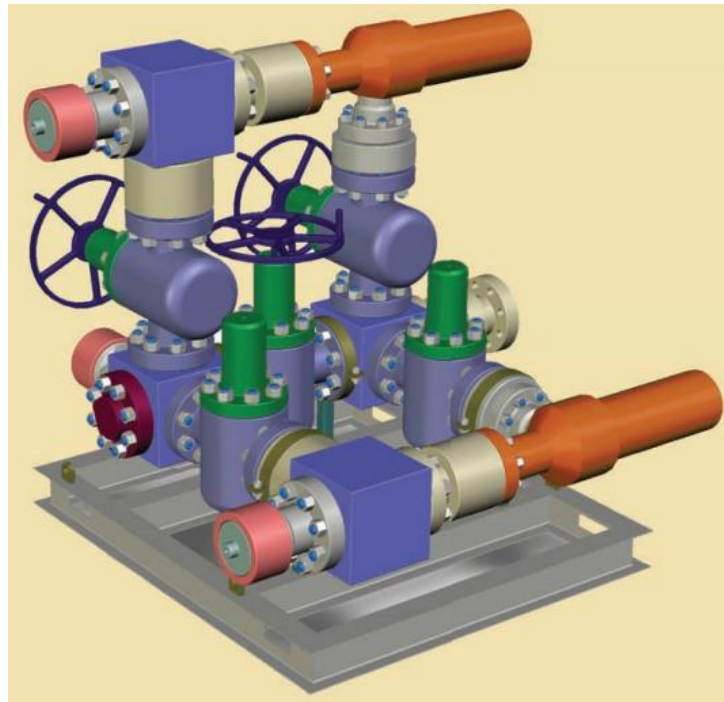
$$PFP = P_{hs} + P_{hd} + P(q_e) \quad (2.5)$$

como sendo a pressão no fundo do poço (PFP) descrita pela equação (2.5).

### Válvula de estrangulamento

Como já foi mencionada, a válvula de estrangulamento é responsável de manter a pressão requerida mediante sua manipulação. A figura 2.6 mostra um conjunto de válvulas automáticas de controle da pressão do poço projetada para operações *onshore*. Ele é montado num suporte aberto deslizante, concebido para facilitar o manuseio em plataformas terrestres e transporte terrestre. Ele contém duas válvulas de estrangulamento principais e é avaliado para suportar até 5000 psi (REHM, 2008).

Figura 2.6 - Conjunto de válvulas automatizadas de controle de pressão do poço durante a perfuração.



Fonte: (REHM *et al.*, 2008)

## 2.4 PROBLEMAS COMUNS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS

Durante a perfuração de poços, eventualmente ocorrerão distúrbios que causam flutuações na pressão. Podem ser citadas como fontes de distúrbios o aumento do volume do poço, o procedimento de conexão de tubos que é realizado durante a perfuração, perfuração em zonas geológicas de maior pressão, perdas de circulação entre outros.

### 2.4.1 Adição de novas tubulações

A conexão de tubos é o procedimento de adição de um novo tubo ou pedaço de cano, na coluna de perfuração. Um tubo é de aproximadamente entre 9 metros de comprimento. Três tubos formam o que se chama de *stand*, estes 27 metros de tubulação são utilizados na

perfuração e são inseridos com uma velocidade de 15 metros/hora, isso significa que uma operação de conexão acontece a cada duas horas aproximadamente durante um período de 10 a 15 minutos.

Durante a conexão de tubo, a bomba principal de lama deve ser desacelerada até chegar a vazão zero e o excesso de fluido na coluna de perfuração é retirado através de um duto e voltado para os tanques de lodo para reduzir a pressão da bomba de lama à pressão atmosférica ficando assim só a pressão hidrostática como único elemento que influencia no comportamento da pressão anular do fundo. No entanto, a perfuração MPD age ligando a bomba de contrapressão e manipulando a válvula de estrangulamento. O procedimento é concluído em aproximadamente dez minutos, e então a bomba de lama é ligada de novo (BELFORT, 2009; PEDERSEN, 2009; STAMMES, 2011).

#### **2.4.2 Perda de lama**

A perda de fluido ou lama é definida como a quantidade de lama que se filtra entre a porosidade de uma formação permeável que está sendo perfurada. Por causa da pressão diferencial positivo entre a pressão do poço e a pressão da formação, o fluido tende a fluir para dentro da formação (AZAR; SAMUEL, 2007).

#### **2.4.3 Perda da circulação do fluido**

A perda de circulação é a situação em que se tem uma grande perda de lama de perfuração na formação, causando uma diminuição na pressão hidrostática. Isso pode acontecer quando se perfura em zonas que são altamente permeáveis, cavernosos, inerentemente fraturados ou fraturados devido à inadequada perfuração. Estes são inevitáveis por ser próprios das características do solo. As consequências da perda de circulação dependerão da quantidade de lodo perdido. Se a perda é grande em um lugar de elevada pressão, poderíamos obter um súbito influxo de formação de fluido que poderia levar a um *blow out* ou um colapso da formação. (AZAR; SAMUEL, 2007; REHM, 2008).

#### 2.4.4 Perda de Potência

A perda de potência é definida como uma completa perda de potência da bomba principal de lama, onde a vazão de estrangulamento e bomba de contrapressão assumem a operação do sistema para manter a pressão desejada de maneira separada e independente (AZAR; SAMUEL, 2007).

#### 2.4.5 Influxo (e /ou *Kick*)

Durante as operações de perfuração, é possível encontrar zonas que apresentam fluido preso, quando a broca entra em contato com essas regiões o fluido, seja gás ou óleo, flui para o poço. Em geral, um *kick* ocorrerá quando a pressão de formação se torna maior que a pressão induzida a partir do fluido de perfuração e o sistema de contrapressão. Isso pode acontecer durante a perfuração numa zona de alta pressão inesperada (AZAR; SAMUEL, 2007; GABALDON *et al*, 2014).

A primeira indicação de um *kick* é um aumento súbito da taxa de perfuração. A seguinte advertência é o aumento de taxa de fluxo causado pela entrada de fluido de formação. A entrada pode ser muito rápida. A entrada de fluxo desde a formação fará que a pressão hidrostática do poço diminua. Isto será observado pela redução da pressão na bomba de alimentação (CARLSEN; NYGAARD; NIKOLAOU, 2013).

Para evitar os problemas mencionados deve-se ter um controle rigoroso da pressão durante a perfuração, é necessário então utilizar controladores para sua execução.

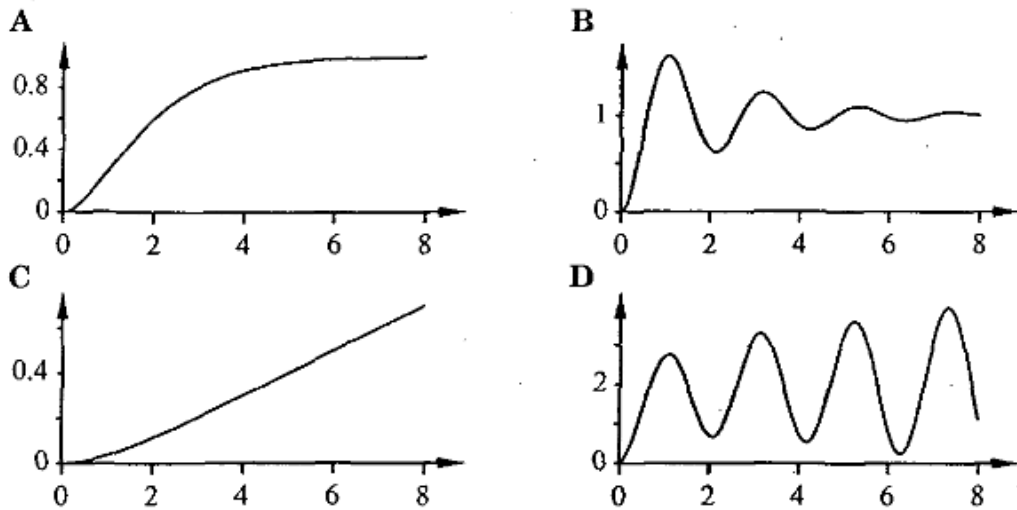
## 2.5 MODELO DO PROCESSO

A resposta ao degrau em laço aberto de um sistema pode ser explicada analogamente na prática manipulando a variável de controle de forma manual e rápida, por exemplo, no caso do sistema de perfuração deve-se fechar ou abrir rapidamente a válvula de estrangulamento de forma manual.

Muitas propriedades do sistema podem ser entendidas diretamente da resposta ao degrau. Existem diferentes tipos de resposta ao degrau em sistemas lineares no processo de laço aberto, a seguir uma lista deles. Na Figura 2.7A, a saída do processo muda da região transiente para um estado estacionário. Este é o tipo de resposta mais comum encontrada no controle de processos. Na Figura 2.7B, A saída do processo oscila ao redor do estado estacionário. Este processo é comum no projeto mecânico, onde são utilizados materiais elásticos, por exemplo, eixos fracos em servomecanismos, projetos com molas, etc. Nas Figuras 2.7A e 2.7B são considerados processos estáveis devido a que chegam ao estado estacionário em um determinado tempo, enquanto os sistemas mostrados nas Figuras 2.7C e 2.7D são instáveis devido a que seu comportamento dinâmico tende ao infinito e não conseguem chegar ao estado estacionário. O sistema na figura 2.7C mostra a saída de um processo integrado, i.e. que o processo apresenta uma raiz zero ou poderia ser interpretado como um integrador (em transformada de Laplace  $1/s$ ) próprio do processo. É por isso que ao excitar o processo a resposta mostra-se como uma função rampa; lembre-se que a função rampa é representada na transformada de Laplace como  $1/s^2$  que para este caso seria a multiplicação de dois integradores um da própria planta devido à raiz zero e a outra a função degrau.

Exemplos de processos integrados podem-se apresentar em processos de controle de nível, pressão e temperatura. O fator comum denominador em todos estes processos é que ocorre um tipo de armazenamento. Em nível e pressão ocorre um armazenamento de massa, por exemplo, se é feita alguma ação sobre a válvula e se esta não tivesse um controlador então o razoável seria que exista um aumento de estas variáveis devido à acumulação de massa no processo fazendo que a dinâmica torne-se instável. No controle da temperatura ocorre um armazenamento de energia (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995; BOIKO, 2013).

Figura 2.7 - Tipos de respostas em malha aberta



Fonte: (ASTROM; HAGGLUND, 1994)

### Modelos de Processos Integrados

Existem alguns sistemas de controle de processos, os quais, sua dinâmica apresenta um elemento de integração (um polo zero). Este tipo de sistemas não atinge o estado estacionário em laço aberto. Eles são chamados de sistemas sem auto-regulação.

Os Modelamentos baseados na resposta ao degrau podem ser aplicados em processos integrados. O modelo que se aproxima da melhor maneira ao modelo real é descrito mediante a função de transferência apresentada na equação (2.6). (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995; JOHNSON; MORADI, 2005)

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (2.6)$$

O modelo é caracterizado pelos dois parâmetros: "K" e "τ" conforme a equação (2.7)

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (2.7)$$

Como  $U(s)$  é o sinal de entrada (degrau), pelo qual é substituído por  $1/s$ .

$$Y(s) = \frac{K}{s^2(\tau s + 1)} \quad (2.8)$$

Aplicando a Transformada de Laplace inversa na equação (2.8) obtém-se o sinal de saída no tempo.

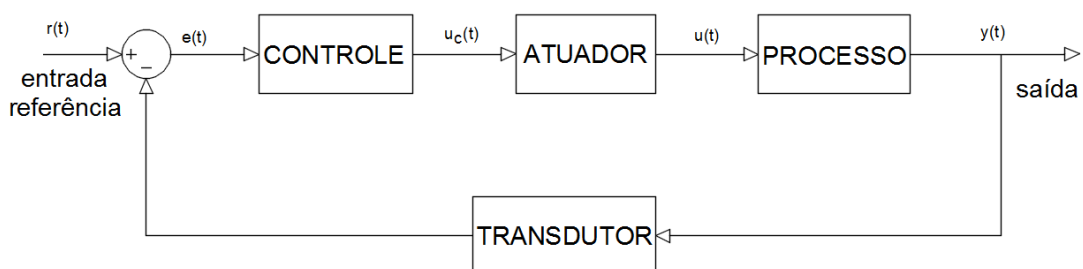
$$y(t) = K(t - \theta - \tau(1 - e^{-(t-\theta)/\tau})) \quad (2.9)$$

Finalmente, a equação (2.9) é a função no domínio do tempo da resposta do processo dinâmico excitado pela função degrau (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1989; SHAHRI; BALOCHIAN, 2012).

## 2.6 CONTROLADOR PID

A Figura 2.8 mostra uma estrutura típica de controle em laço fechado que inclui quatro componentes de engenharia.

Figura 2.8 - Componentes típicos no controle industrial em malha fechada.



Fonte: (MORADI, 2005)

### Processo

Refere-se ao sistema físico propriamente dito, pela qual algumas variáveis físicas específicas do processo podem ser controladas ou reguladas. Exemplos típicos de processos na indústria são caldeiras, fornos e torres de destilação. Para este trabalho o processo será o sistema de perfuração e será representado por  $G(s)$  (JOHNSON; MORADI, 2005; CREUS, 2011).

### Atuador

O atuador é a unidade que fornece potência ao processo para efetuar uma ação. O atuador é a ligação entre o controlador e o processo, ele se encarrega de atuar sobre o processo do jeito que o controlador ordena (JOHNSON; MORADI, 2005; CREUS, 2011).

### Sensor

Geralmente, a medida do processo incorpora um transdutor e um componente associado ao processo do sinal. O transdutor compreende um sensor para detectar uma propriedade física específica (por exemplo, temperatura) e a saída é a representação da propriedade física de uma forma diferente (por exemplo, voltagem). Durante a aquisição de dados, é possível que a saída da medição seja um sinal ruidoso ou que contenha erros de leitura, por tanto se devem tratar estas medições antes de aplicar o controle (JOHNSON; MORADI, 2005; CREUS, 2011).

### Controlador

O controlador é a unidade matemática projetada para criar um sistema estável e para conseguir alguns requisitos de desempenho do processo. A entrada para o controlador de unidade é normalmente um sinal de erro com base na diferença entre um ponto de ajuste desejado ou sinal de referência e a saída real do sistema medido pelo sensor. Neste trabalho o controlador será representado por  $C(s)$ .

Um dos tipos de controlador mais utilizados na indústria mundial é o PID. O controlador PID é uma importante ferramenta de controle por três razões principalmente: histórico de sucesso, ampla disponibilidade e simplicidade de uso. Isto se reforçam mutuamente, embora tendo controladores mais avançados não tem sido capaz de deslocar o controle PID das aplicações industriais.

O controle do tipo PID é um nome comumente dado no controle de três termos. Estes são “P” para o termo proporcional, “I” para o termo integral e “D” para o termo derivativo (JOHNSON; MORADI, 2005; CREUS, 2011).

### Controle Proporcional

A ação do controlador é simplesmente proporcional ao tamanho do sinal de erro e cumpre com a equação (2.10)

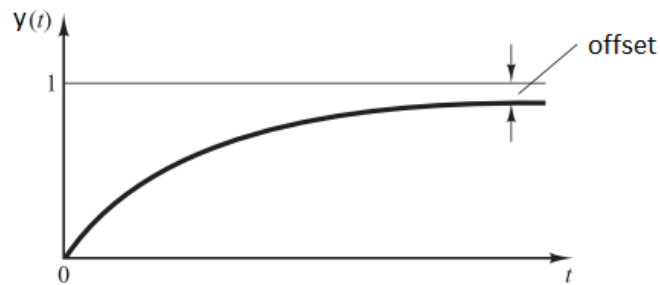
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.10)$$

Sendo  $r(t)$  a referência de entrada,  $y(t)$  a saída do sistema e  $e(t)$  é o erro entre ao sinal de referência e a saída (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995; NISE, 2000).

### Controle Integral

O controle integral é utilizado quando é necessário que o controlador corrija qualquer deslocamento do estado estacionário de um sinal de referência constante (*offset*). (Figura 2.9) O termo integral elimina tal *offset* sem a necessidade de utilizar ganhos maiores do elemento proporcional (ASTRÖM; HÄGGLUND, 1995; NISE, 2000; OGATA, 2010).

Figura 2.9 - Resposta de um processo ao degrau sem termo integral no controlador.



Fonte: (OGATA, 2010)

### Controle Derivativo

Se um controlador pode utilizar a taxa de variação de um sinal de erro como uma entrada, então, é possível prever o comportamento deste erro, isto faz com que o comportamento da saída do sistema não apresente grandes sobressinais e seja mais amortecido. O derivativo deve-se empregar com maior cuidado, por exemplo, na maioria das aplicações reais o termo derivativo não pode ser implementado isoladamente devido à possibilidade de amplificação de ruído da medição (gera má leitura do sistema real) e um termo modificado (proporcional ou integral) pode ser usado em seu lugar. No entanto, o controle derivativo possui características úteis e essenciais quando interage com outros termos P ou PI nas aplicações de controle do mundo real (NISE, 2000; JOHNSON; MORADI, 2005; CREUS, 2011).

A introdução da transformada de Laplace (TL) para estudar o desempenho de sistemas de controle de malha fechada fundamenta seu sucesso tecnológico na comunidade de engenharia. Trabalhar o sistema com a TL (em função  $s$ ) é mais conveniente devido a sua simplicidade operativa. Além disso, o uso da TL está restrito à formulação linear. Ou seja, uma vez linearizado um processo, o uso da TL permite a especificação de sistemas de controle de forma direta, já que esta técnica permite a identificação de funções de transferência de forma algébrica. Esta é a vantagem da TL.

A base teórica para analisar o desempenho do controle PID é ajudado consideravelmente pela simples representação de um integrador pela transformada de Laplace,  $1/s$ , e um diferenciador utilizando  $s$ .

Se um processo real pode ser representado mediante modelos matemáticos, então é possível aplicar técnicas de controle para a determinação dos parâmetros do controlador que atenderão as especificações ótimas do regime transitório e permanente do sistema.

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Métodos tradicionais sugeriram regras para a sintonia de controladores PID baseadas na resposta experimental ao degrau. Embora o controlador PID só tenha três parâmetros, não são fáceis de sintonizar, sem um procedimento sistemático. (JOHNSON; MORADI, 2005).

### Robustez do Sistema ( $M_s$ )

Entende-se por robustez do sistema ao deslocamento máximo dos polos da equação característica que estão na esquerda do plano  $s$  ate que, estes polos, cruzem o eixo imaginário atingindo a instabilidade (OGATA, 2010). A robustez do sistema de controle é quantificada conforme o valor máximo da sensibilidade  $M_s$ , o qual, é representado matematicamente pela equação (2.11).

$$M_s = \max_w \left| \frac{1}{1 + C(jw)G(jw)} \right| \quad (2.11)$$

No Diagrama Nyquist,  $M_s$  é a inversa da distancia mais próxima do ponto critico  $(-1, j0)$  à função de transferência em malha aberta  $G(s)$ . Os valores do  $M_s$  estão na faixa de 1.4 e 2. Geralmente, é preferível um valor baixo do  $M_s$  (ÅSTRÖM, 1998).

### Erro Absoluto Integrativo do Disturbio (IAE-d)

Consiste na integração do erro absoluto do sinal da resposta do sistema controlado e, para este caso, somente relacionado na presença de distúrbios. Este parâmetro é quantificado mediante a equação (2.12)

$$IAE = \int_0^{\infty} |y(t) - r(t)| dt \quad (2.12)$$

sendo,  $r(t)$  a referência de entrada e  $y(t)$  a saída do sistema (JIN; LIU, 2014), conforme a Figura 2.8.

### Sobressinal

É o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade (valor de referência). É comum utilizar a porcentagem máxima de sobressinal referente á unidade (OGATA, 2010).

### Tempo de subida

É o tempo requerido para que a resposta passe de 10% a 90%, ou de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do valor final. Para sistemas de segunda ordem subamortecidos, o tempo de subida de 0% a 100% é o normalmente utilizado. Para os sistemas superamortecidos, o tempo de subida de 10% a 90% é o mais comumente utilizado (OGATA, 2010).

### Tempo de acomodação

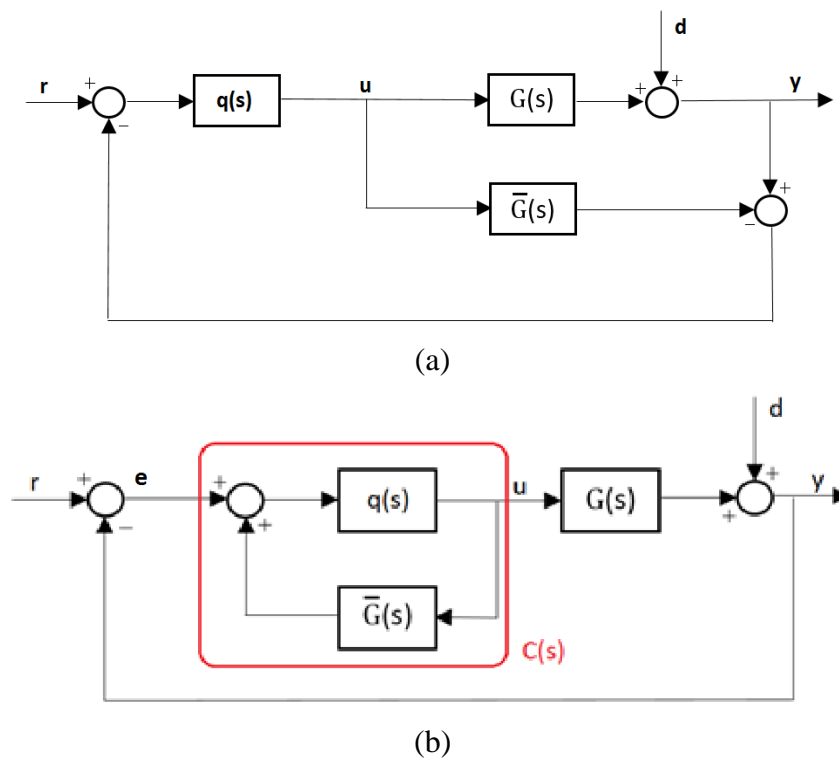
É o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores numa faixa (geralmente de 2 % ou 5%) em torno do valor final, aí permanecendo indefinidamente. O tempo de acomodação está relacionado à maior constante de tempo do sistema de controle. Pode-se determinar qual porcentagem deve ser utilizada no critério de erro a partir dos objetivos do projeto do sistema em questão (OGATA, 2010).

## 2.6.1 Controlador IMC

O controlador IMC foi apresentado por primeira vez por Rivera (1986). O controle IMC, ou controle IMC tradicional, providencia uma estrutura adequada com informação valiosa que ajuda na sintonização dos parâmetros do controlador com maior simplicidade,

melhorando o desempenho e robustez do sistema. A Figura 2.10 mostra a estrutura do controlador IMC que é composto pelo processo real  $G(s)$ , o modelo do processo  $\bar{G}(s)$  e a função de transferência  $q(s)$ . Este último é a única variável manipulável que muda a resposta do sistema em laço fechado. O sinal de saída do  $q(s)$  afeta a  $G(s)$  e  $\bar{G}(s)$  e a diferença entre a saída de estes sinais é restado do sinal de referência, o que gera o erro de retroalimentação.

Figura 2.10 - (a) Estrutura do controlador IMC (b) Arranjo de diagrama de blocos para um controlador clássico.



Fonte: (RIVERA, 1986)

A parte (b) da Figura 2.10 é obtida utilizando um arranjo de diagrama de blocos. O relacionamento entre  $q(s)$  e  $\bar{G}(s)$  gera a função de transferência do controlador  $C(s)$  se tornando uma estrutura de retroalimentação conhecida.

A relação entre a função de referência, a função distúrbio e a saída do sistema é representada pela equação (2.13) e (2.14).

$$y = \frac{qG}{1+q(G-\bar{G})}r + \frac{1-q\bar{G}}{1+q(G-\bar{G})}d \quad (2.13)$$

$$y = \eta r + \epsilon d \quad (2.14)$$

Sendo  $\eta$  a sensibilidade complementar e  $\epsilon$  a função da sensibilidade. A função de sensibilidade no diagrama de bode dá informação sobre a robustez sistema. Quando o modelo e a planta coincidem ( $G = \bar{G}$ ) a expressão de  $\eta$  se simplifica na equação (2.15) e as equações (2.16) e (2.17) mostram o procedimento que leva a simplificação da expressão  $\epsilon$  na equação (2.18).

$$\bar{\eta} = q\bar{G} \quad (2.15)$$

$$\bar{\eta}q^{-1} = qq^{-1}\bar{G} \quad (2.16)$$

$$\bar{\eta}q^{-1} = \bar{G} \quad (2.17)$$

$$\bar{\epsilon} = 1 - q\bar{G} = 1 - \bar{\eta} \quad (2.18)$$

Para assegurar que o sistema não apresenta problemas de *offset* devido às mudanças de referência ou distúrbios no processo.

Deve-se cumprir com a equação (2.19), para entradas degrau (tipo 1):

$$\lim_{s \rightarrow 0} q\bar{G} = \bar{\eta}(0) = 1 \quad (2.19)$$

E com a equação (2.20), para entradas rampa (tipo 2):

$$\lim_{s \rightarrow 0} q\bar{G} = 1 \quad (2.20)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds}(q\bar{G}) = \left. \frac{d\eta}{dx} \right|_{s=0} = 0 \quad (2.21)$$

O cenário ideal do comportamento do sistema posiciona-se quando  $y$  é igual que  $r$  na equação (2.14); para isso acontecer, deve-se cumprir que  $\eta = 1$  e  $\epsilon = 0$ . Então, procura-se um  $q(s)$  que seja o inverso do modelo do processo  $\bar{G}$  para garantir a igualdade.

Outra consideração segundo Rivera *et al.*, (1986): o sistema retroalimentado com controlador é estável se apenas  $G$  e  $q$  são estáveis. Por tanto, não há necessidade de determinar a estabilidade do sistema mediante as raízes do polinômio característico, por que a estabilidade do sistema fica definida pelos polos da função  $q$  sem perda de generalidade. Em alguns casos, existe a possibilidade que o processo seja instável, denomina-se de processo instável aquele processo dinâmico que não atinge o regime estacionário em momento nenhum, estes processos podem-se ser estabilizados usando compensadores que cancelem o polo que cria a instabilidade no processo, além disso, podem-se usar parâmetros do tipo PI na retroalimentação tendo melhor ação sobre o comportamento do sistema (OGATA, 2010). Um processo com elemento integrativo é instável, mas pode-se considerar que a parte integrativa do processo e a entrada degrau como distúrbios, em conjunto, formem uma entrada rampa. Nessa situação, o sistema atinge a estabilidade mediante a inserção de um filtro que será apresentado adiante, no enquanto o *offset* é eliminado mediante a equação (2.21).

Por outro lado, há certos requerimentos que a função  $q$  deve cumprir para assegurar a capacidade de implementação física do controlador IMC. Um deles é que os polos devem-se encontrar no lado esquerdo do plano  $s$ .

Um segundo requerimento, se apresenta devido à derivação de um sinal de entrada degrau retroalimentada, o qual, gera mudanças infinitesimais de tempo (impulsos) que não são fisicamente implementáveis. A fim de evitar a diferenciação pura dos sinais, deve-se exigir que  $q$  seja Própria, o que significa que:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} |q(s)| \geq 0 \quad (2.22)$$

O último requerimento chama-se de causalidade,  $q(s)$  deve ser causal, o que significa que o controlador não deve exigir predição, ou seja, ele deve contar com medições de plantas atuais e anteriores. Um exemplo simples de uma função de transferência não causal é o inverso de uma função de transferência de tempo de atraso.

O procedimento de projeção do IMC consiste em duas etapas principais. O primeiro passo é garantir a estabilidade e causalidade de  $q(s)$ ; para isso, o modelo do processo se divide em duas partes conforme a equação (2.23), a primeira contém todos os elementos que são de fase não mínima ( $\bar{G}_-$ ) e a outra, de fase mínima ( $\bar{G}_+$ ).

$$\bar{G} = \bar{G}_- \bar{G}_+ \quad (2.23)$$

Nesse sentido, o valor de  $\bar{q}$  fica definido pela equação (2.24) para garantir com os requerimentos.

$$\bar{q} = \bar{G}_-^{-1} \quad (2.24)$$

A outra parte (fase mínima) pode ser fatorizado por exemplo como a equação (2.25)

$$\bar{G}_+ = e^{-\theta s} \prod_i (-B_i s + 1); \text{Re}(B_i) > 0 \quad (2.25)$$

O segundo passo irá exigir que  $q$  seja Própria, ou seja, que cumpra com a equação (2.22). Da equação (2.15) obtém-se a equação a seguir.

$$\bar{\eta} = q \bar{G}_- \bar{G}_+ \quad (2.26)$$

É importante distinguir que  $q$  não é igual que  $\bar{q}$ . O  $\bar{q}$  cancela os valores de  $\bar{G}_-$ , além disso,  $\bar{q}$  é não própria. Então, para assegurar o último requerimento deve-se adicionar um filtro  $f(s)$  à função  $\bar{q}$  segundo na equação (2.27). Da equação (2.26) e (2.27) obteve-se a equação (2.28)

$$q = \bar{q} f(s) \quad (2.27)$$

$$\bar{\eta} = \bar{q} f(s) \bar{G}_- \bar{G}_+ \quad (2.28)$$

Uma estrutura de filtro comum e que elimina o *offset* para entradas passos ou rampas é representada pela equação (2.29)

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (2.29)$$

A ordem do denominador  $n$  é escolhida da maneira que faça  $q$  Própria, enquanto  $\lambda$  é um parâmetro ajustável que determina a velocidade de resposta.

Para casos em que o processo apresenta um elemento integrativo, como já foi explicado, deve-se considerar como um de tipo 2. Substituindo as equações (2.23), (2.24) e (2.27) na equação (2.21).

$$\frac{d}{ds} (\bar{q}f(s)\bar{G}_-\bar{G}_+) \Big|_{s=0} = \frac{d}{ds} (f(s)\bar{G}_+) \Big|_{s=0} = 0 \quad (2.30)$$

Para cumprir com a condição (2.30) o filtro é representado mediante a equação (2.31)

$$f(s) = \frac{(2\lambda - \bar{G}_+(0))s + 1}{(\lambda s + 1)^2} \quad (2.31)$$

Sendo  $\bar{G}_+(0)$  a fase mínima do processo quando  $s$  tende a zero.

## 2.6.2 Controlador SIMC

Este controlador foi proposto por Skogestad (2003). A ideia central do controlador SIMC é especificar a resposta de malha fechada desejada ( $[Y(s)/R(s)]_{des}$ ) para logo determinar os parâmetros do controlador para essa resposta desejada. A equação (2.32) mostra a estrutura de uma função transferência de um sistema de retroalimentação clássica.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)} \quad (2.32)$$

Isolando o controlador  $C(s)$  obteve-se um relacionamento em função do sinal de saída  $Y(s)$ , a sinal de referência  $R(s)$  e em função do processo  $G(s)$ . Substituindo a resposta de malha fechada desejada obteve a equação (2.33).

$$C(s) = \frac{1}{G(s)} \cdot \frac{1}{\left[\frac{Y(s)}{R(s)}\right]_{des} - 1} \quad (2.33)$$

Considere o diagrama de blocos da Figura 2.10(b) em que  $G(s)$  e  $C(s)$  denotam, respectivamente, o processo a ser controlada e o controlador a ser projetado,  $u(t)$  é o sinal de controle,  $e(t)$  é o sinal do erro, que é a diferença entre o sinal de referência  $r(t)$  e o sinal de saída medido  $y(t)$ .

O análise de processos instáveis é de soma importância. Por exemplo, o processo descrito na equação (2.34) apresenta um termo integrativo ou uma raiz zero, assim é considerado como um processo instável.

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (2.34)$$

O sistema sujeito a retroalimentação sem presença do controlador é representado pela equação (2.35).

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 - G(s)} \quad (2.35)$$

Substituindo a equação (2.34) em (2.35) obtém-se a equação (2.36)

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s^2 + s - K} \quad (2.36)$$

As raízes ou polos do processo se modificaram, mas ainda continuam dependendo dos parâmetros do processo, ou seja, a planta poderia ser instável ou não dependendo dos valores  $K$  e  $\tau$ .

A representação de um controlador PI é apresentada na equação (2.37) em termos de  $s$ .

$$C(s) = k_C + \frac{t_I}{s} \quad (2.37)$$

Adicionando um controlador PI na realimentação do sistema. Obtém-se a equação (2.38) e (2.39)

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} \quad (2.38)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K(k_C s + t_I)}{\tau s^3 + s^2 - K k_C s - K t} \quad (2.39)$$

Na equação (2.39), a estabilidade do processo agora depende dos parâmetros  $K_P$  e  $t_I$ , além dos parâmetros do processo, então agora pode-se escolher estes ganhos do jeito que os polos do sistema global se encontrem na esquerda do plano  $s$  (Critério de estabilidade Routh – Hurwitz).

O método SIMC pode ser aplicado também para um processo integrado com tempo de atraso ( $\theta$ ) como se descreve na equação (2.40)

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} e^{-\theta s} \quad (2.40)$$

A aplicação do método SIMC divide-se em duas etapas. A primeira etapa precisa de um ajuste do sistema em malha fechada para um de primer ordem com o mesmo atraso do processo original fazendo com que o sistema se comporte de maneira desejada (sobressinal, tempo de resposta, tempo de estabilização, etc). A equação (2.41) relaciona o comportamento do sistema em malha fechada desejado mediante uma função de transferência de primer ordem com atraso.

$$\left[ \frac{Y(s)}{R(s)} \right]_{des} = \frac{K}{\tau_c s + 1} e^{-\theta s} \quad (2.41)$$

Sendo  $\tau_c$  a constante de tempo do sistema em malha fechada desejada, e é o único parâmetro de ajuste para o controlador. O segundo estágio consiste na aplicação das configurações do controlador P, PI, ou PID, que sua estrutura depende do tipo de resposta ao degrau do processo ou o tipo de comportamento requerido da planta.

O SIMC utiliza uma variável  $\tau_c$  modificável que gera os valores dos três parâmetros PID, o trabalho desenvolvido Skogestad (2003) demonstraram que fazendo  $\tau_c = \theta$ , para processos integrativos, o comportamento do sistema torna-se mais robusto, o qual permite que o sistema varie em uma maior proximidade mantendo a sua estabilidade, no entanto, com a modificação do valor do termo integral consegue-se também uma maior tolerância à sensibilidade na presença de distúrbios.

### 2.6.3 Controlador de IMC com dois graus de liberdade

Jin e Liu (2014) apresentaram um trabalho que desenvolvia um método analítico de sintonização dos parâmetros do PID para processos integrativos com tempo de atraso, o qual, usa o método de otimização para determinar os parâmetros do PID que garantem a melhor robustez e desempenho do sistema. O que diferencia o método de Jin e Liu com o método IMC tradicional é a estrutura do filtro  $f(s)$ , este utiliza mais um parâmetro ( $\sigma$ ) conforme a equação (2.42).

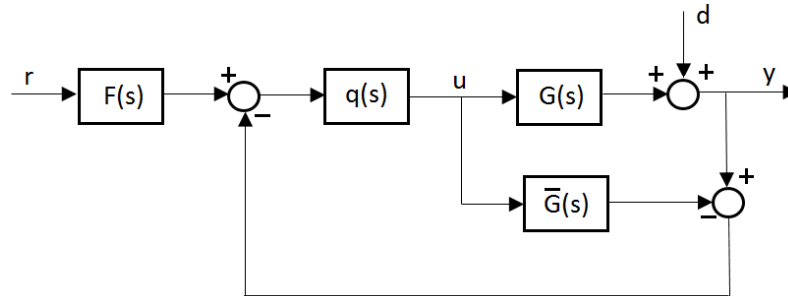
$$f(s) = \frac{b^2 s^2 + cs + 1}{(\lambda s + 1)^2 (\sigma s + 1)} \quad (2.42)$$

Sendo  $b = (2\tau\sigma\lambda + c\theta\tau - \sigma\lambda^2 + \lambda^2\tau)/(\tau + \theta)$ ,  $c = 2\lambda + \sigma + \theta$ ,  $\lambda$  e  $\sigma$  são as constantes do filtro que no trabalho de Jin e Liu (2014) se determinaram mediante otimização.

O controlador satisfaz com o desempenho à resposta transitória e com à rejeição ao distúrbio, simultaneamente, para o qual é usado um controle de dois graus de liberdade como se mostra na Figura 2.11, sendo  $F(s)$  um filtro adicional chamado de filtro *set-point* ou filtro

de referência, devido à localização na estrutura do sistema de controle retroalimentado, o qual melhora o comportamento de resposta transitória.

Figura 2.11 - Estrutura de sistema retroalimentado com filtro no sinal de entrada proposto por Jin e Liu (2014).



Fonte: (JIN; LIU, 2014)

Os procedimentos são formulados como um problema de otimização, no que, os parâmetros são obtidos através da minimização do índice de desempenho da rejeição do distúrbio de carga representado pelo erro absoluto integrativo, denotada por IAE-d. Um bom controlador deve fornecer um bom nível de robustez desejado. Assim, nos procedimentos de otimização, a robustez medida pela função de sensibilidade máxima  $M_s$  é formulado como uma restrição.

Finalmente, embora o método de otimização empregado possa resultar complexo, se forneceu regras de ajuste analíticas, tanto para o controlador e para o filtro de *set-point*. A equação (2.43) mostra a estrutura do filtro de referência em função de transferência.

$$F(s) = \frac{(\lambda s + 1)(\sigma s + 1)}{b^2 s^2 + c s + 1} \quad (2.43)$$

O modelo de primeira ordem integrativo com termo de atraso (POITDA) é representado pela equação (2.44)

$$\bar{G}(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} e^{-\theta s} \quad (2.44)$$

Usando  $\alpha = \theta/(\theta + \tau)$  e a transformação de  $\hat{s} = (\theta + \tau)s$ , o modelo POITDA pode ser representado como:

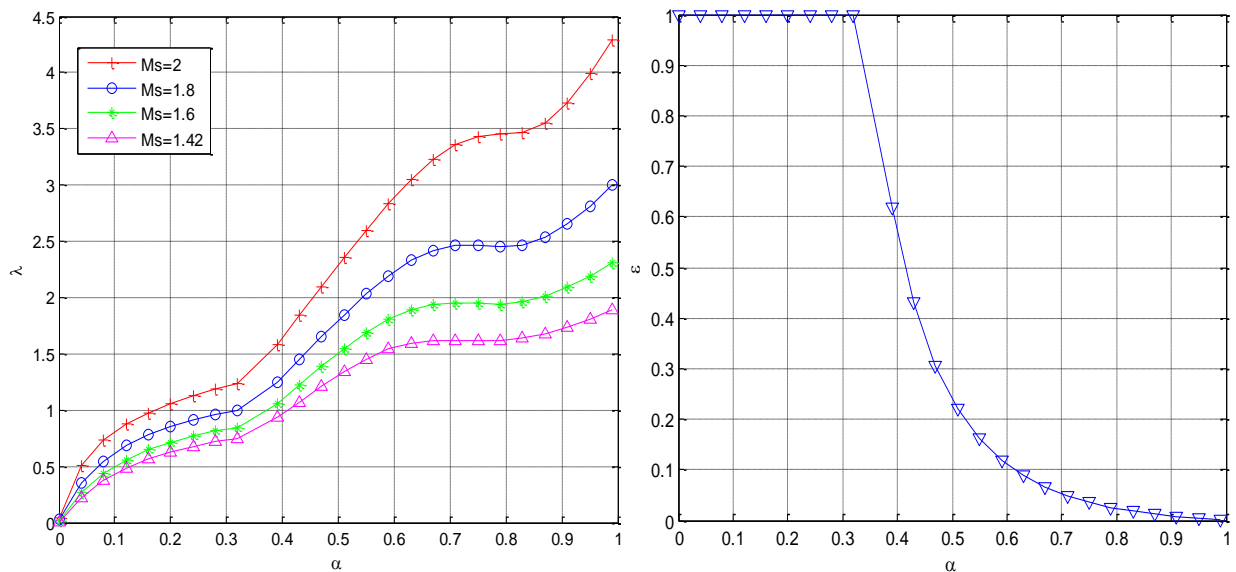
$$\bar{G}(s) = \frac{K'}{\hat{s}[(1-\alpha)\hat{s}+1]} e^{-\alpha\hat{s}} \quad (2.45)$$

Sendo  $K' = K(\theta + \tau)$ . O método de Jin-Liu utiliza a equação (2.45) como modelo para a projeção do controlador com  $\alpha$  na faixa de 0.01 e 1. O correlação entre  $\lambda$  e  $\sigma$  fica representado com a equação (2.46)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\lambda} = \begin{cases} 1, & 0.01 \leq \alpha \leq 0.35 \\ \frac{-0.06(\alpha-1)}{\alpha^3}, & 0.35 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (2.46)$$

A Figura 2.12 se utiliza para determinar os ganhos PID que dependem da robustez (Ms) do sistema e do parâmetro  $\alpha$ .

Figura 2.12 - Parâmetros ótimos do controlador IMC com dois graus de liberdade para quatro níveis de robustez.



Fonte: (JIN; LIU, 2014)

Finalmente, os três controladores podem-se resumir na Tabela 2.1 para a determinação analítica dos parâmetros do PID em um processo integrativo com tempo de atraso para controladores IMC.

Tabela 2.1 - Parâmetros PID de diferentes controladores IMC

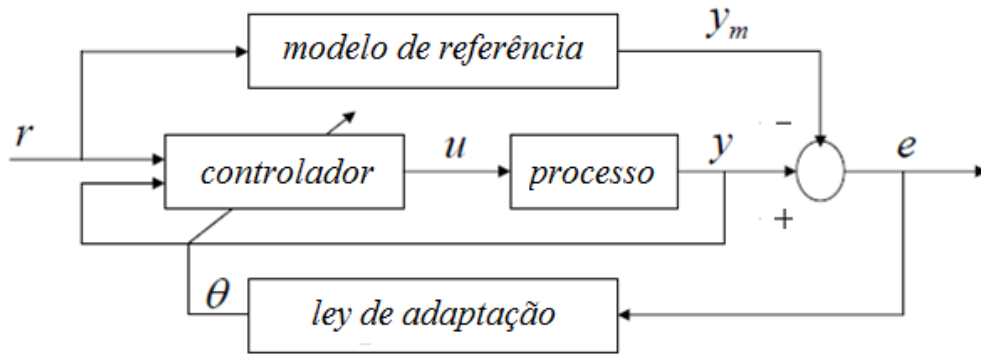
Controle	$k_C$	$t_i$	$t_D$	Filtragem
IMC	$\frac{\theta + 2\lambda + \tau}{K(\theta + \lambda)^2}$	$\theta + 2\lambda + \tau$	$\frac{\tau(\theta + 2\lambda)}{\theta + 2\lambda + \tau}$	-
SIMC	$\frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\tau_c + \theta}$	$4(\tau_c + \theta)$	$\tau$	-
JIN-LIU	$\frac{c}{K(2\sigma\lambda + \lambda^2 + c\theta - b^2)}$	$c$	$\frac{b^2}{c}$	$\frac{(\lambda s + 1)(\sigma s + 1)}{b^2 s^2 + cs + 1}$

Fonte: Aatoria Própria

## 2.7 CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERENCIA (CAMR)

O sistema adaptativo por modelo de referência foi originalmente proposto para solucionar o problema das especificações de desempenho do sistema as que são dadas em termos do modelo de referência. Este modelo indica como a saída do processo, deve teoricamente, responder ao sinal de comando. O diagrama de blocos do sistema CAMR é apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Estrutura do Sistema controlado por CAMR.



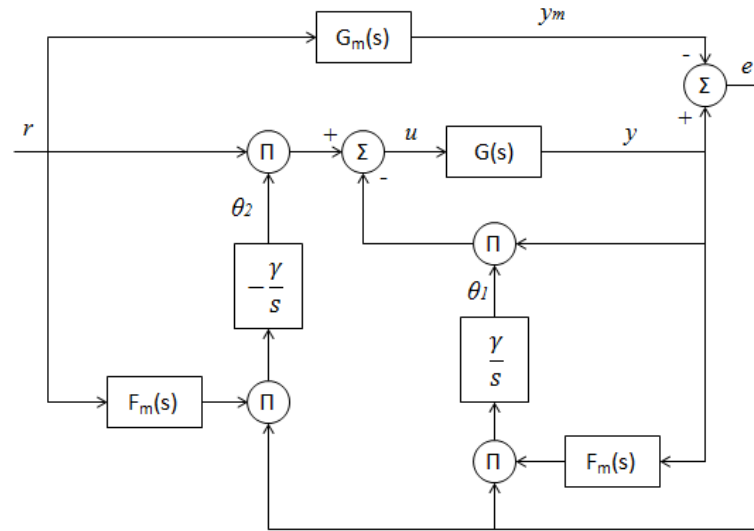
Fonte: (IOANNOU; SUN, 1996).

O controlador é composto de duas malhas fechadas, uma interna e outra externa. A malha fechada interna trata de uma retroalimentação ordinária composta pelo processo e pelo controlador. E o objetivo da malha fechada externa consiste em ajustar os parâmetros do controlador de forma a minimizar o erro, que é a diferença entre a saída do processo  $y$  e a saída do modelo de referência  $y_m$ . O objetivo principal do CAMR é determinar o mecanismo de ajuste e obter a lei de adaptação para que a resposta desejada do sistema seja estável e com elevada precisão. O mecanismo de ajuste dos parâmetros utilizado denominasse a regra do MIT, e é apresentado conforme a equação (2.47). A Regra do MIT pode ser considerada um esquema de gradiente para minimizar o erro quadrático (ASTROM; WITTENMARK, 1995).

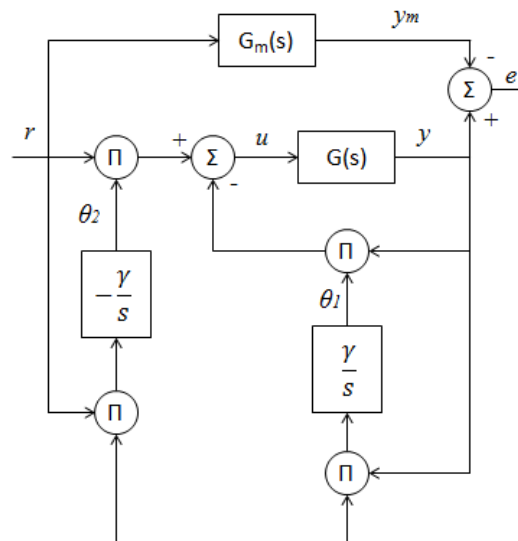
$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.47)$$

Nesta equação,  $e = y - y_m$  denota o erro do modelo e  $\theta$  é o parâmetro do controlador. A derivada  $\partial e / \partial \theta$  representa a sensibilidade do erro em relação ao parâmetro  $\theta$ . E o parâmetro  $\gamma$  determina a taxa de adaptação. A seguir, apresentam-se as duas estruturas mais comuns de CAMR conforme a Figura 2.14.

Figura 2.14 – Estrutura de controladores adaptativos de modelo de referencia a MIT RULE (a) e Lyapunov (b).



(a)



(b)

Fonte: (ASTROM; WITTENMARK, 1995).

## 2.8 O MÉTODO *GAIN SCHEDULING* (GS)

No início de 1950, o projeto de pilotos automáticos para aeronaves de alto desempenho foi um grande desafio e uma das principais motivações para a pesquisa relacionada com novas metodologias de controle. E entre os resultados se obteve o controle GS que consiste em controlar processos variantes no tempo, que são os casos dos aviões que operam em uma ampla gama de velocidades e altitudes com dinâmica totalmente não linear e variável no tempo. Assim, para um dado ponto de operação, especificado pela velocidade da aeronave (número de Mach) e a altitude, a dinâmica das aeronaves complexas podem ser aproximadas por um modelo linear. Por exemplo, para um ponto operacional “i”, o modelo linear da aeronave é representada pelas equações (2.48) e (2.49), conforme a seguir,

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \quad x(0) = x_0 \quad (2.48)$$

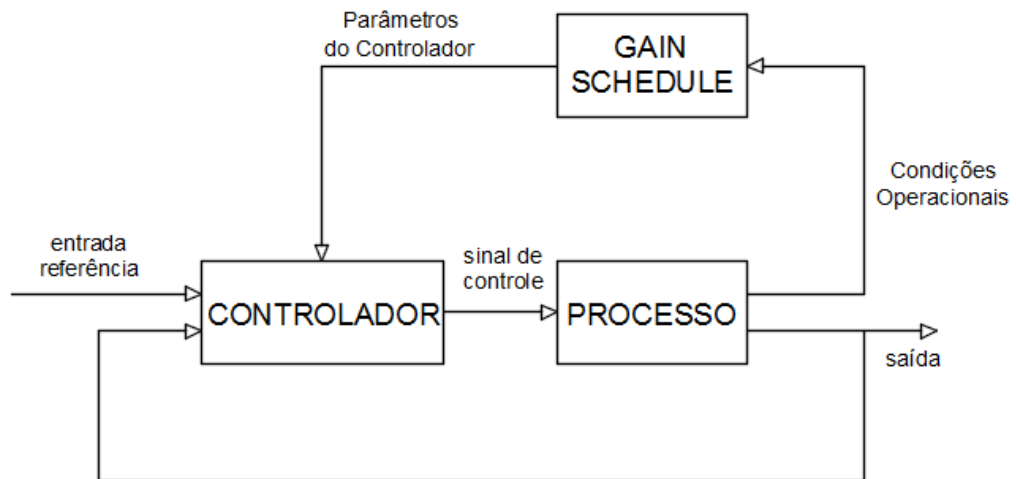
$$y(t) = C_i x(t) + D_i u(t) \quad (2.49)$$

onde,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  e  $D_i$  são funções que dependem do ponto operacional “i”. Como a aeronave esta sujeita a diferentes condições de voo, e a constante mudança de parâmetros, o ponto operacional muda. O que leva a ter diferentes valores de  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  e  $D_i$  (IOANNOU; SUN, 1996).

Na prática, a principal vantagem da implementação do controlador GS reside em que os ganhos obtidos e tabelados podem ser mudados de forma rápida, e utilizados de acordo com a faixa operacional, as medições auxiliares e responder as alterações dos parâmetros do sistema. E a principal desvantagem da implementação do GS é que o mecanismo de ajuste dos ganhos do controlador é pré-calculado *off-line* (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 1995).

A Figura 2.15 descreve o funcionamento de um sistema controlado pela metodologia GS. Ao contrario dos sistemas com controladores tradicionais; mostra-se um terceiro bloco denominado *Gain Schedule*. Neste bloco se armazena informação numa tabela que é criada previamente com os valores dos parâmetros do controlador para diferentes pontos operacionais. Assim quando o processo varie para outro ponto operacional, o bloco GS faz variar os ganhos dos parâmetros do controlador para preservar a estabilidade do sistema.

Figura 2.15 - Sistema em malha fechada com controlador *Gain Scheduling*.



Fonte: (ASTROM; WITTENMARK, 1995)

Neste trabalho, para determinados parâmetros do processo de perfuração de poços de petróleo existirão determinados valores dos parâmetros PID. Nesse sentido, visa-se a obtenção de uma tabela com diferentes pontos de operação (profundidade da perfuração).

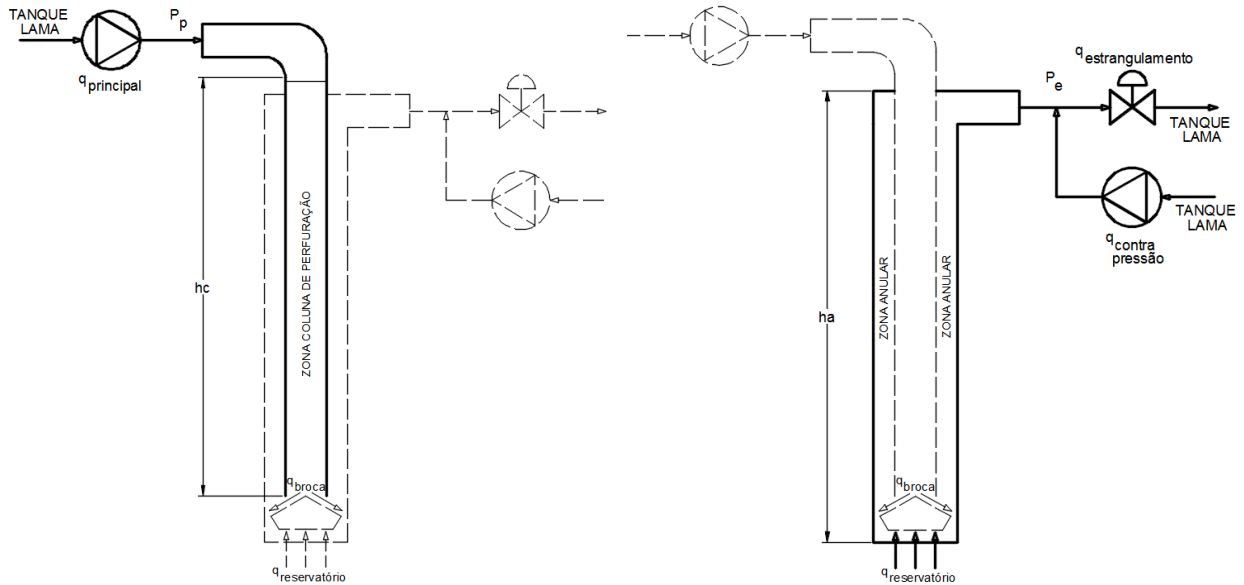
### 3 MODELAMENTO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE PERFURAÇÃO

Neste capítulo apresentam-se as equações diferenciais relacionadas à pressão no fundo do poço. Estas equações foram obtidas e fundamentadas na mecânica de fluidos (equação de transporte de Reynolds: continuidade e quantidade de movimento). O modelo desenvolvido foi proposto por Kaasa (2006) e é apresentado com maior detalhe no ANEXO I. O modelo apresentado é um modelo simples que unicamente considera uma fase do fluido de perfuração (líquido). Posteriormente, estas equações (não lineares) serão linearizadas mediante expansão de séries de Taylor para posteriormente ser representadas em função da transformada de Laplace. Finalmente, o modelo é ajustado para uma função de transferência predeterminada a fim de aplicar as teorias de controle mencionadas na seção 2.6.

#### 3.1 MODELO NÃO LINEAR

O sistema de perfuração é descrito na Figura 3.1, conformado por tubos de perfuração, duas bombas de lama, uma válvula de estrangulamento, e uma broca de perfuração principalmente. Os tubos de perfuração são considerados como não segmentados com uma broca presente no fundo do poço. Na parte superior do sistema (na superfície da plataforma) se encontra uma bomba principal de lama conectada à coluna de perfuração. A região anular e o tubo de rotação (tubo de perfuração) são concêntricos. A segunda bomba de contra pressão não é conectada ao tubo de perfuração, mas, diretamente à região anular; pode ser utilizada para aumentar a pressão do poço e manter o grau de circulação do poço durante a conexão de tubulação. Para fins de modelamento, o poço foi dividido em dois volumes de controle diferentes como se mostra na Figura 3.1. Para o modelo, a temperatura não foi considerada embora as variações da temperatura no poço possam ser muito significantes, mas, para este trabalho considera-se temperatura constante (condições isotérmicas).

Figure 3.1 - Poço dividido em dois volumes de controle.



Fonte: (BREYHOLTZ, 2008)

Resumindo as equações não lineares obtidas por Kaasa (2006) e apresentadas no ANEXO I obtêm-se as equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4).

$$\frac{V_D}{\beta} \dot{P}_p = q_p - q_b - \dot{V}_c \quad (3.1)$$

$$\frac{V_A}{\beta} \dot{P}_e = q_b + q_{res} + q_c - q_e - \dot{V}_A \quad (3.2)$$

$$q_b = \frac{1}{M} \left[ P_p - P_e - F_a (q_b + q_{res})^2 - F_c q_b^2 + (\rho_c - \rho_a) g h_b \right] \quad (3.3)$$

$$P_b = \frac{M_c}{M} P_e + \frac{M_a}{M} P_p + \frac{M_c}{M} F_a (q_b + q_{res})^2 - \frac{M_a}{M} F_c q_b^2 + \left( \frac{M_a}{M} \rho_c - \frac{M_c}{M} \rho_a \right) g h_b \quad (3.4)$$

Este é um modelo simples, mas ele tem um amplo aceite no estudo de outros trabalhos. A simulação do modelo foi verificada por muitas aplicações em tempo real e pode-se ver em Godhavn *et al.* (2011), Yilmaz *et al.* (2011), Pedersen *et al.* (2015), entre outros. No entanto, o processo descrito pode ser melhorado com modelos mais complexos que possam surgir no futuro.

Tabela 3.1 – Nomenclatura e especificação do tipo de variáveis do modelo proposto por Kaasa (2006).

Tipo de Variável	Símbolo	Denominação
Entrada	$q_c$	Vazão da bomba de contra pressão
	$q_e$	Vazão da válvula de estrangulamento
	$q_p$	Vazão da bomba principal
	$q_{res}$	Vazão do reservatório
	$h_b$	Profundidade de perfuração da broca
Saída	$P_b$	Pressão da broca
Estado	$P_p$	Pressão da bomba principal
	$P_e$	Pressão de estrangulamento
	$q_b$	Vazão que passa pela broca
Processo	$F_a$	Fator de atrito anular
	$F_c$	Fator de atrito da coluna de perfuração
	$g$	Gravidade
	$V_a$	Volume de a região anular
	$V_c$	Volume de a região da coluna de perfuração
	$\rho_a$	Densidade de a região anular
	$\rho_c$	Densidade de a região da coluna de perfuração
	$M_a$	Massa de a região anular
	$M_c$	Massa de a região da coluna de perfuração
	$M$	Massa total do sistema

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 3.1, apresentam-se as variáveis de entrada do modelo do processo não linear representado pelas equações (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4). Neste trabalho, as variáveis de entrada são referidas aos parâmetros que afetam diretamente à variável de saída e que podem ser modificados por um ente externo. A variável de saída é a variável que, geralmente, procura ser controlada. Além disso, existem outras variáveis denominadas de estado que podem ser consideradas como as variáveis que ligam as variáveis de entrada e saída, são chamadas assim por manter a estrutura da equação de estado e estão presentes como a diferencial da variável. Por ultimo, as variáveis do processo são chamadas aos parâmetros que variam segundo a profundidade de perfuração e são dependentes da geologia do terreno e próprios do processo de perfuração.

### 3.2. MODELO LINEARIZADO

Um sistema é dito linear se o princípio de superposição se aplicar a ele. O princípio de superposição afirma que a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas funções é a soma das duas respostas individuais. Da mesma maneira, um sistema é não linear se o princípio de superposição não se aplicar a ele.

Na engenharia de controle, se um sistema não linear trabalhar em torno do ponto limitado de operação e a flutuação dos valores operacionais é pequena, então é possível aproximar o sistema não linear por um sistema linear. A linearização de modelos não lineares é uma prática muito comum, importante e útil na engenharia. (PINTO, 2009; OGATA, 2010).

O processo de linearização, apresentado a seguir, tem como base o desenvolvimento da função não linear em series de Taylor em torno do ponto de operação e a retenção unicamente do termo linear.

Primeiro, devem-se identificar as variáveis de entrada e saída do sistema representado pelas equações não lineares já mencionadas. As variáveis de entrada são aquelas variáveis que podem-se manipular para modificar algumas outras variáveis, para este caso foram consideradas os parâmetros de  $q_p$ ,  $q_{res}$ ,  $q_c$ ,  $q_e$  e  $h_b$ . As variáveis de saída, geralmente no controle, são aquelas que se pretendem controlar ( $P_b$ ). Utilizando as equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4) aplicou-se as series de Taylor obtendo equações que são arranjadas na equação de estado do sistema dinâmico como se mostra nas equações (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8)

$$J_a = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial P_p} & \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial P_e} & \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} \\ \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial P_p} & \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial P_e} & \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \\ \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_p} & \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_e} & \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_b} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Definindo  $u$  como uma combinação da vazão da válvula de estrangulamento e a vazão produzida pela bomba de contrapressão ( $u = q_{cont} - q_{estran}$ ). De fato, a variável  $u$  será a variável de controle neste trabalho, ou seja, a PFP será controlada pela manipulação do sinal

*u*. No entanto, para este trabalho a vazão da bomba de contrapressão será considerada como constante deixando como única variável a vazão do estrangulamento.

$$J_b = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} & \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial u} & \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_{res}} & \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial h_b} \\ \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_p} & \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} & \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} & \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial h_b} \\ \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_p} & \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial u} & \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_{res}} & \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial h_b} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$J_c = \left( \frac{\partial P_b}{\partial P_p} \quad ; \quad \frac{\partial P_b}{\partial P_e} \quad ; \quad \frac{\partial P_b}{\partial q_b} \right) \quad (3.7)$$

$$J_d = \left( \frac{\partial P_b}{\partial q_p} \quad ; \quad \frac{\partial P_b}{\partial u} \quad ; \quad \frac{\partial P_b}{\partial q_{res}} \quad ; \quad \frac{\partial P_b}{\partial h_b} \right) \quad (3.8)$$

A equação de estado de um sistema dinâmico consiste na relação de variáveis de entrada (*U*), variáveis de estado (*X*) e variáveis de saída (*Y*).

$$\dot{X} = J_a X + J_b U, \quad x(0) = x_o \quad (3.9)$$

$$Y = J_c X + J_d U \quad (3.10)$$

As expressões (3.11) e (3.12) apresentam os vetores das variáveis de entrada e saída, conforme a equação de estado dadas por (3.9) e (3.10).

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_p \\ \dot{P}_e \\ \dot{q}_b \end{pmatrix} = J_a \begin{pmatrix} P_p \\ P_e \\ q_b \end{pmatrix} + J_b \begin{pmatrix} q_p \\ u \\ q_{res} \\ h_b \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} P_p(0) \\ P_e(0) \\ q_b(0) \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$P_{broca} = J_c \begin{pmatrix} P_p \\ P_e \\ q_b \end{pmatrix} + J_d \begin{pmatrix} q_p \\ u \\ q_{res} \\ h_b \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

As matrizes da equação de estado são dadas pelos parâmetros do sistema conforme as equações (3.13), (3.14), (3.15) e (3.16) a seguir,

$$J_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{\beta_c}{V_c} \\ 0 & 0 & \frac{\beta_a}{V_a} \\ \frac{1}{M} & \frac{-1}{M} & -\frac{2}{M} [(F_c + F_a)\bar{q}_b + F_a\bar{q}_{res}] \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$J_b = \begin{pmatrix} \frac{\beta_c}{V_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta_a}{V_a} & \frac{\beta_a}{V_a} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2F_a}{M}(\bar{q}_b + \bar{q}_{res}) & \frac{(\rho_c - \rho_a)g}{M} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$J_c = \left( \frac{M_a}{M} \quad : \quad \frac{M_a}{M} \quad : \quad -\frac{2}{M} [(F_c M_a - F_a M_c)\bar{q}_b + F_a M_c \bar{q}_{res}] \right) \quad (3.15)$$

$$J_d = \left( 0 \quad : \quad 0 \quad : \quad \frac{2F_a M_c}{M} (\bar{q}_{res} + \bar{q}_b) \quad : \quad \frac{(M_a \rho_c - M_c \rho_a)g}{M} \right) \quad (3.16)$$

A linearização do modelo é apresentada com maior detalhe no APENDICE A. A equação (3.17) relaciona o sinal de controle com a pressão no fundo do poço durante a perfuração em transformada de Laplace.

$$\frac{P_b(s)}{u(s)} = \frac{\frac{\partial P_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} s^2 + \left( \frac{\partial P_b}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} - \frac{\partial q_b}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial P_b}{\partial P_e} \right) s + \frac{\partial P_b}{\partial P_p} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial P_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} \frac{\partial P_e}{\partial u} \frac{\partial P_b}{\partial P_e}}{s \left( s^2 - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \right)} \quad (3.17)$$

Deve-se ressaltar que somente o modelo linearizado é utilizado na sintonização dos parâmetros do controlador, utilizando-se as metodologias de controle apresentadas na seção 2. Entretanto, uma vez obtidos estes parâmetros, o controlador é testado no processo real não linear  $G(s)$ . Por este motivo, a validação do modelo linear e não linear torna-se desnecessária.

## 4 PROJETO DO CONTROLADOR

O objetivo deste capítulo é a obtenção dos ganhos PID que façam com que o sistema apresente o melhor desempenho para diferentes pontos operacionais. Neste estudo de análise de desempenho dos controladores propostos e simulação foram consideradas as seguintes profundidades de perfuração: 500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros.

Com a finalidade de satisfazer os requisitos de comportamento do sistema controlado apresentados na Tabela 4.1, adotaram-se as estratégias de controle IMC devido a sua simplicidade na implementação e a seu bom desempenho na ação de distúrbios e no seguimento de sinal desejado. Fizeram-se testes com três tipos de controladores IMC, o primeiro proposto por Rivera (1986), o segundo, o controlador SIMC de Skogestad (2003), o qual utiliza um método analítico mais simples que o anterior como foi explicado no Capítulo 2. E finalmente se fizeram testes com o controlador IMC com dois graus de liberdade proposto por Jin e Liu (2014). Baseado nos desempenhos dos três tipos de controladores nos diferentes pontos operacionais (Tabela 4.1), se escolheu o melhor das três metodologias de controle do tipo IMC. Para depois, montar a tabela com os ganhos PID que conformarão o controlador *Gain Scheduling* no Capítulo 5.

Tabela 4.1 - Requisitos de desempenho do projeto do controlador.

Parâmetro de Desempenho do Sistema	Denominação
Robustez (Ms)	Menor ou igual que 1.8
Sobressinal	Menor que 5%
Tempo de subida	Menor que 9 segundos
Tempo de acomodação	Menor que 30 segundos

Fonte: Autoria Própria

### 4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO PROCESSO

O projeto do controlador começa com o desenvolvimento do modelo do processo. Para atingir esse objetivo, precisa-se dos parâmetros do poço e do reservatório que posteriormente serão inseridos no modelo. Nos trabalhos de Martins e Ribeiro (2007); Zhou *et al.* (2010);

Yilmaz *et al.* (2011); Carlsen, Nygaard e Nikolaou (2013); Pedersen e Godhavn (2013); e Hauge *et al.* (2013) apresentaram parâmetros do poço e do reservatório para diferentes profundidades. A Tabela 4.2 mostra dados de parâmetros de perfuração que para este trabalho serão considerados como fixos para todos os pontos operacionais analisados. A Tabela 4.3 mostra parâmetros de perfuração que não podem ser considerados como fixos, pois, em diferentes profundidades de perfuração estes valores apresentam outros valores mudando o modelo do processo em sua totalidade.

Tabela 4.2 - Parâmetros fixos usados na modelagem de um sistema de perfuração.

Parâmetros	Valor	Unidades
$\beta_a$	7000	Bar
$\beta_c$	11000	Bar
$\rho_a$	0,0119	$10^{-5}(\text{Kg/m}^3)$
$\rho_c$	0,0125	$10^{-5}(\text{Kg/m}^3)$
$q_{res}$	0,001	$\text{m}^3/\text{s}$
$q_b$	0,015	$\text{m}^3/\text{s}$
$d_i$	0,134	m
$d_e$	0,151	m
$d_p$	0,290	m
$A_a$	0,0481	$\text{m}^2$
$A_c$	0,0141	$\text{m}^2$
$S_{x_a}$	0,7778	m
$S_{x_c}$	0,421	m

Fonte: (MARTINS; RIBEIRO, 2007; ZHOU *et al.*, 2010; YILMAZ *et al.*, 2011; CARLSEN; NYGAARD; NIKOLAOU, 2013; PEDERSEN; GODHAVN, 2013; HAUGE *ET AL.*, 2013)

Tabela 4.3 - Parâmetros que variam segundo a profundidade de perfuração, usados na modelagem de um sistema de perfuração.

Profundidade (m)	500	1000	2000	3000	4000	5000
$V_a (\text{m}^3)$	24,07	48,14	96,29	144,43	192,58	240,72
$V_c (\text{m}^3)$	7,05	14,10	28,21	42,31	56,41	70,51
$M_a (10^{-5}\text{Kg/m}^4)$	399,2	798,4	1596,7	2395,1	3193,5	3991,9
$M_c (10^{-5}\text{Kg/m}^4)$	1431,5	2862,9	5725,9	8588,8	11452	14315
$F_a (10^{-5}\text{m}^7/\text{Kg})$	3942,7	7885,3	15771	23656	31541	39427
$F_c (10^{-5}\text{m}^7/\text{Kg})$	44194	88388	176780	265160	353550	441940

Fonte: (MARTINS; RIBEIRO, 2007; ZHOU *et al.*, 2010; YILMAZ *et al.*, 2011; CARLSEN; NYGAARD; NIKOLAOU, 2013; PEDERSEN; GODHAVN, 2013; HAUGE *ET AL.*, 2013)

Usando os valores das tabelas mencionadas conseguiu-se obter a função de transferência do sistema para diferentes pontos operacionais. O modelo do processo fica definido pela função de transferência representada pela equação (3.17) para diferentes pontos operacionais de 500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros de profundidade de perfuração, respectivamente, conforme a seguir.

$$\frac{P_b(s)}{U(s)} = \frac{227,4s^2+210,6s+247,8}{s(s^2+0,7931s+1,011)} \quad (4.1a)$$

$$\frac{P_b(s)}{U(s)} = \frac{113,7s^2+105,3s+30,97}{s(s^2+0,7931s+0.2527)} \quad (4.1b)$$

$$\frac{P_b(s)}{U(s)} = \frac{56,85s^2+52,65s+3,872}{s(s^2+0,7931s+0,06319)} \quad (4.1c)$$

$$\frac{P_b(s)}{U(s)} = \frac{37,9s^2+35,1s+1,147}{s(s^2+0,7931s+0.02808)} \quad (4.1d)$$

$$\frac{P_b(s)}{U(s)} = \frac{28,42s^2+26,33s+0,484}{s(s^2+0,7931s+0,0158)} \quad (4.1e)$$

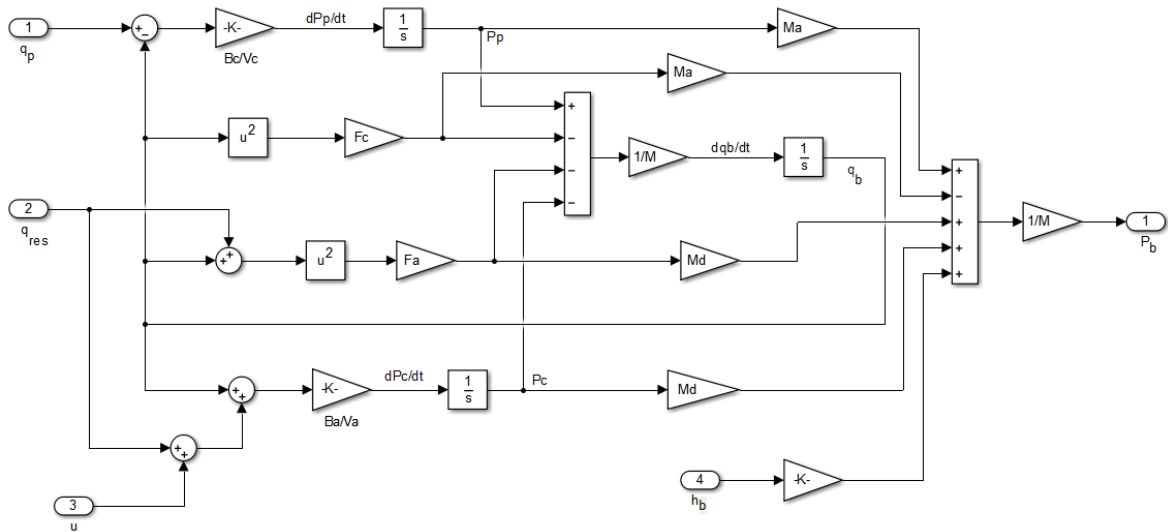
$$\frac{P_b(s)}{U(s)} = \frac{22,74s^2+21,06s+0,248}{s(s^2+0,7931s+0.01011)} \quad (4.1f)$$

#### 4.1.1 Implementação do modelo do processo de primeira ordem com elemento integrativo

A segunda parte do projeto consiste no arranjo do modelo do processo para um modelo predeterminado de primeira ordem com elemento integrativo, o qual seja compatível com o controle do tipo IMC. Nesse sentido, se montou a estrutura na linguagem do programa *Simulink* usando os dados apresentados na tabela 4.2 e 4.3. O diagrama em *Simulink* do processo é apresentado na Figura 4.1. As simulações foram feitas usando o algoritmo de Dorman Prince com amostragem de 0,01 segundos.

Uma vez montado o processo a função  $u(t)$  foi excitada pela função degrau. A resposta desta excitação será ajustada à equação (3.17) mediante o aplicativo de Matlab R2014a, *Curve Fitting*. O ajuste teve um coeficiente de determinação de 0,99. Também, foi possível desenvolver este ajuste mediante um *Script* de Matlab como é descrito no APENDICE B.1.

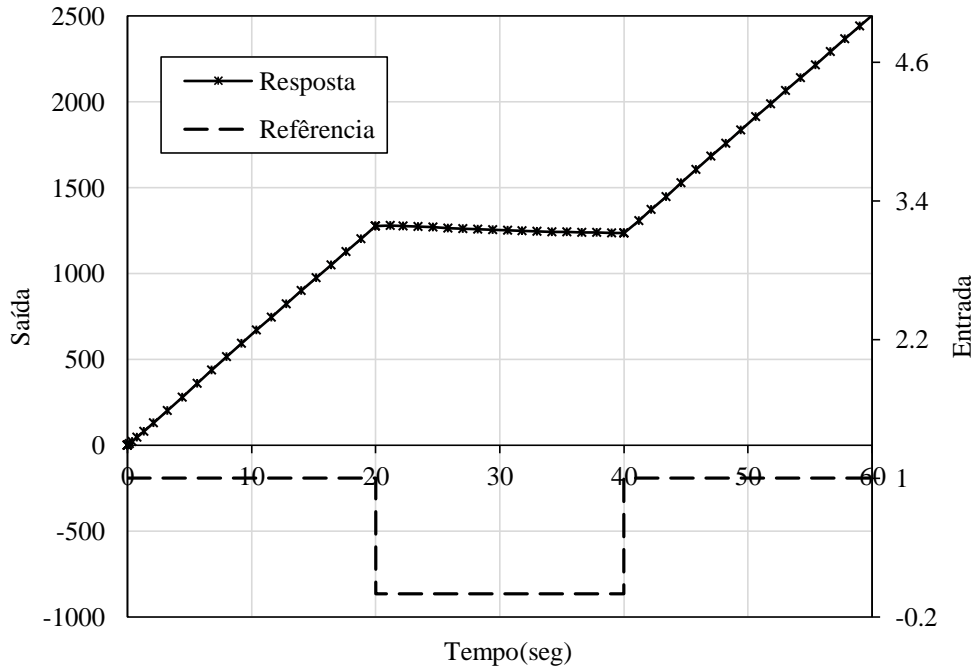
Figura 4.1 - Estrutura do modelo do processo implementado em *Simulink*.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.2 mostra o comportamento do processo em malha aberta, sem controlador, para um ponto operacional de 2000 metros, na primeira faixa temporal o modelo montado no *Simulink* é excitado por uma função degrau durante 20 segundos, a resposta é uma função rampa devido ao elemento integrativo presente no processo. Um comportamento característico próprio de um processo integrativo é que ele consegue a estabilidade quando a entrada volta a ser o sinal do início, é por isso, que durante os segundos 20 - 40 o sinal se estabiliza. Depois do segundo 40 o sistema se torna instável novamente por que a entrada mudou para uma entrada degrau.

Figura 4.2 - Sinal de resposta do sistema de perfuração à entrada de uma função de grau positiva e negativa.



Fonte: Autoria Própria.

O modelo do processo ajustado para um modelo de primeira ordem com elemento integrativo para diferentes pontos operacionais (500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros de profundidade de perfuração, respectivamente) é definido pelas equações (4.2), conforme a seguir,

$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{245,32}{s(0,0131s+1)} \quad (4.2a)$$

$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{123,09}{s(0,0139s+1)} \quad (4.2b)$$

$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{62,22}{s(0,0145s+1)} \quad (4.2c)$$

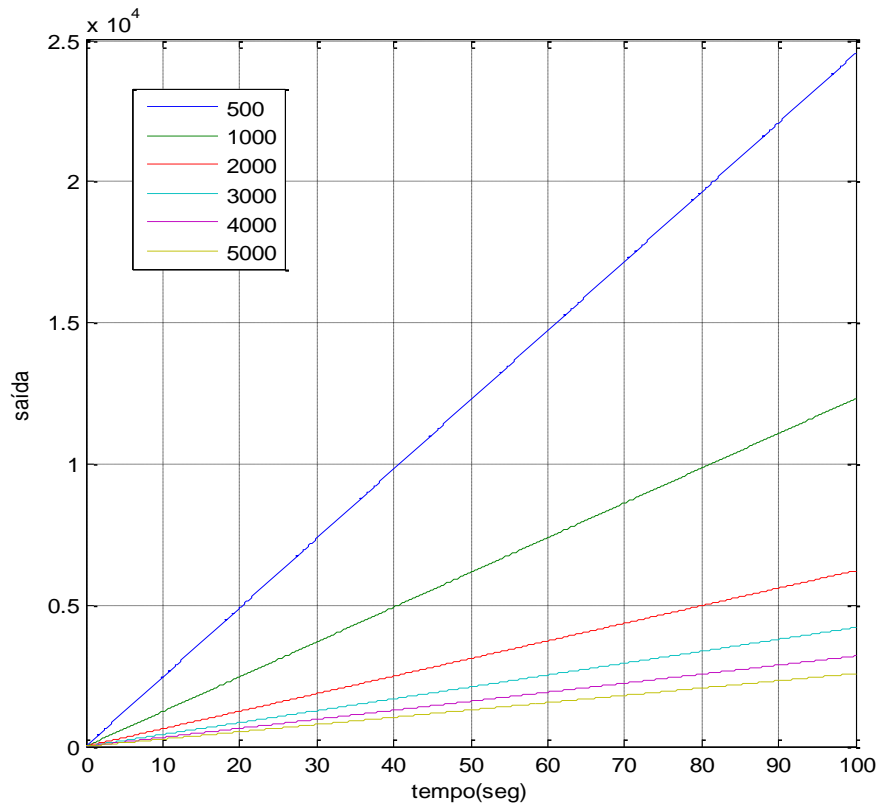
$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{42,09}{s(0,0148s+1)} \quad (4.2d)$$

$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{31,98}{s(0,015s+1)} \quad (4.2e)$$

$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{25,82}{s(0,0152s+1)} \quad (4.2f)$$

A Figura 4.3 mostra a resposta instável para diferentes pontos operacionais. Pode-se observar que enquanto a profundidade de perfuração aumenta a inclinação da tendência diminui. Isto quer dizer que para uma menor profundidade de perfuração o processo é mais sensível ao sinal de controle  $u(t)$ , ou seja, que a variação da pressão é mais rápida para uma menor profundidade em uma determinada ação da válvula de controle. A tendência dos resultados é parecida ao comportamento obtido experimentalmente no trabalho de Hauge (2013), mas para esse caso testou-se para uma profundidade de 1500 metros.

Figura 4.3 - Comportamento da resposta do sinal de saída para diferentes pontos operacionais.



Fonte: Autoria Própria

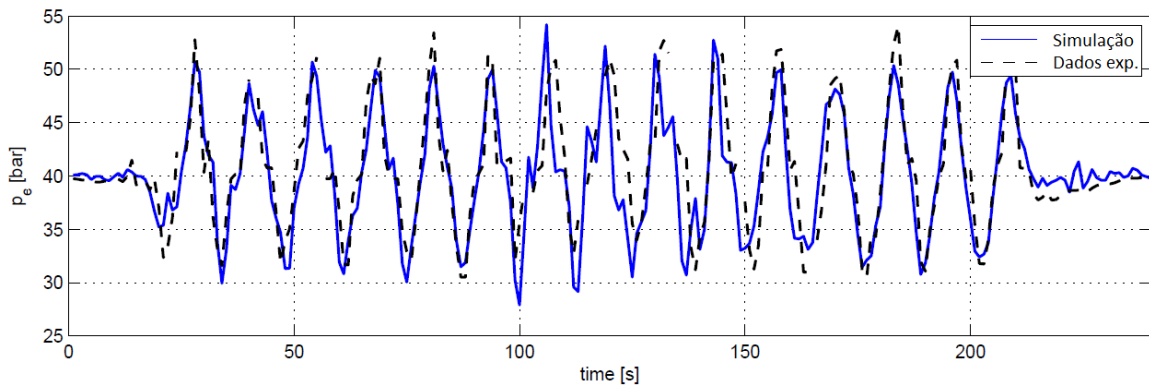
#### 4.1.2 Adição do tempo de atraso no sistema

Breyholyz (2008), Pedersen (2009), Carlsen *et al*, (2012), entre outros, aplicaram o método IMC no controle de poços de perfuração, mas não foi considerado o efeito do tempo de atraso sobre o sistema. O tempo de atraso na medição da PFP e na linha de transmissão surge em tais poços e deteriora-se o desempenho de sistemas em malha fechada, de modo a fazer com que a PFP flutue e o sistema de perfuração perda estabilidade (ZHOU; KRSTIC, 2016).

Existe uma diferença relevante entre o estado atual da pressão de estrangulamento e a ação corretiva e pode ser explicada da seguinte maneira: em algum instante  $t_0$  a pressão de estrangulamento tem um determinado valor. Em seguida, em algum tempo mais tarde, a medição está disponível no sensor, e em seguida, no tempo  $t_1$ , o sensor é testado pelo sistema PLC e disponibilizados para que algoritmo de controle faça o cálculo do sinal de controle desejado para o motor de arranque da válvula. Esta é a saída do motor de arranque no tempo  $t_2$ . A válvula começa-se mover, e a abertura de estrangulamento correto é alcançada ao tempo  $t_3$ . (LANDET, 2011)

No trabalho de Landet (2011), se apresenta experimentalmente o efeito que se produz na resposta do sistema devido ao tempo de atraso e considerou que este tempo devia de ser de 2 segundos aproximadamente. A Figura 4.4 amostra dois sinais; um obtido experimentalmente e o outro simulado com um tempo de atraso de 2 segundos. Todavia o trabalho não determine o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) no ajuste de curvas, pode-se observar um bom desenvolvimento do sinal simulado com os dados experimentais. Neste trabalho, se considerarão os efeitos do tempo de atraso na sintonização dos ganhos PID.

Figura 4.4 - Dados experimentais da pressão do poço durante perfuração comparada com uma modelagem do processo com tempo de atraso.



Fonte: (LANDET, 2011)

## 4.2 PROJETO DO CONTROLADOR PID

No projeto do controlador retroalimentado empregou-se a teoria de controle apresentada na secção 2.6 neste trabalho. Para tal objetivo se desenvolveu uma programação no Script do Matlab R2014a com a fim de obter os parâmetros PID usando a Tabela 2.1, que apresenta um cálculo algébrico, e os valores dos parâmetros do poço da Tabela 4.2 e 4.3.

Nesta parte do trabalho obtiveram-se parâmetros do desempenho dos três controladores IMC e para cada ponto operacional (profundidade). Para as três situações se adicionou um distúrbio de carga  $d(t)$  para testar os comportamentos dos controladores. A medição de este distúrbio é representada pelo valor de IAE-d. O distúrbio foi representado por uma função de grau de valor 0.01 para todos os casos. Enquanto, a entrada de referência é representada como uma função de grau de valor um. Para medir o desempenho à resposta transitória se considerou a sobressinal o tempo de subida e o tempo de acomodação. Os parâmetros de desempenho como a robustez, o erro absoluto integrativo do distúrbio, o sobressinal, o tempo de subida e o tempo de acomodação foram obtidos conforme as formulações na secção 2.6

#### 4.2.1 Projeto do Controlador IMC

Primeiro se desenvolveu o controlador IMC, se obtiveram resultados para diferentes  $\lambda$  mostrando diferentes comportamentos como é mostrado no APENDICE C.2. No APENDICE C.2 se desenvolveram o análise de desempenho da resposta ao degrau na entrada do sistema e ao distúrbio no sinal de controle para diferentes valores de  $\lambda$  obtendo diferentes valores que quantificam o desempenho da resposta do sistema como sobressinal, o tempo de subida, o tempo de acomodação, IAE-d, e a Robustez Ms. Além disso, analisaram-se estes últimos parâmetros mencionados para diferentes pontos operacionais da profundidade. Uma primeira observação dos gráficos, é que existe um comportamento indireto entre a resposta transitória e a resposta devido ao distúrbio, isto quer dizer que; quanto melhor desempenho transitório exista o sistema não agirá corretamente na presença de distúrbios, o qual, é muito comum em controladores PID, nos controladores convencionais de PID é sabido que muitas vezes para satisfazer alguma condição deve-se perder outra. O mesmo acontece com a robustez do sistema. É relevante entender que quanto menor o valor do parâmetro da robustez maior a robustez. As Tabelas C.7, C.8, C.9, C.10, C.11 e C.12 mostram que a robustez melhora quando os valores de  $\lambda$ , e a rejeição ao distúrbio aumentam.

#### 4.2.2 Projeto do Controlador SIMC

Para projetar o controlador SIMC se obtiveram resultados para diferentes  $\tau_c$  mostrando diferentes comportamentos como é mostrado no APENDICE C.1. No APENDICE C.1 se desenvolveram o análise de desempenho da resposta ao distúrbio na entrada do sistema e ao distúrbio no sinal de controle para diferentes valores de  $\tau_c$  obtendo diferentes valores do desempenho da resposta do sistema como sobressinal, o tempo de subida, o tempo de acomodação, IEA-d, e Ms. Além disso, analisaram-se estes últimos parâmetros mencionados para diferentes pontos operacionais da profundidade. O projeto do controlador SIMC apresenta as mesmas tendências das correlações entre a resposta transitória, a rejeição devido às perturbações, robustez e o parâmetro do modelo interno  $\tau_c$  conforme as tabelas C.1, C.2, C.3, C.4, C.5 e C.6 do APENDICE C.1. Por outro lado, no trabalho de Skogestad (2003) se

apresentou o parâmetro  $\tau_c$  ótimo pelo qual se obtém a melhor relação entre a resposta transitória,  $M_s$ ,  $IEA_d$ . Isto acontece quando  $\tau_c$  é igual ao tempo morto ( $\tau_c = \theta$ ).

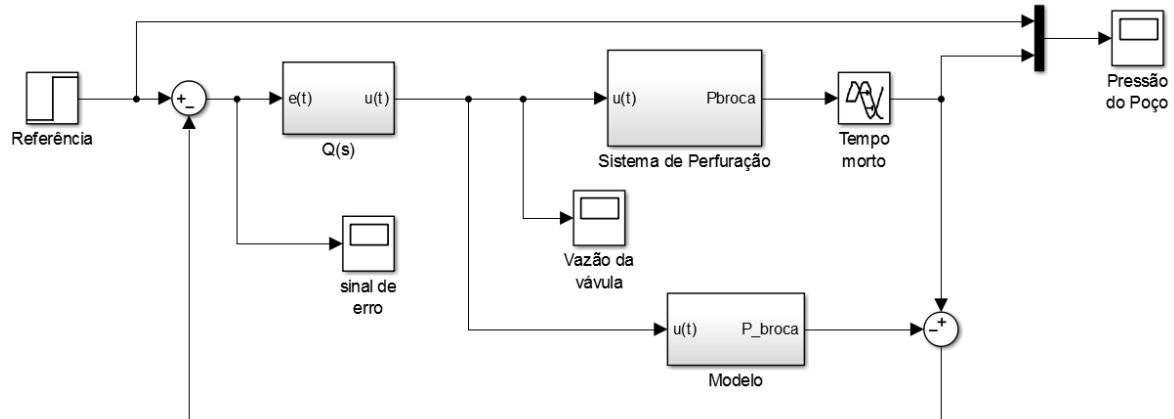
#### 4.2.3 Projeto do Controlador IMC com dois graus de liberdade

Por último, para projetar o controlador IMC com dois graus de liberdade se obtiveram resultados para diferentes  $M_s$  mostrando diferentes comportamentos como é mostrado no APENDICE C.3. No APENDICE C.3 se desenvolveram o análise de desempenho da resposta ao distúrbio na entrada do sistema e ao distúrbio no sinal de controle para diferentes valores de  $M_s$  obtendo diferentes valores do desempenho da resposta do sistema como sobressinal, o tempo de subida, o tempo de acomodação,  $IAE-d$ . Uma das características principais do controlador proposto por Jin e Liu (2014) é que a sobressinal da resposta transitória é zero, isto devido ao filtro de referência  $F(s)$ . Contrário aos outros controladores IMC e SIMC, a robustez do sistema é inversamente proporcional ao distúrbio, por tanto, apresenta melhor desempenho à resposta transitória quanto melhor a rejeição aos distúrbios. Este fenômeno pode ser explicado da seguinte maneira; o parâmetro de tempo de subida neste controlador é diretamente proporcional à robustez do sistema, esta tendência está presente também nos outros controladores, devido que estes controladores não apresentam o filtro de referência, isto gera uma vibração amortecida no sinal à resposta transitória fazendo que o tempo de assentamento seja mais prolongado. Este comportamento não se manifesta com o controlador do Jin e Liu (2014) porque o filtro faz que a vibração se torne sobre amortecido e tenha um tempo de assentamento rápido.

Além dos comparativos analisados acima, no APENDICE D, se desenvolveu um comparativo dos controladores propostos juntos para cada profundidade. Com tudo, para poder comparar este tipo de controlador com os outros se deveu escolher o do melhor desempenho dos seus parâmetros. Para equiparar as condições entre as três metodologias (IMC tradicional, SIMC e IMC de dois graus de liberdade) escolheram-se os controladores que apresentaram similar robustez, isto é,  $M_s=1.8$ , para cada profundidade. O controlador de dois graus de liberdade proposto por Jin e Liu (2014) apresentou melhor comportamento.

Os gráficos apresentados no APENDICE C e D foram obtidos da modelagem do processo e da utilização da plataforma *Simulink* (Figura 4.1) e o controlador do tipo IMC conforme mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Estrutura do sistema com controlador IMC implementado com *Simulink*.



Fonte: Autoria Própria

### 4.3 ANÁLISE DO CONTROLADOR *GAIN SCHEDULING*

A perfuração nas plataformas *offshore*, por exemplo, têm uma característica muito mais dinâmica do que outros processos petroquímicos. A região de operação pode variar amplamente, dependendo da variação do volume de controle causado pelo aumento de profundidade da perfuração, a variação da densidade do fluido produto do aumento de pressão, movimento das ondas do mar, etc.

O maior problema encontrado na sintonização dos ganhos PID é que a o PID ideal para uma situação não era a melhor opção para outra condição operacional devido às variações do processo. Uma solução geralmente encontrada na prática é sintonizar o parâmetro PID de modo a obter um desempenho robusto que abarque uma ampla região do processo variante devido a mudanças próprias do processo o ao distúrbio. Mas em muitas outras situações operacionais de qualquer jeito chegando ao limite do controle robusto, essa sintonia PID vai amplificar as perturbações no processo.

Como foi mencionado na secção 4.2 o melhor comportamento apresentou o controlador PID obtido pela metodologia do controle IMC com dois graus de liberdade. Contudo, para compreender as tendências dos ganhos do controlador independentemente da estratégia de controle, nesta secção, se analisam ditos aspectos dos parâmetros; proporcional, integrativo e derivativo, sob a influencia dos parâmetros como  $\tau_c$ ,  $\lambda$ ,  $M_s$

### 4.3.1 O método GS no ganho proporcional aplicando o controlador SIMC

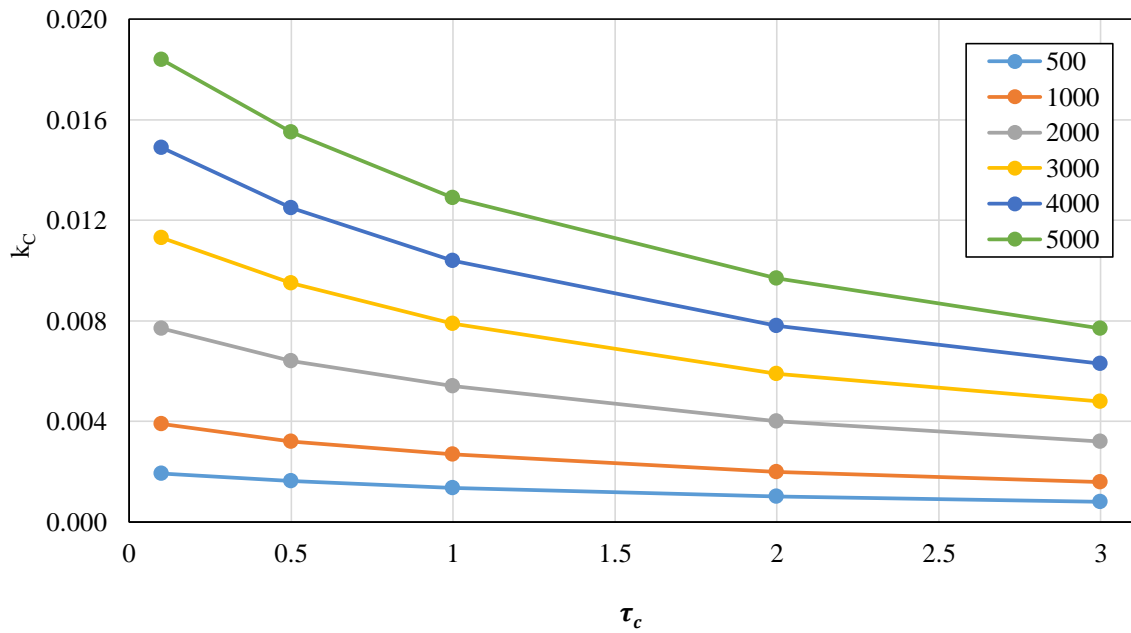
No sistema controlado pelo método SIMC, a Tabela 4.4 mostra os ganhos proporcionais do PID para diferentes valores de  $\tau_c$  para diferentes profundidades. Pode-se observar na Figura 4.6 que numa determinada profundidade o ganho proporcional diminui ao aumentar o parâmetro  $\tau_c$ , no entanto, como já foram analisados na secção 4.2 outros parâmetros importantes no desempenho podem aumentar ou diminuir. Então, deve-se considerar um balance entre estes parâmetros de desempenho. Na Figura 4.7, para um determinado valor de  $\tau_c$  o ganho proporcional  $k_C$  aumenta ao aumentar a profundidade de perfuração.

Tabela 4.4 - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro  $\tau_c$  usando o método de controle SIMC.

SIMC $\tau_c$	Profundidade (m)					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
0,1	0,00194	0,0039	0,0077	0,0113	0,0149	0,0184
0,5	0,00163	0,0032	0,0064	0,0095	0,0125	0,0155
1	0,00136	0,0027	0,0054	0,0079	0,0104	0,0129
2	0,00102	0,002	0,004	0,0059	0,0078	0,0097
3	0,00082	0,0016	0,0032	0,0048	0,0063	0,0077

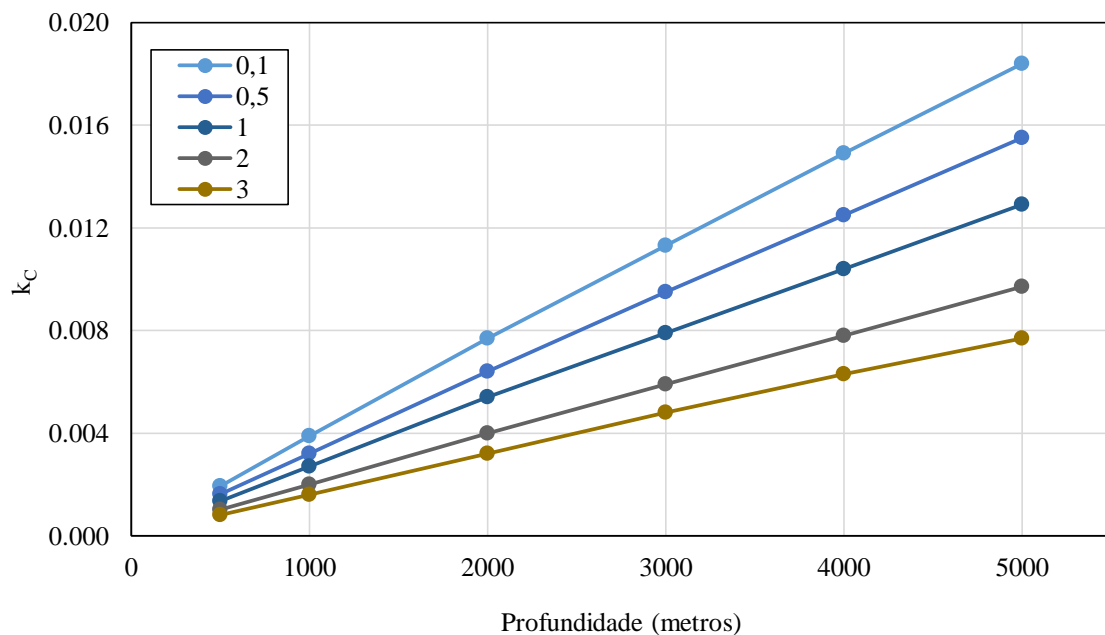
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.6 - Parâmetro  $\tau_c$  – Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes profundidades de perfuração do controlador SIMC.



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.7 - Profundidade de perfuração - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes parâmetros  $\tau_c$  do controlador SIMC.



Fonte: Autoria Própria

### 4.3.2 O método GS no ganho proporcional aplicando o controlador IMC

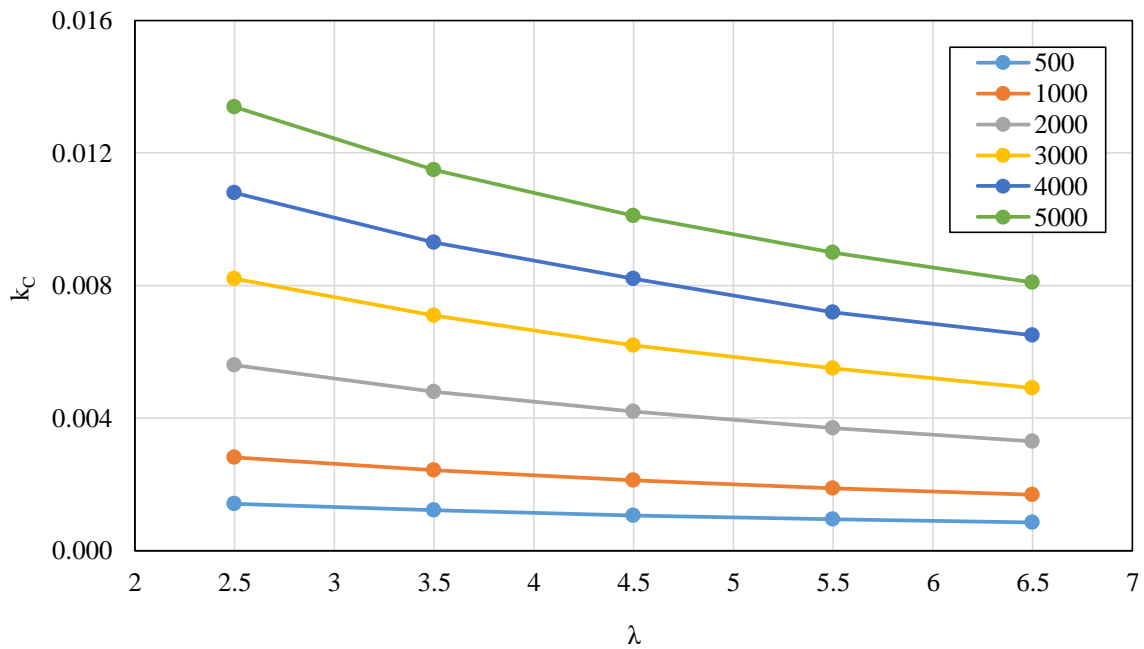
No caso do controlador IMC, o ganho proporcional se comporta de forma similar ao do SIMC. A Tabela 4.5 mostra os ganhos proporcionais do PID para diferentes valores de  $\lambda$  para diferentes profundidades. Pode-se observar na Figura 4.8 que numa determinada profundidade o ganho proporcional diminui ao aumentar o parâmetro  $\lambda$ . Na Figura 4.9, para um determinado valor de  $\lambda$  o ganho proporcional  $k_C$  aumenta ao aumentar a profundidade de perfuração.

Tabela 4.5 - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro  $\lambda$  usando o método de controle IMC proposto por Rivera (1986).

IMC $\lambda$	Profundidade (m)					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
2,5	0,00141	0,0028	0,0056	0,0082	0,0108	0,0134
3,5	0,00121	0,0024	0,0048	0,0071	0,0093	0,0115
4,5	0,00106	0,0021	0,0042	0,0062	0,0082	0,0101
5,5	0,00094	0,0019	0,0037	0,0055	0,0072	0,009
6,5	0,00085	0,0017	0,0033	0,0049	0,0065	0,0081

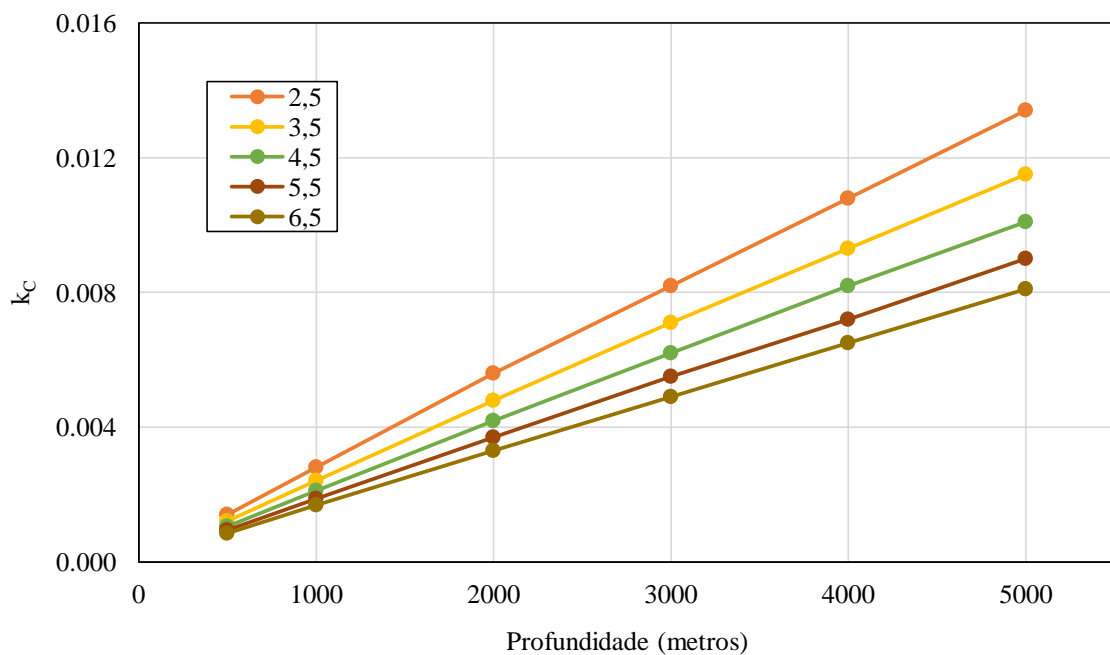
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.8 - Parâmetro  $\lambda$  – Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes profundidades de perfuração do controlador IMC proposto por Rivera (1986).



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.9 - Profundidade de perfuração - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes parâmetros  $\lambda$  do controlador IMC proposto por Rivera (1986).



Fonte: Autoria Própria

### 4.3.3 O método GS no ganho proporcional aplicando o controlador IMC com dois graus de liberdade

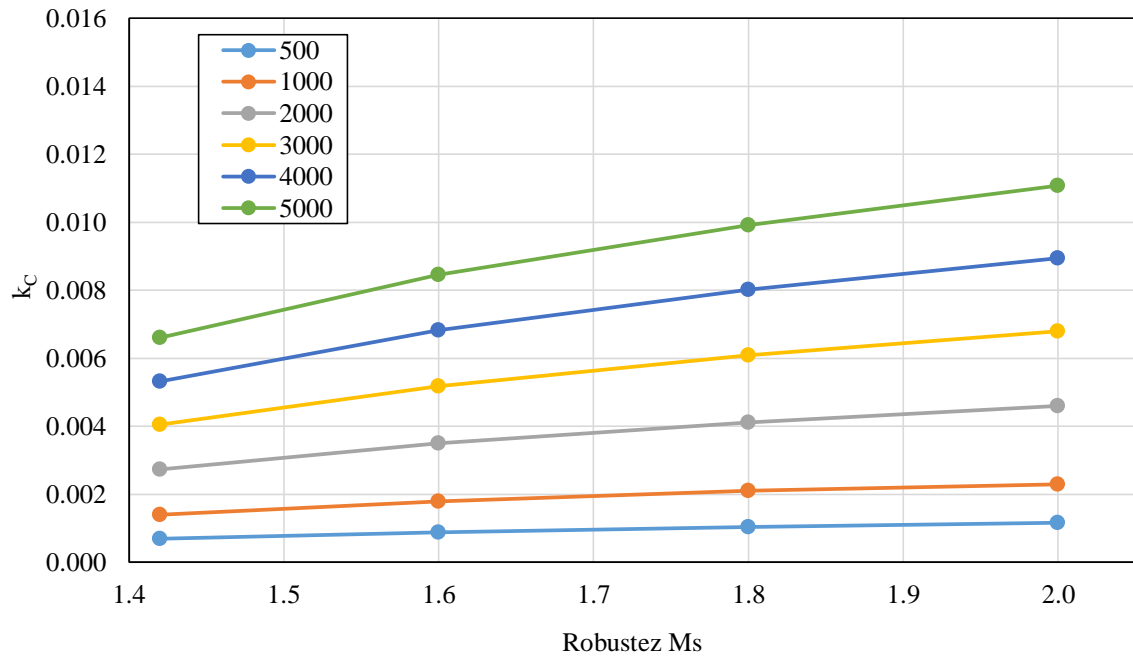
No caso do controlador IMC com dois graus de liberdade, o ganho proporcional se comporta de forma aos dos outros controladores. A Tabela 4.6 amostra os ganhos proporcionais do PID para diferentes valores da Robustez em diferentes pontos operacionais. Pode-se observar na Figura 4.10 que numa determinada profundidade o ganho proporcional diminui ao aumentar o parâmetro Ms. Na Figura 4.11, para um determinado valor de Ms o ganho proporcional  $k_C$  aumenta ao aumentar a profundidade de perfuração.

Tabela 4.6 - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo robustez usando o método de controle IMC com dois graus de liberdade.

JIN e LIU		Profundidade (m)				
Ms	500	1000	2000	3000	4000	5000
2	0,001165	0,0023	0,00460	0,00679648	0,00895	0,01108
1,8	0,001044	0,0021	0,00412	0,00608855	0,00801	0,00993
1,6	0,000889	0,0018	0,00351	0,00518862	0,00683	0,00846
1,42	0,000694	0,0014	0,00274	0,00404894	0,00533	0,00660

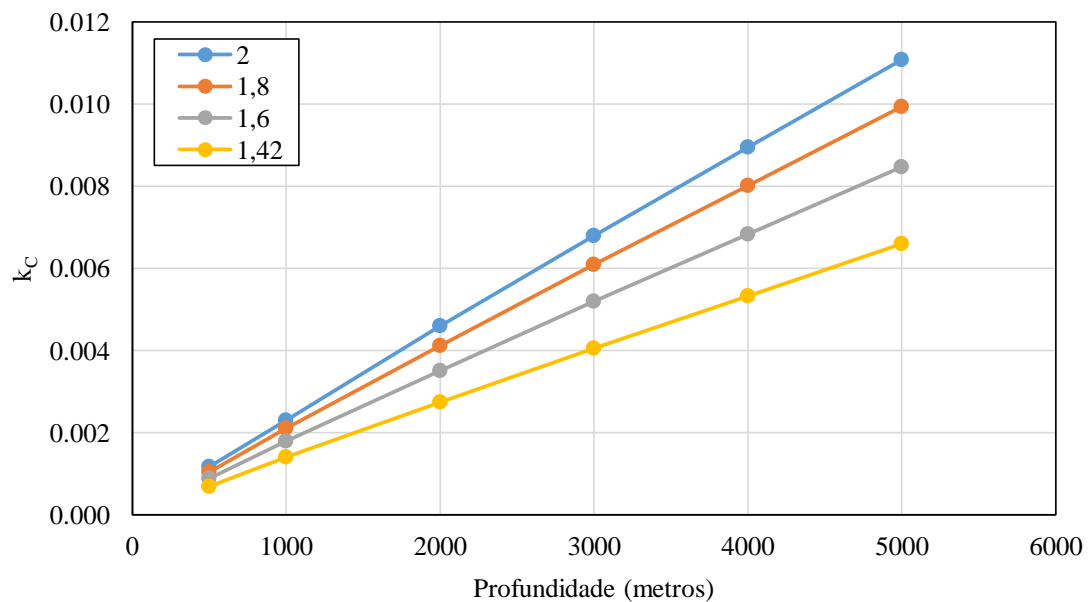
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.10 - Robustez do sistema Ms - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes profundidades de perfuração do controlador IMC com dois graus de liberdade.



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.11 - Profundidade de perfuração - Parâmetro proporcional  $k_C$  para diferentes robustez do sistema Ms do controlador IMC com dois graus de liberdade.



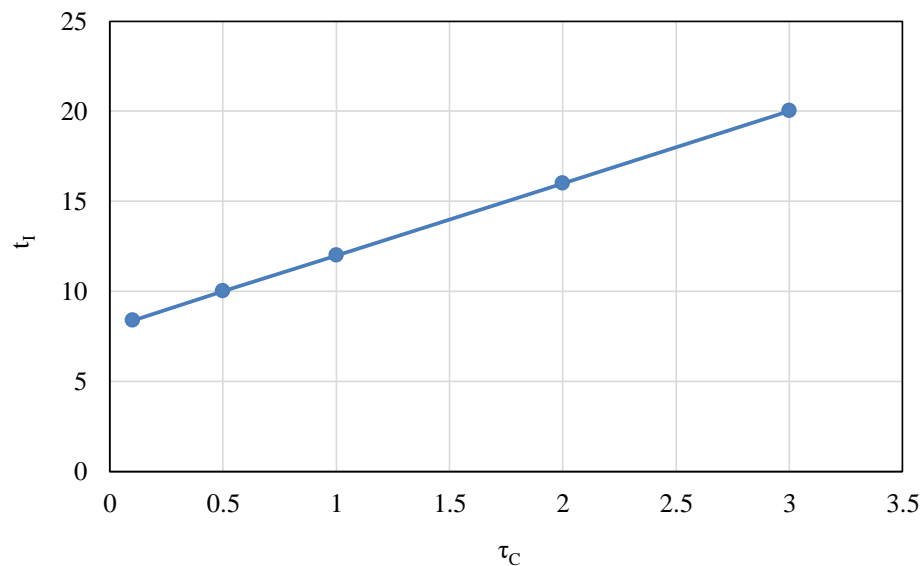
Fonte: Autoria Própria

Dos três comportamentos pode-se concluir que enquanto aumenta a profundidade de operação deve-se aumentar o valor do ganho proporcional. Apesar de que os valores sejam pequenos e oscilem entre  $1 \times 10^{-3}$  e  $1.2 \times 10^{-2}$ , no controle, esta variação pode ser fundamental no desempenho e a estabilidade do sistema.

#### 4.3.4 O método GS no ganho integrativo aplicando o controlador SIMC

Na obtenção do parâmetro integrativo empregando o controle SIMC, os parâmetros integrativos  $t_I$  são iguais para qualquer ponto operacional, mas variam com o parâmetro  $\tau_c$ , neste contexto não foi conveniente a análise separada para cada profundidade. A Figura 4.12 mostra um aumento proporcional do parâmetro integrativo segundo aumenta o parâmetro  $\tau_c$ .

Figura 4.12 - Parâmetro  $\tau_c$  – Parâmetro integrativo  $t_I$  do controle SIMC.



Fonte: Autoria Própria

### 4.3.5 O método GS no ganho integrativo aplicando o controlador IMC

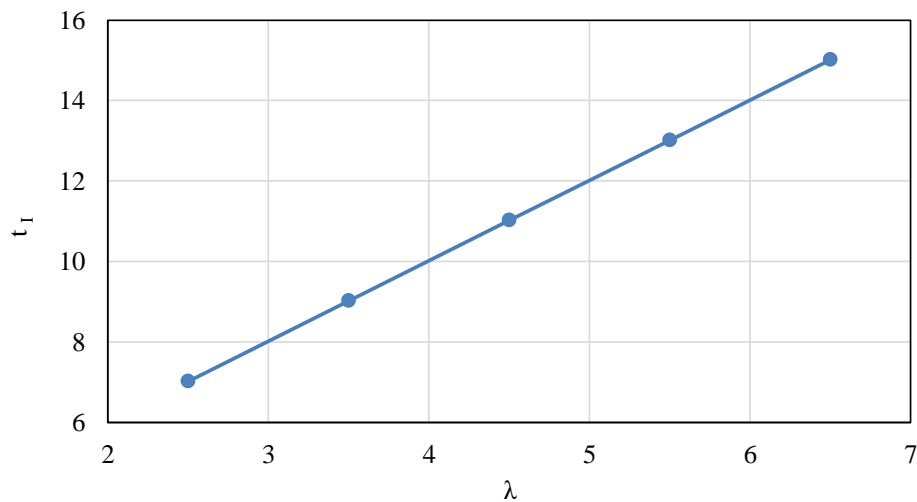
No controle IMC, a Figura 4.13 mostra a tendência do parâmetro  $\lambda$  versus o parâmetro proporcional integrativo, como a variação dos valores do parâmetro  $t_I$  em função do parâmetro  $\lambda$  são muito parecidos para diferentes pontos operacionais (Tabela 4.7) se considerou conveniente apresentá-los em uma linha global como se mostra na Figura 4.13. O comportamento do ganho integrativo aumenta com o aumento do parâmetro  $\lambda$ .

Tabela 4.7 - Parâmetro integrativo  $t_I$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro  $\lambda$  usando o método de controle IMC.

IMC	Profundidade (m)						
	$\lambda$	500	1000	2000	3000	4000	5000
2,5		7,0131	7,0139	7,0145	7,0148	7,015	7,0152
3,5		9,0131	9,0139	9,0145	9,0148	9,015	9,0152
4,5		11,0131	11,0139	11,0145	11,0148	11,015	11,0152
5,5		13,0131	13,0139	13,0145	13,0148	13,015	13,0152
6,5		15,0131	15,0139	15,0145	15,0148	15,015	15,0152

Fonte: Autoria Própria

Figura 4.13 - Parâmetro  $\lambda$  – Parâmetro integrativo  $t_I$  do controle IMC proposto por Rivera (1986).



Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.6 O método GS no ganho integrativo aplicando o controlador IMC com dois graus de liberdade.

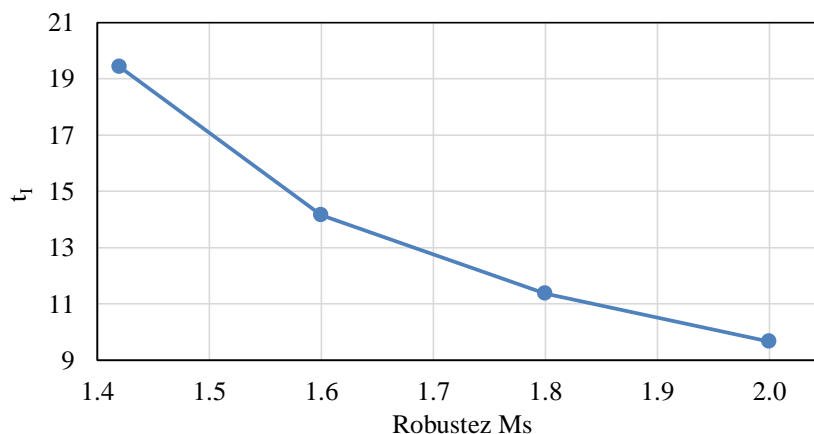
A Figura 4.14, mostra a tendência da robustez  $M_s$  versus o parâmetro proporcional integrativo, como a tendência dos valores do parâmetro  $t_i$  em função da robustez  $M_s$  são muito parecidos para diferentes pontos operacionais (Tabela 4.8) se considerou convenientemente apresentá-los em uma linha global como se mostra na Figura 4.14. O comportamento do ganho integrativo diminui com o aumento da Robustez.

Tabela 4.8 - Parâmetro integrativo  $t_i$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo robustez usando o método de controle IMC com dois graus de liberdade.

Jin &Liu Ms	Profundidade (m)					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
2	9,6654	9,6649	9,66465	9,66450017	9,66440	9,66430
1,8	11,3630	11,3617	11,36096	11,3605346	11,36025	11,35996
1,6	14,1560	14,1527	14,15091	14,1498334	14,14911	14,14839
1,42	19,4135	19,4071	19,40349	19,4013394	19,39991	19,39848

Fonte: Autoria Própria

Figura 4.14 - Robustez do sistema  $M_s$  - Parâmetro integrativo  $t_i$  do controle IMC de dois graus de liberdade.



Fonte: Autoria Própria

Dos três controladores pode-se concluir que a profundidade não afeta a tendência do ganho integrativo ainda tendo uma pequena variação de aproximadamente  $1 \times 10^{-2}$  que no caso do ganho proporcional era relevante, para esta situação, o ganho integrativo apresenta valores maiores entre 7 e 20 aproximadamente. Devido a estes valores esta pequena variação não muda em maior medida o desempenho do sistema.

#### 4.3.7 O método GS no ganho derivativo aplicando o controlador SIMC e IMC.

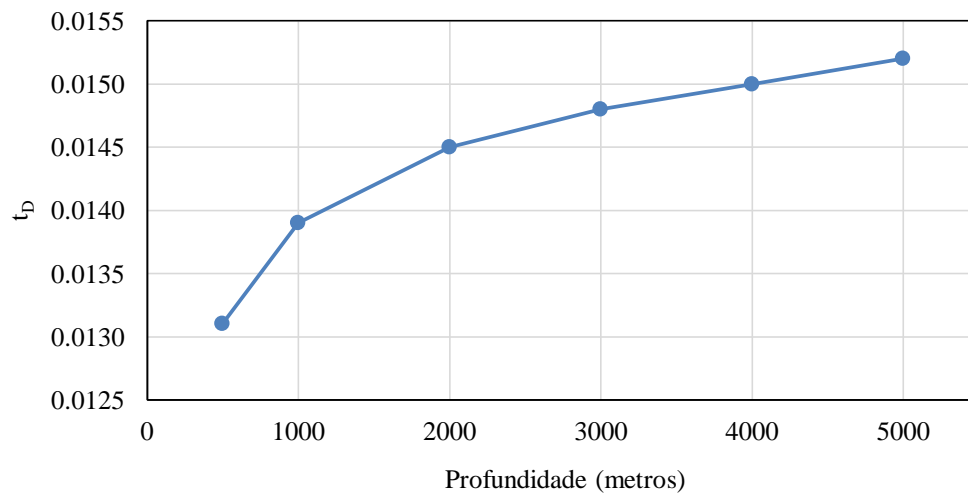
Na obtenção do parâmetro derivativo empregando o método SIMC e IMC os parâmetros derivativos  $t_D$  são iguais para parâmetro  $\tau_c$  e  $\lambda$  respectivamente ao longo de cada ponto operacional (Tabela 49), nesse sentido não foi conveniente o análise separada em cada destes parâmetros mencionados. A Figura 4.15 mostra a tendência do ganho derivativo com profundidade. O ganho derivativo aumenta ao aumentar a profundidade, mas, não se mexe ao mudar os parâmetros  $\tau_c$  e  $\lambda$  respectivamente.

Tabela 4.9 - Parâmetro derivativo  $t_D$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo parâmetro  $\tau_c$  e  $\lambda$  aplicando os métodos de controle SIMC e IMC respectivamente.

Profundidade (m)	500	1000	2000	3000	4000	5000
$t_D$	0,0131	0,0139	0,0145	0,0148	0,015	0,0152

Fonte: Autoria Própria

Figura 4.15 - Profundidade de perfuração – Parâmetro derivativo  $t_D$  do controle IMC proposto por Rivera (1986) e SIMC proposto por Skogestad (2003).



Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.8 O método GS no ganho derivativo aplicando o controlador IMC com dois graus de liberdade.

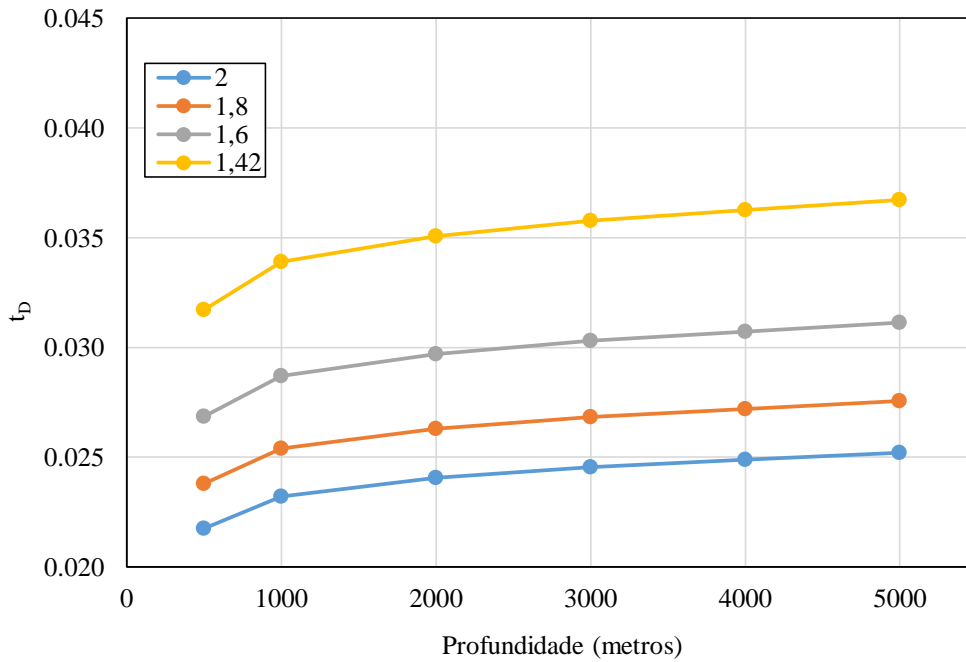
No controlador IMC com dois graus de liberdade, para uma determinada robustez o ganho derivativo aumenta com o aumento da profundidade como se mostra na Figura 4.16. Bem como também, ao longo de um ponto operacional o ganho derivativo aumenta ao aumentar a robustez segundo a Figura 4.17.

Tabela 4.10 - Parâmetro derivativo  $t_D$  para diferentes profundidades de perfuração influenciados pelo robustez usando o método de controle IMC com dois graus de liberdade.

Jin & Liu Ms	Profundidade (m)					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
2	0,0218	0,0232	0,02406	0,02455723	0,02489	0,02522
1,8	0,0238	0,0254	0,02631	0,02684436	0,02720	0,02756
1,6	0,0269	0,0287	0,02971	0,03031726	0,03072	0,03113
1,42	0,0317	0,0339	0,03506	0,03577868	0,03626	0,03673

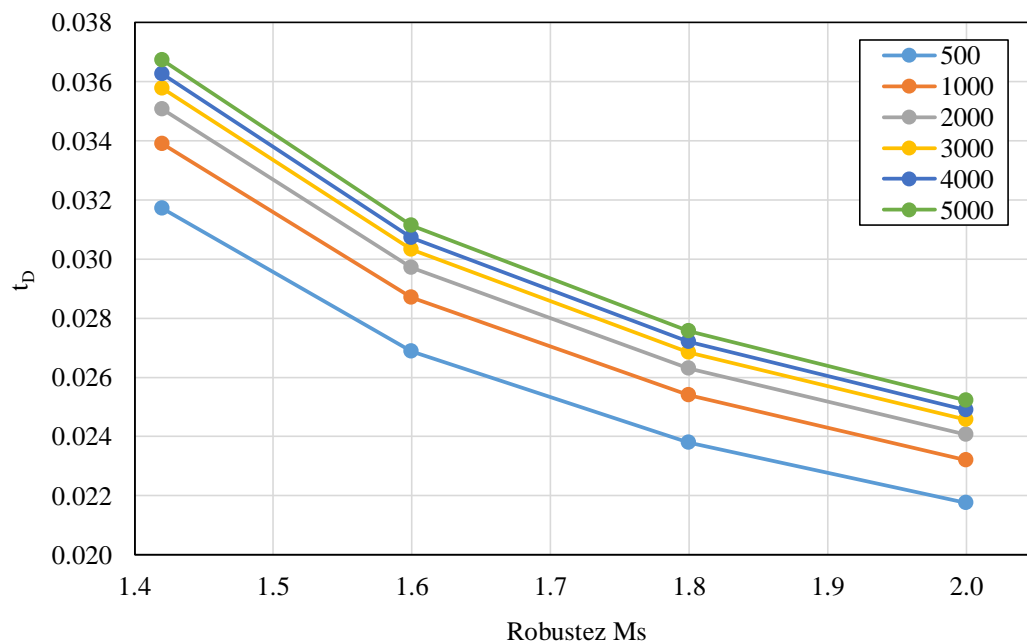
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.16 - Profundidade de perfuração - Parâmetro derivativo  $t_D$  para diferente robustez do sistema Ms do controlador IMC com dois graus de liberdade.



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.17 - Robustez do sistema Ms - Parâmetro derivativo  $t_D$  para diferentes profundidades de perfuração do controlador IMC com dois graus de liberdade.



Fonte: Autoria Própria

Uma vez feita a análise das tendências dos ganhos PID, se especifica o controlador proposto aplicando o método *Gain Scheduling* ou “Ganho Programado”. Para implementar o controlador GS com os ganhos PID deve-se procurar a melhor sintonização dos parâmetros, para cada profundidade. Na secção 4.2, já foi mencionado que o melhor controle do sistema foi obtido da aplicação do controlador proposto por Jin e Liu (2014), no entanto, ainda não fica esclarecido qual dos ganhos PID das Tabelas C.13, C.14, C.15, C.16, C.17 e C.18 do APENDICE C.3 devem ser utilizados para montar o controlador GS. Desta forma, a Tabela 4.1 mostra os requisitos que o controlador deve apresentar em cada trecho operacional. Segundo os requisitos de desempenho exigidos no projeto do controlador (Tabela 4.1), disponibiliza-se a seguir, a Tabela 4.11 com todos os ganhos a serem adotados para montar o controlador GS, para diferentes profundidades.

Tabela 4.11 – Ganhos para serem montados no controlador GS.

Profundidade (m)	Parâmetros do Controlador			Filtragem	
	$k_C$	$t_I$	$t_D$	e	f
500	0,0010	11,363	0,0238	0,0323	0,4121
1000	0,0021	11,3617	0,0254	0,0323	0,4121
2000	0,0041	11,361	0,0263	0,0323	0,4121
3000	0,0061	11,3605	0,0268	0,0324	0,4121
4000	0,008	11,36	0,0272	0,0324	0,4121
5000	0,0099	11,36	0,0276	0,0324	0,4121

Fonte: Autoria Própria

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMR EM *SIMULINK*

O controlador adaptativo por modelo de referencia (CAMR) segundo a teoria de Lyapunov conforme o trabalho de Magzoub *et al.* (2013), foi utilizado neste estudo para efeitos de comparação e análise. Além disso, devido à presença do tempo de atraso no sistema, adicionou-se um preditor de Smith, o qual faz com que o sinal de saída do sistema divida-se num sinal do sistema de perfuração sem tempo de atraso e um sinal com tempo de atraso, para depois, a soma destes sinais serem retroalimentados ao controlador.

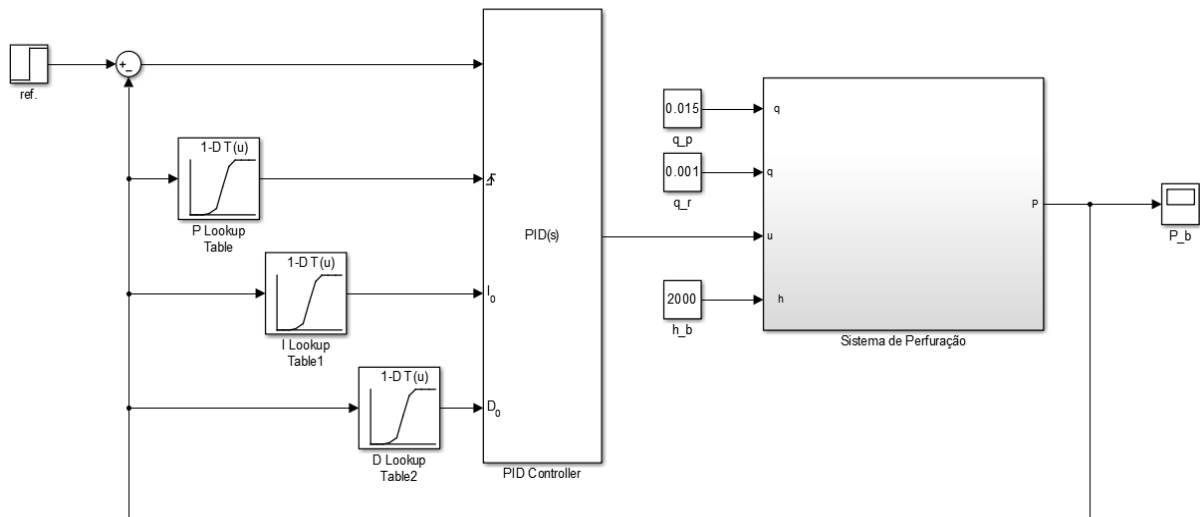


## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta secção do trabalho se faz um comparativo entre o controlador aplicando o método *Gain Scheduling* do Capítulo 4 e um controlador adaptativo. O controlador adaptativo é do tipo Modelo de Referencia (CAMR) e foi montado considerando o modelagem do processo feito no Capítulo 3 com adição do tempo de atraso e testado para diferentes pontos operacionais.

A montagem da estrutura do controlador GS na linguagem *Simulink* é mostrado na Figura 5.1. O sistema GS é implementado a traves do comando *Lookup Table* onde se inserem os valores dos ganhos proporcional, integrativo e derivativo para diferentes pontos operacionais. Este comando age identificando o sistema e fazendo com que os valores dos parâmetros do controlador, neste caso PID, se modifiquem para compensar a mudança do processo. Por esta razão, é importante uma boa sintonização dos parâmetros do controlador PID anteriormente.

Figura 5.1 – Estrutura do Controlador GS no linguagem *Simulink*



Fonte: Autoria Própria

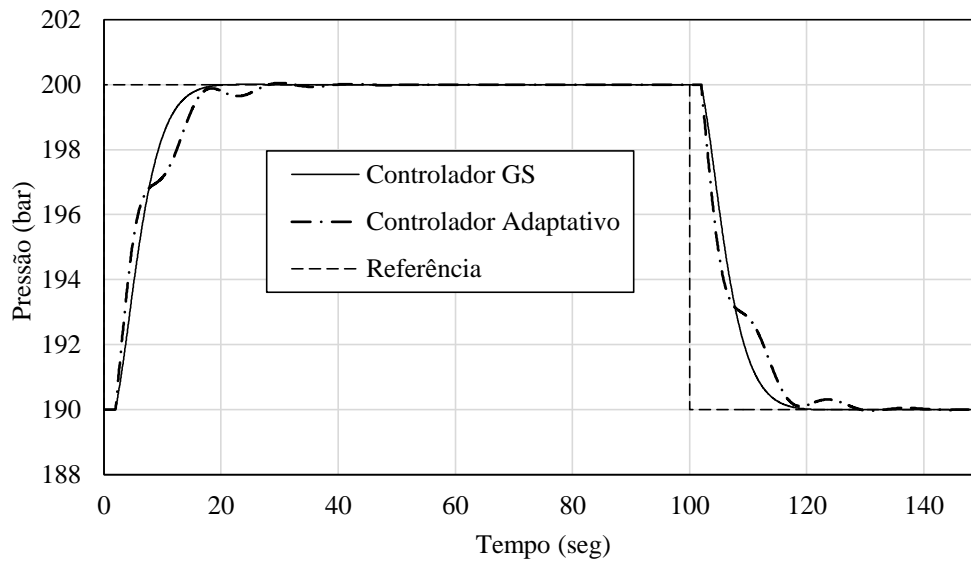
No capítulo anterior obteve-se a Tabela 4.11 com os ganhos  $k_C$ ,  $t_I$  e  $t_D$ , para diferentes profundidades de perfuração (500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros). A ideia principal do método de controle *GS* é projetar uma tabela com os ganhos obtidos previamente e armazenar esta informação para ser usadas quando o for necessário para compensar a instabilidade. O método IMC com filtro aplicado no sinal de entrada de Jin e Liu (2014) foi escolhido para o arranjo desta tabela e testado em diferentes profundidades comparando-o com um controlador adaptativo desenvolvido nos trabalhos de Pedersen (2009) e Magzoub *et al.* (2013).

Durante a perfuração de poços, como foi mencionado na secção 2.4, eventualmente geram-se distúrbios que causam flutuações na pressão. Pode ser citado como fontes de distúrbios o procedimento de conexão de tubos para continuar perfurando em uma maior profundidade, perfuração em zonas geológicas de maior pressão que criam influxos, perdas de circulação entre outros. Com a fim de testar o desempenho do controlador *GS* proposto neste trabalho considerou-se avaliar ele simulando condições de problemas reais presentes durante a perfuração dos poços de petróleo, sendo comparadas com um *CAMR* usado em outros trabalhos.

## 5.1 CONTROLE DA PRESSÃO DESEJADA

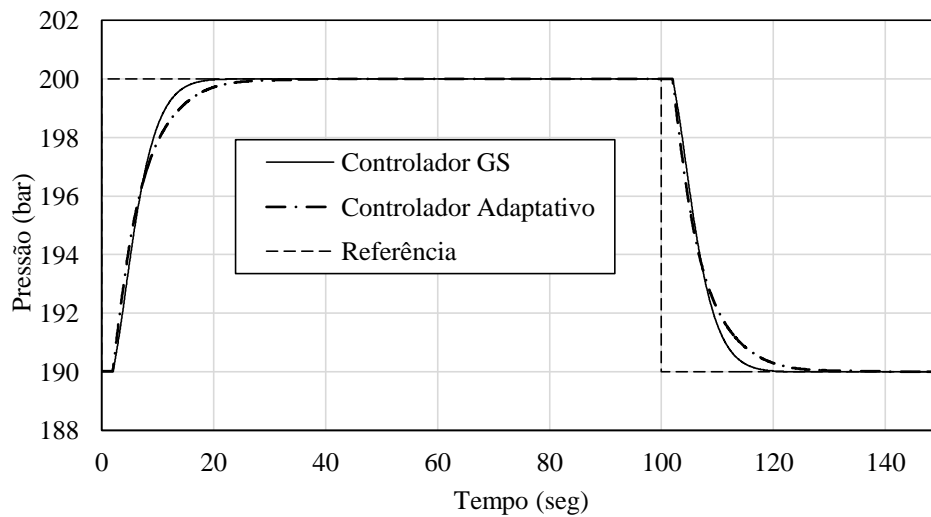
Numa primeira instancia, se tentou testar o controlador projetado para ver como se comportava para o caso do seguimento do sinal (controle da pressão desejada). As faixas de pressão de perfuração podem ser muito grandes e variáveis, mas neste trabalho se considerou uma faixa de 190 – 200 bar, conforme as Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7. Para as 6 profundidades de perfuração (500, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros) aplicou-se no segundo zero uma função degrau positivo desde os 190 até 200 bar de pressão. No segundo 100, aplicou-se um degrau negativo voltando à pressão inicial.

Figura 5.2 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.



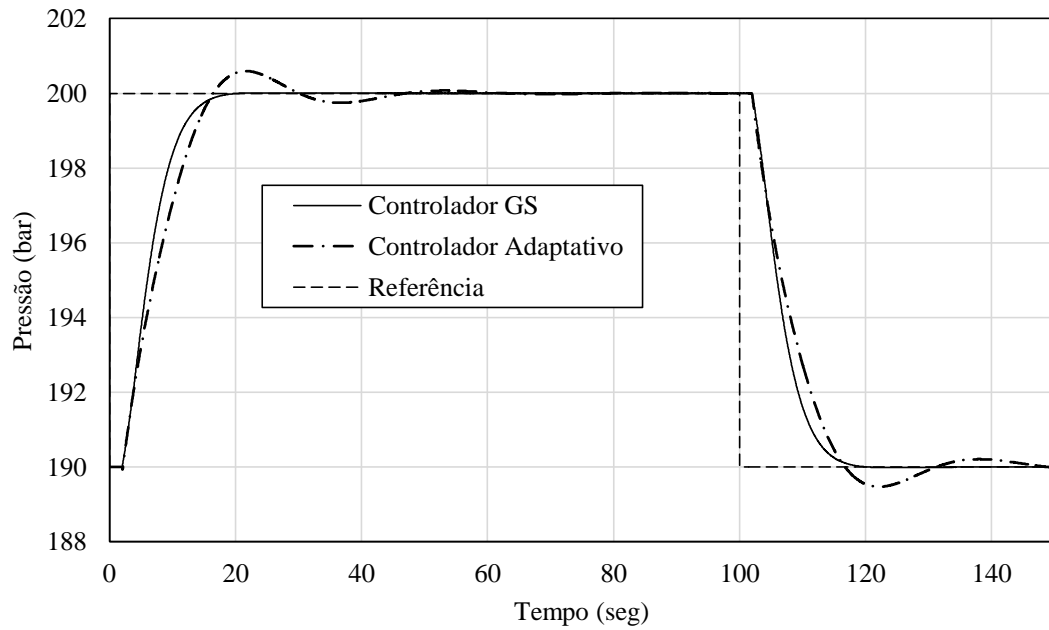
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.3 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.



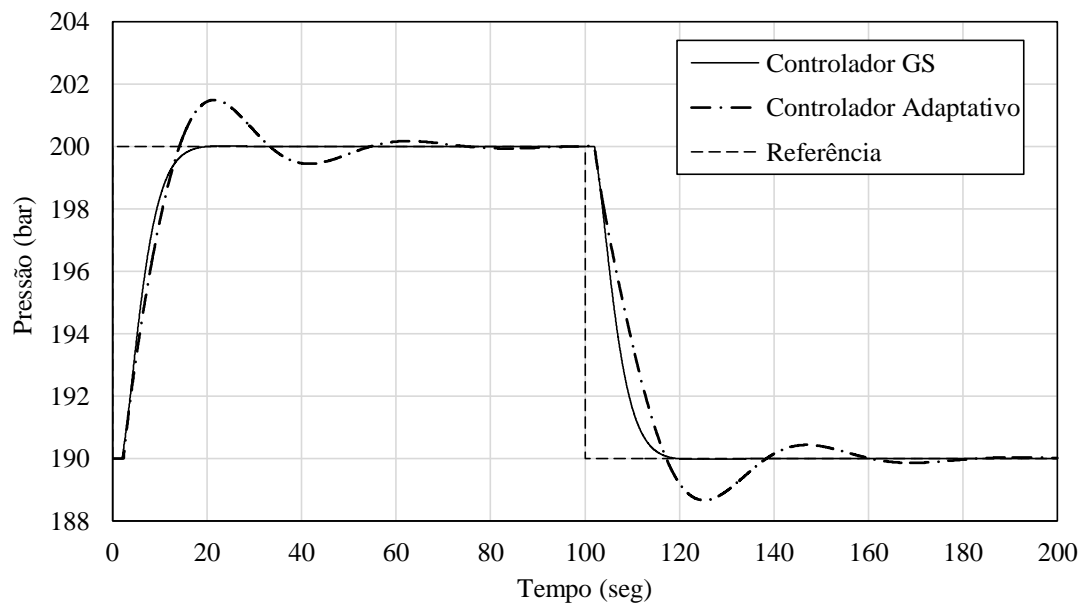
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.4 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.



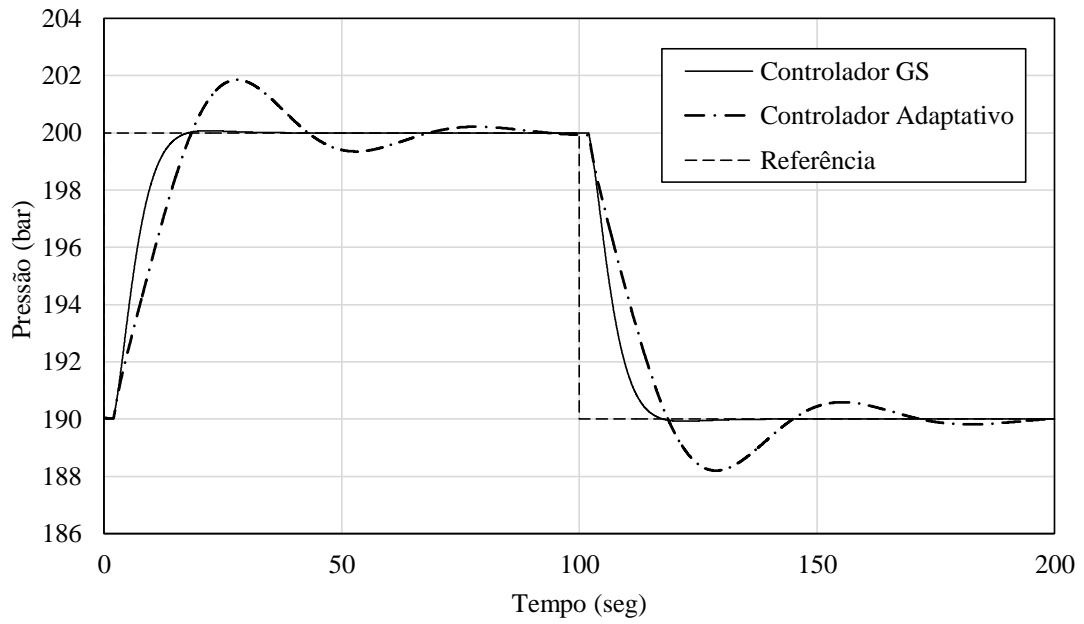
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.5 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.



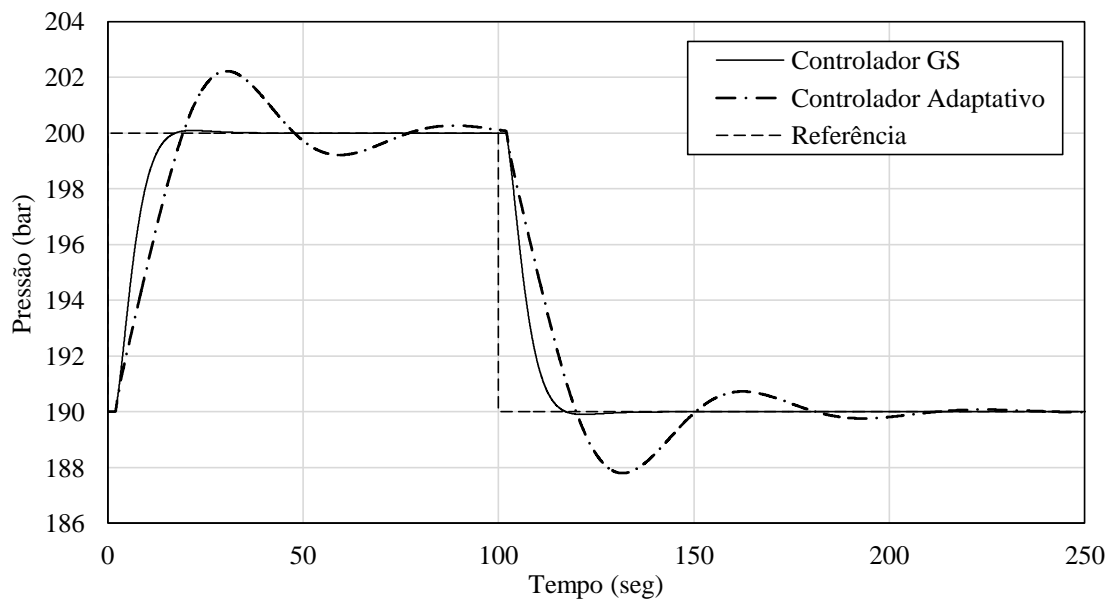
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.6 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.



Fonte: Autoria Própria

Figura 5.7 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos do rastreamento do sinal de referência.

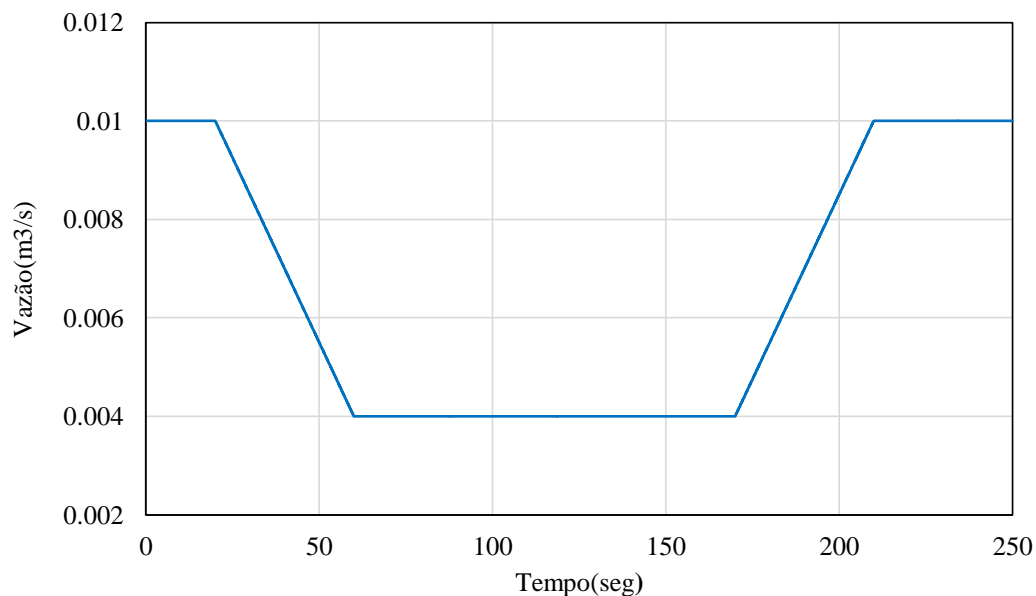


Fonte: Autoria Própria

## 5.2 SIMULAÇÃO DA PERDA DE POTÊNCIA

Na secção 2.4.4 apresentou-se o problema de perdas de potencia, o qual pode ser representado pela mudança do valor da vazão da bomba principal. Também na secção 2.4.1 amostra-se o problema de conexão de tubos, o qual converge com o problema de perda de potencia. A Figura 5.8 mostra o modelo deste distúrbio dada pela queda de vazão na bomba principal. Utilizou-se uma função rampa negativa na variável de vazão principal ( $q_p$ ) durante os segundos de 20 até 60 para logo no segundo 170 retorne à posição inicial. Durante a etapa da desconexão da bomba principal o MPD age ligando a bomba de contrapressão, assim a vazão do sistema torna-se não nula conforme a Figura 5.8 onde a vazão durante este período é de  $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$  (PEDERSEN, 2009).

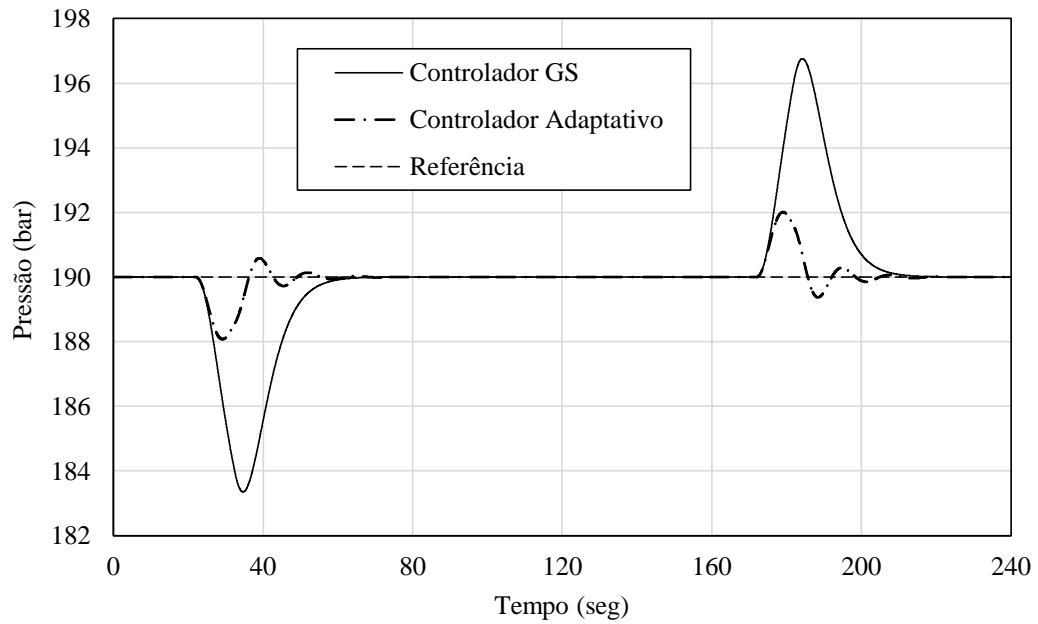
Figura 5.8 - Representação do distúrbio ao problema de perda de potencia e/ou conexão de tubos.



Fonte: Autoria Própria

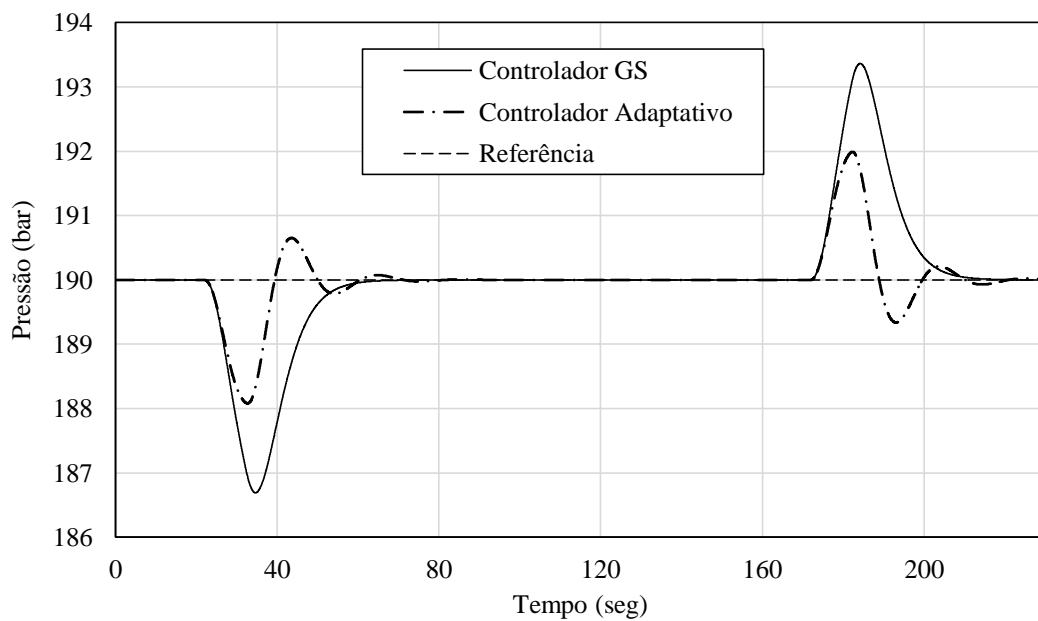
Para as 6 profundidades de perfuração aplicou-se este distúrbio e os resultados para os dois controladores foram apresentados nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14. Nota-se nestas simulações que a pressão do sistema já atingiu a pressão desejada (190 bar).

Figura 5.9 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos na conexão de tubos. ‘



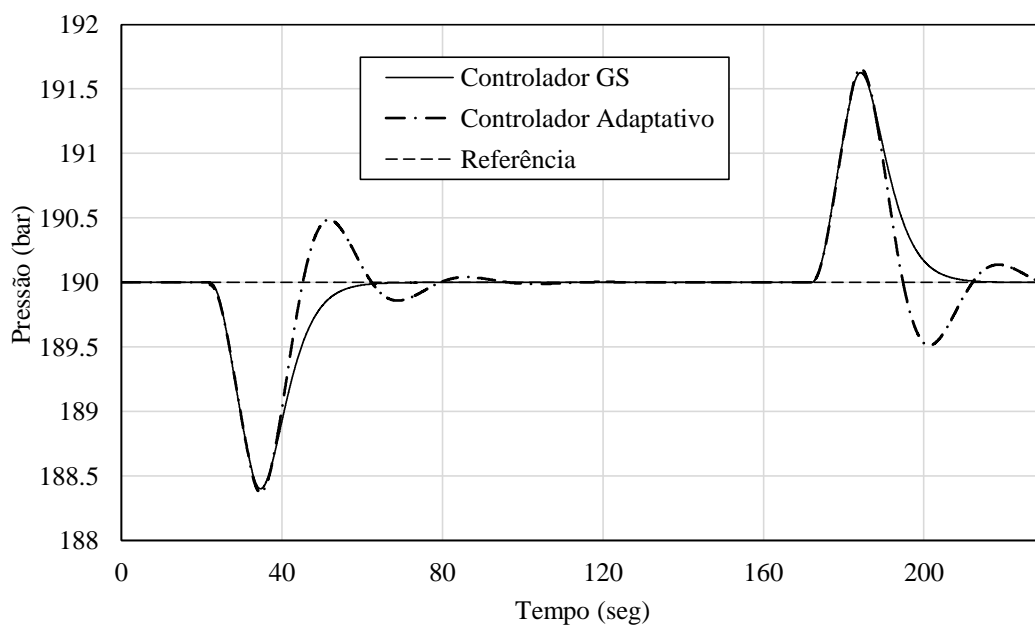
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.10 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos



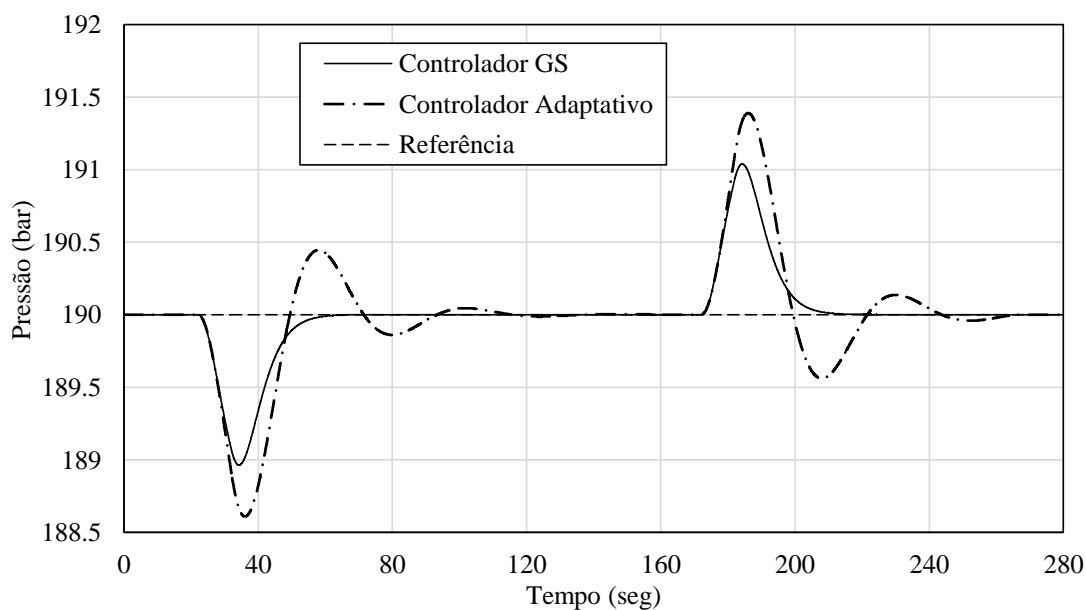
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.11 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.



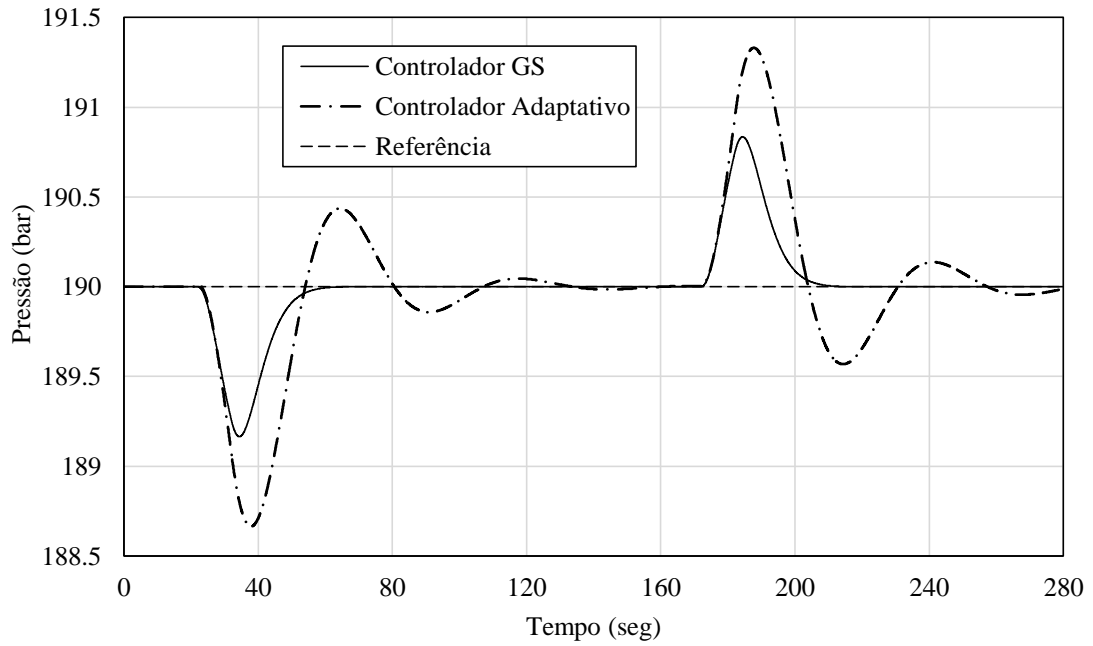
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.12 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.



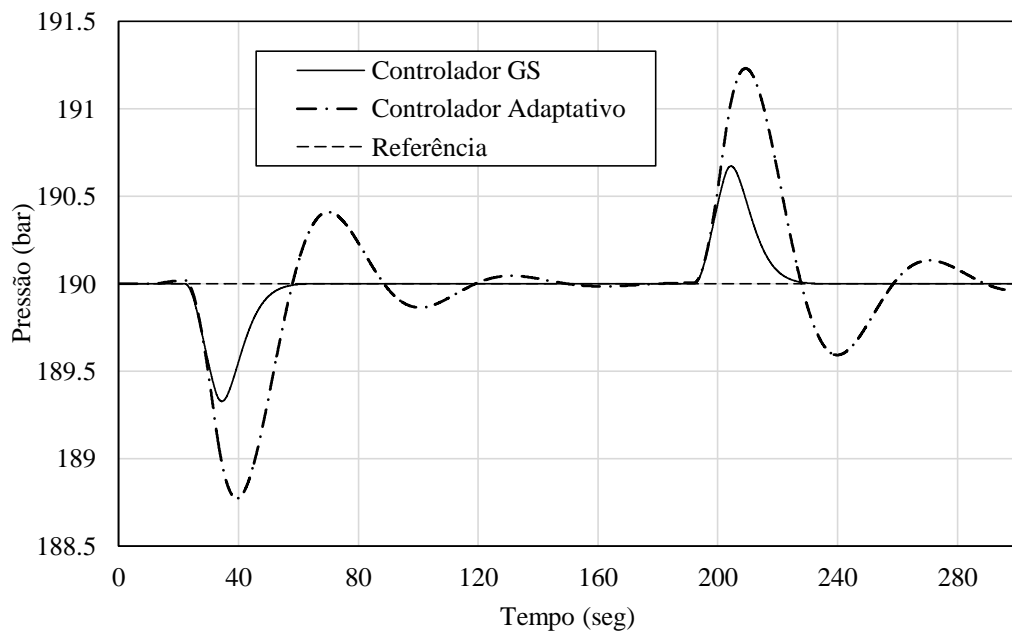
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.13 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.



Fonte: Autoria Própria

Figura 5.14 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos na conexão de tubos.

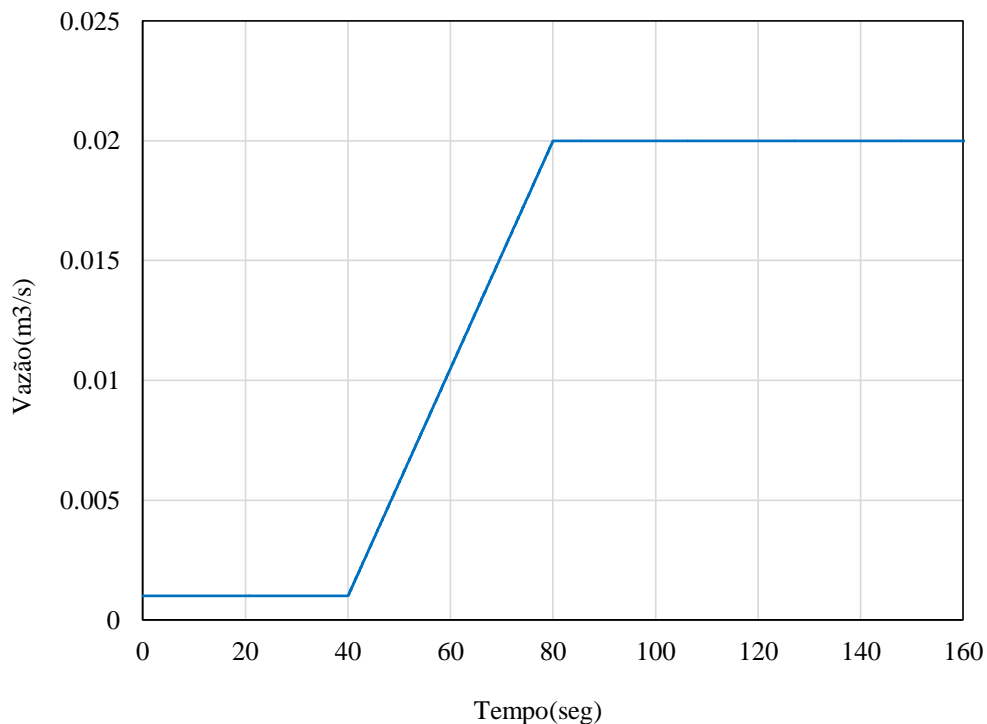


Fonte: Autoria Própria

### 5.3 SIMULAÇÃO DO INFLUXO

Na secção 2.4.5 apresentou-se o problema do influxo ou *kick* dependo da magnitude da velocidade de aumento da pressão. A Figura 5.15 mostra a simulação deste distúrbio mediante o aumento da vazão do reservatório para o poço. Utilizou-se uma função rampa positiva na variável de vazão do reservatório ( $q_{res}$ ) durante os segundos de 40 até 80 que começa em 0,001 até 0,02 m<sup>3</sup>/s (PEDERSEN, 2009). Na realidade um influxo pode acontecer em até instantes mais curtos de tempo, mas para fins da melhor representação do comportamento dos dois sistemas nas Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 considerou-se um intervalo de 40 segundos.

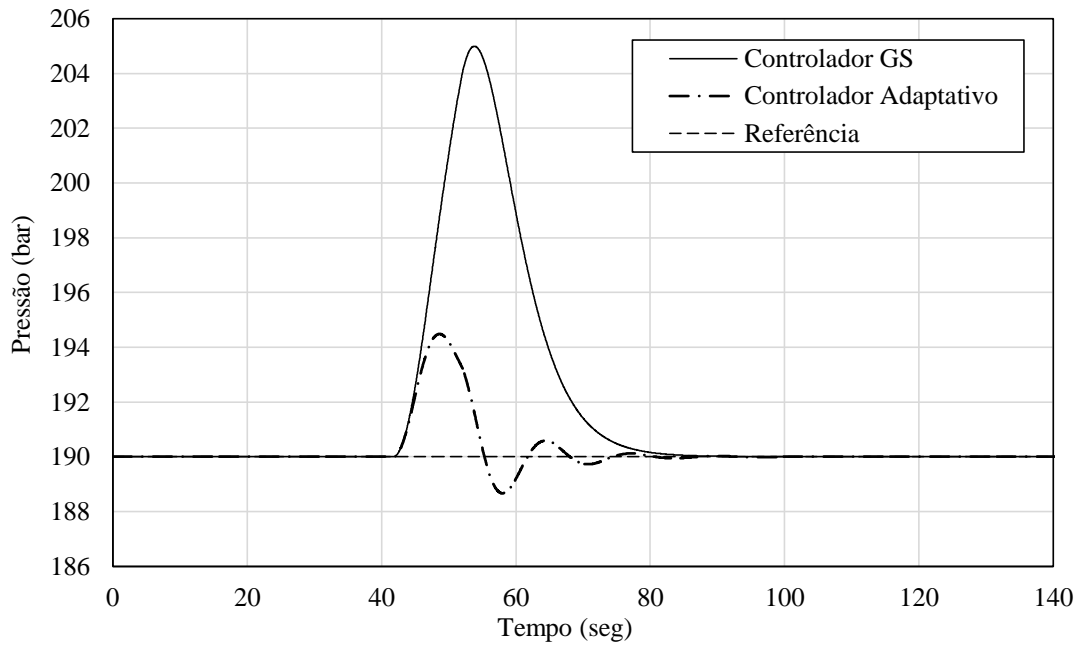
Figura 5.15 - Simulação do distúrbio ao problema do influxo.



Fonte: Autoria Própria

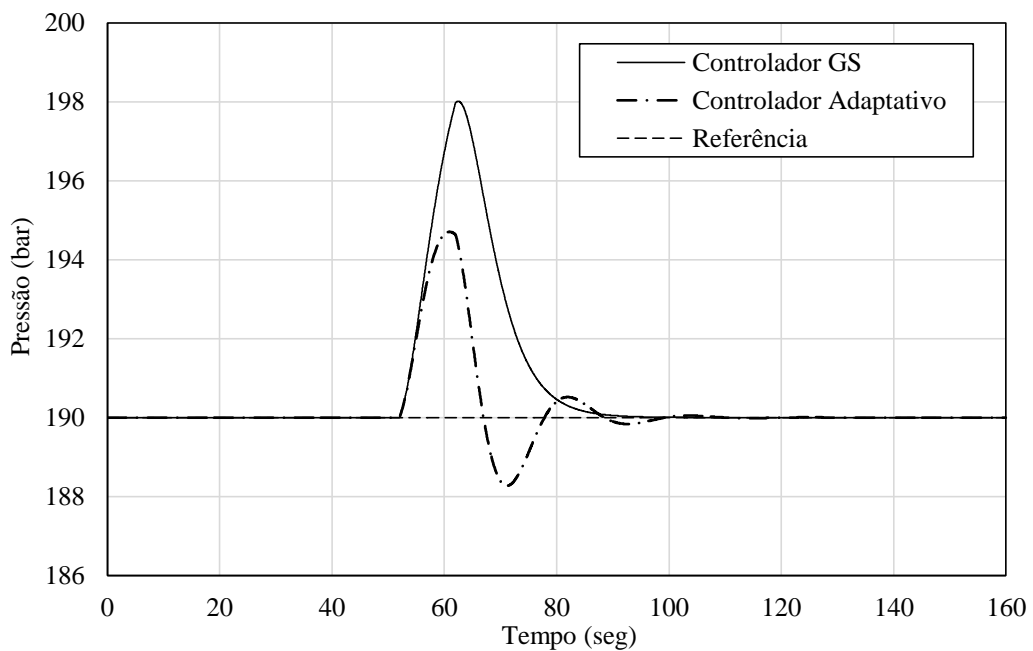
Para as 6 profundidades de perfuração aplicou-se este distúrbio e os resultados para os dois controladores foram apresentados nas Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21. Nota-se nestas simulações que a pressão do sistema já atingiu a pressão desejada (190 bar).

Figura 5.16 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos na presença de influxos.



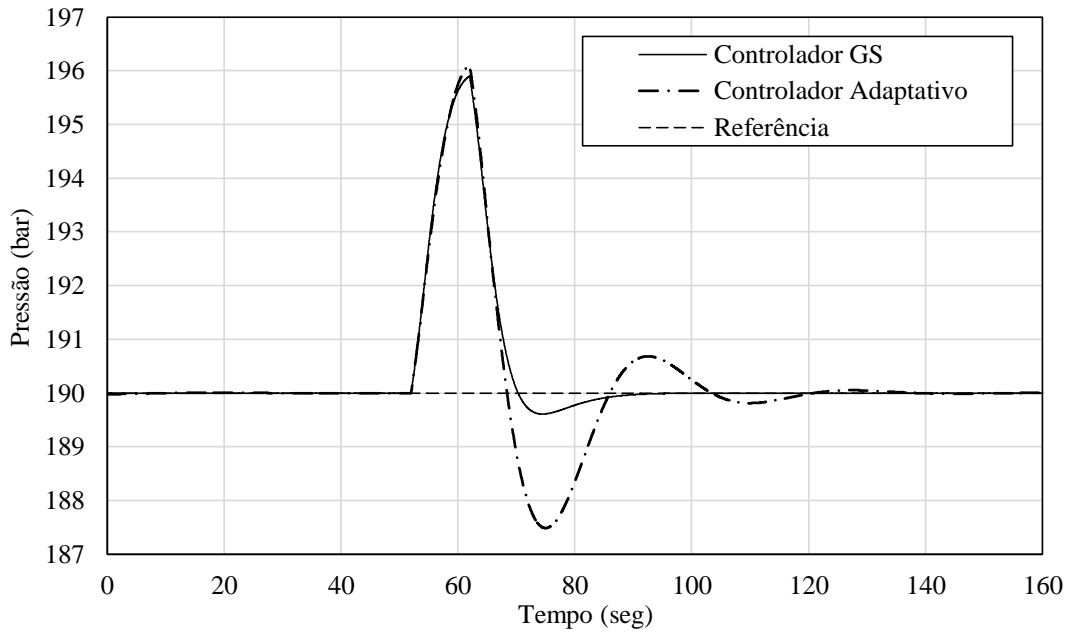
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.17 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.



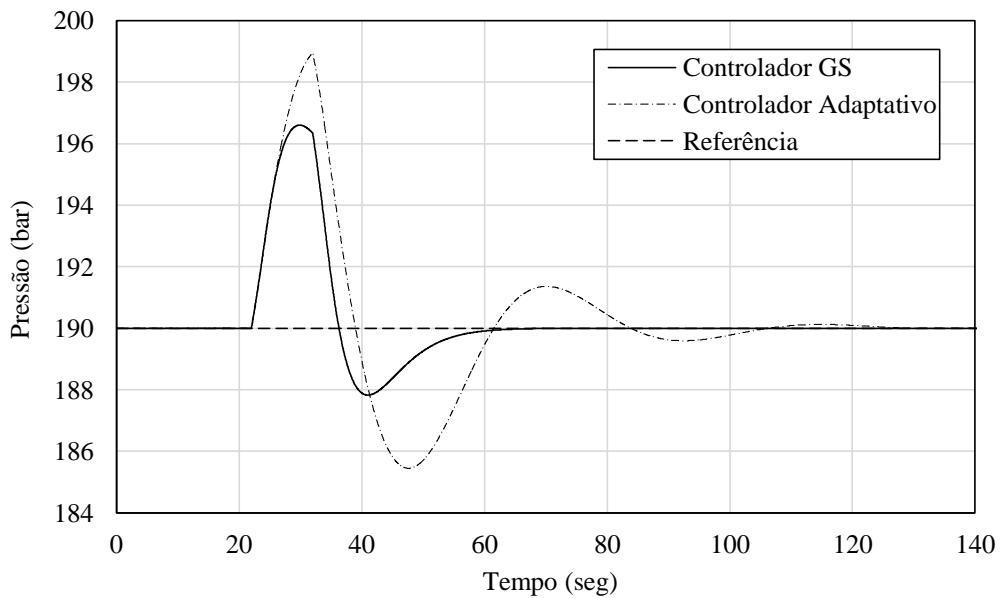
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.18 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.



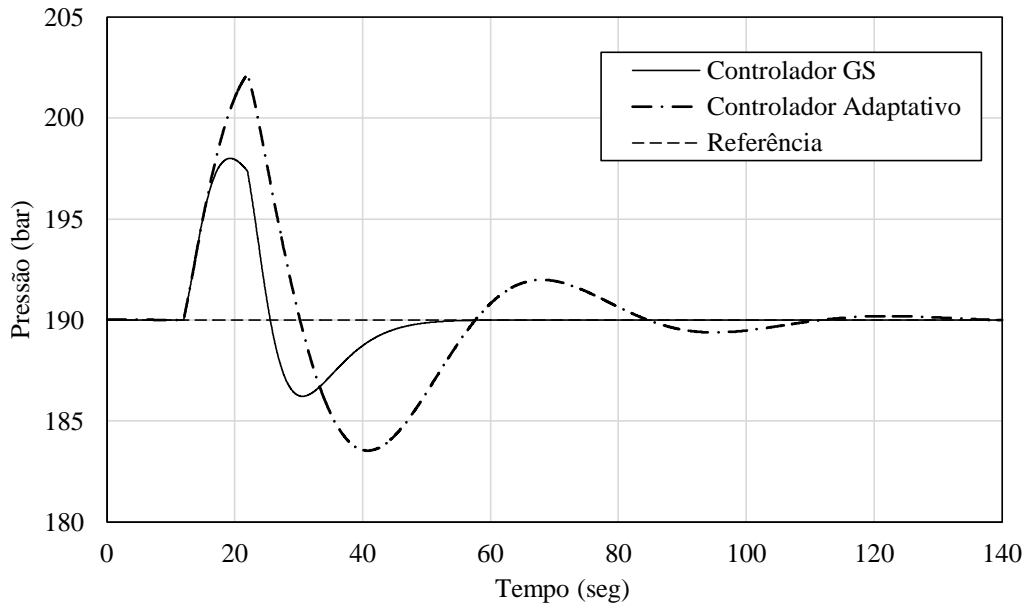
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.19 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.



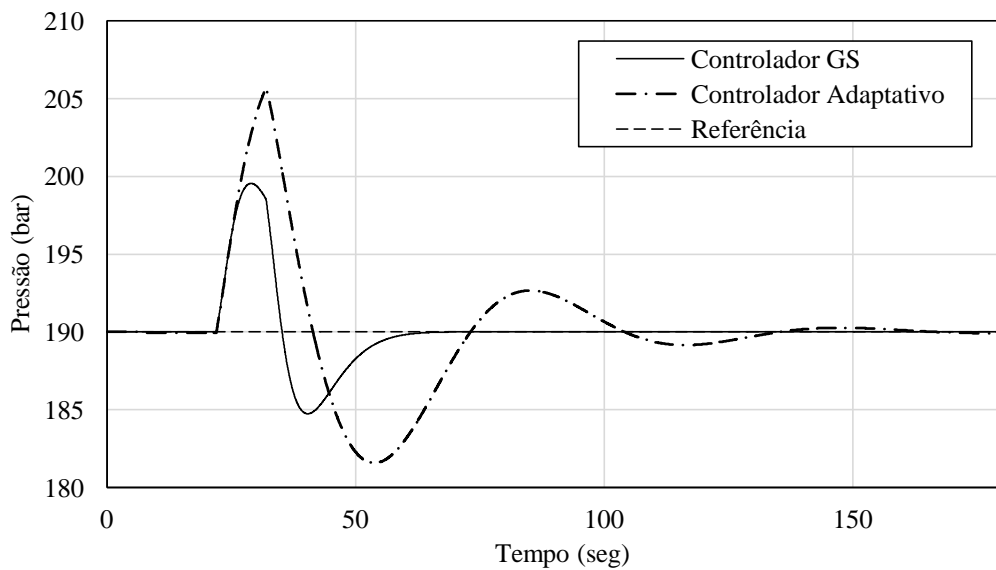
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.20 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.



Fonte: Autoria Própria

Figura 5.21 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos na presença de influxos.

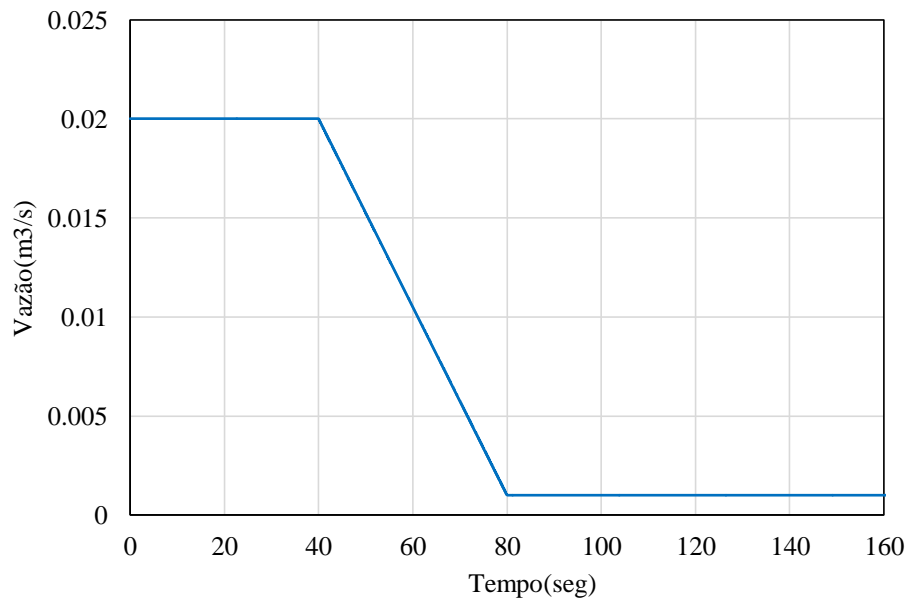


Fonte: Autoria Própria

## 5.4 SIMULAÇÃO DA PERDA DE LAMA

Na secção 2.4.2 e 2.4.3 apresentou-se o problema de perda de lama e perda de circulação do fluido respetivamente. A Figura 5.22 mostra a simulação deste distúrbio mediante o cambio de direção do fluxo de vazão do poço para o reservatório. Utilizou-se uma função rampa negativa na variável de vazão do reservatório ( $q_{res}$ ) durante os segundos de 40 até 80 que começa em 0,02 até 0,001 m<sup>3</sup>/s (PEDERSEN, 2009). Na realidade uma perda de circulação pode variar entre valores menores a zero e pode acontecer em até instantes mais curtos de tempo, mas para fins da melhor representação do comportamento dos dois sistemas controlados nas Figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 considerou-se um intervalo de 40 segundos.

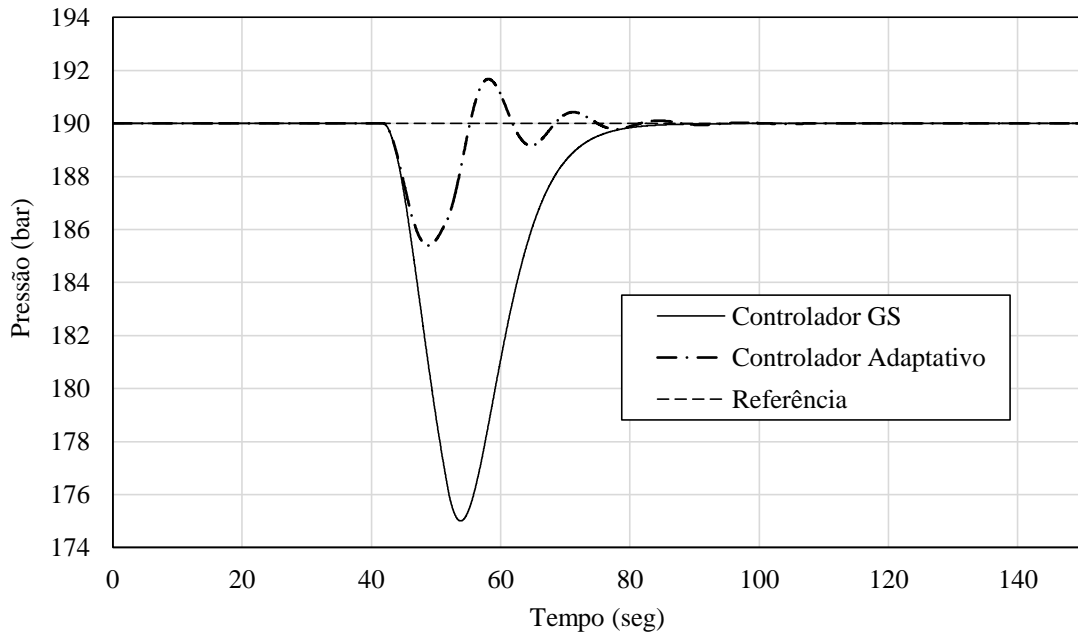
Figura 5.22 - Simulação do distúrbio ao problema de perda de lama.



Fonte: Autoria Própria

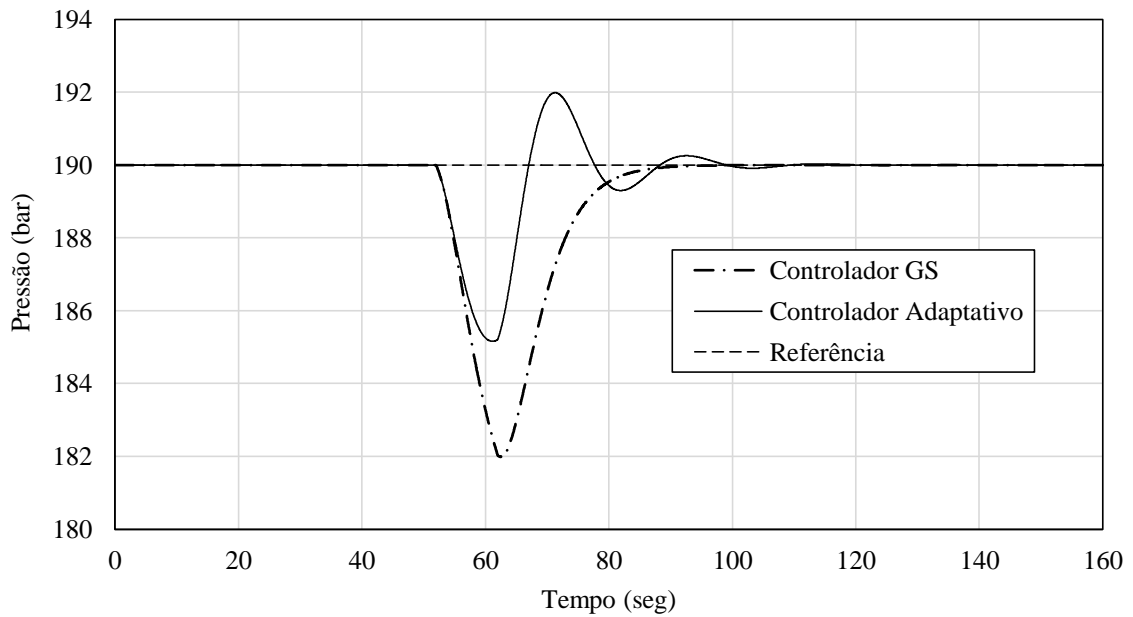
Para as 6 profundidades de perfuração aplicou-se este distúrbio e os resultados para os dois controladores foram apresentados nas Figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28. Nota-se nestas simulações que a pressão do sistema já atingiu a pressão desejada (190 bar).

Figura 5.23 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 500 metros testando os desempenhos na perda de lama.



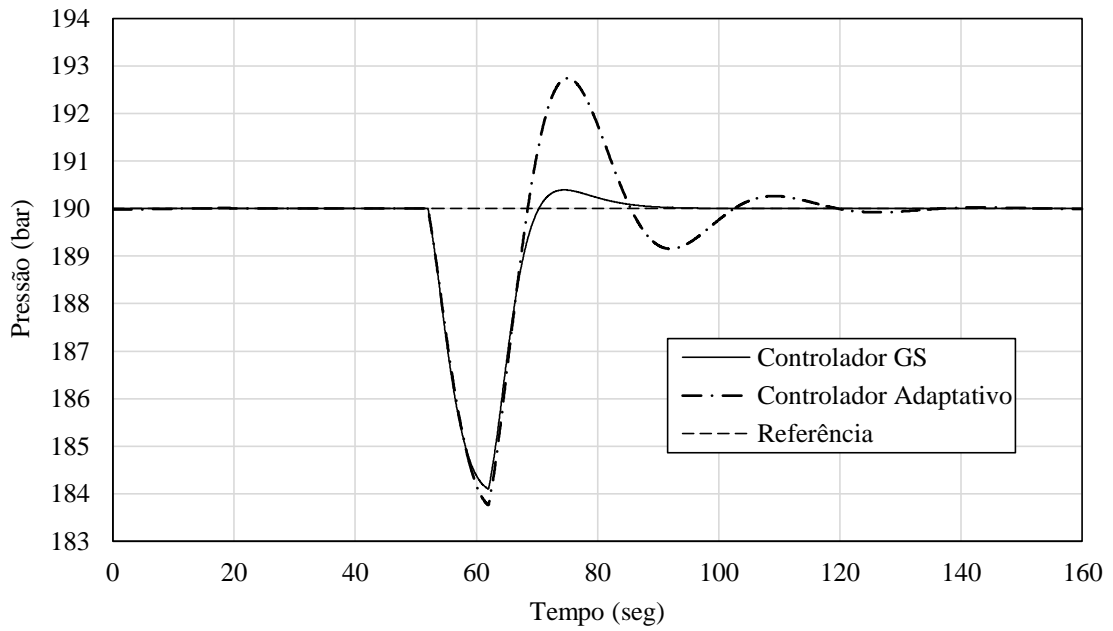
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.24 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 1000 metros testando os desempenhos na perda de lama.



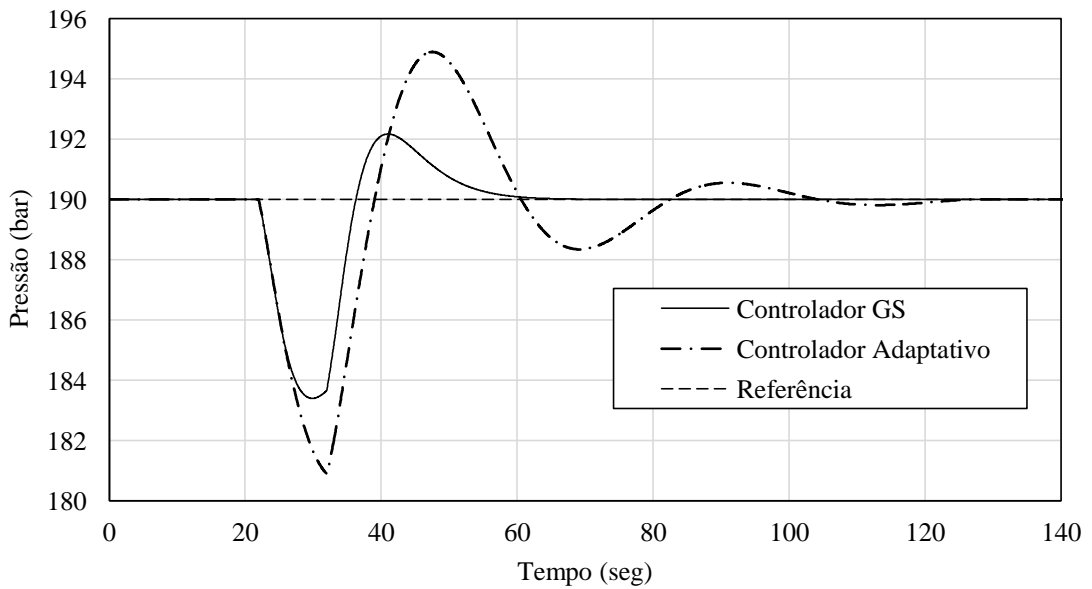
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.25 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 2000 metros testando os desempenhos na perda de lama.



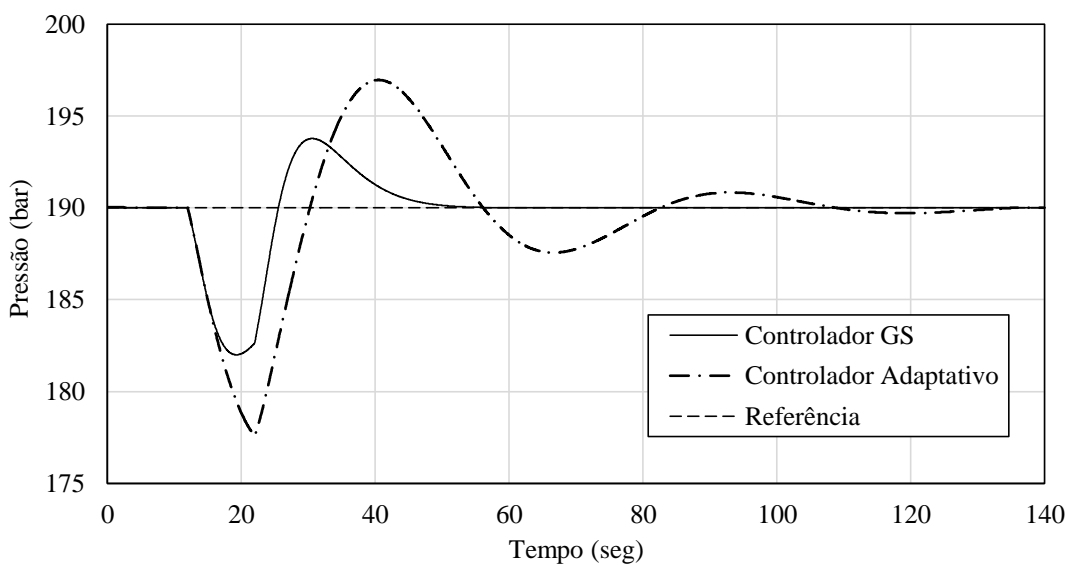
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.26 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 3000 metros testando os desempenhos na perda de lama.



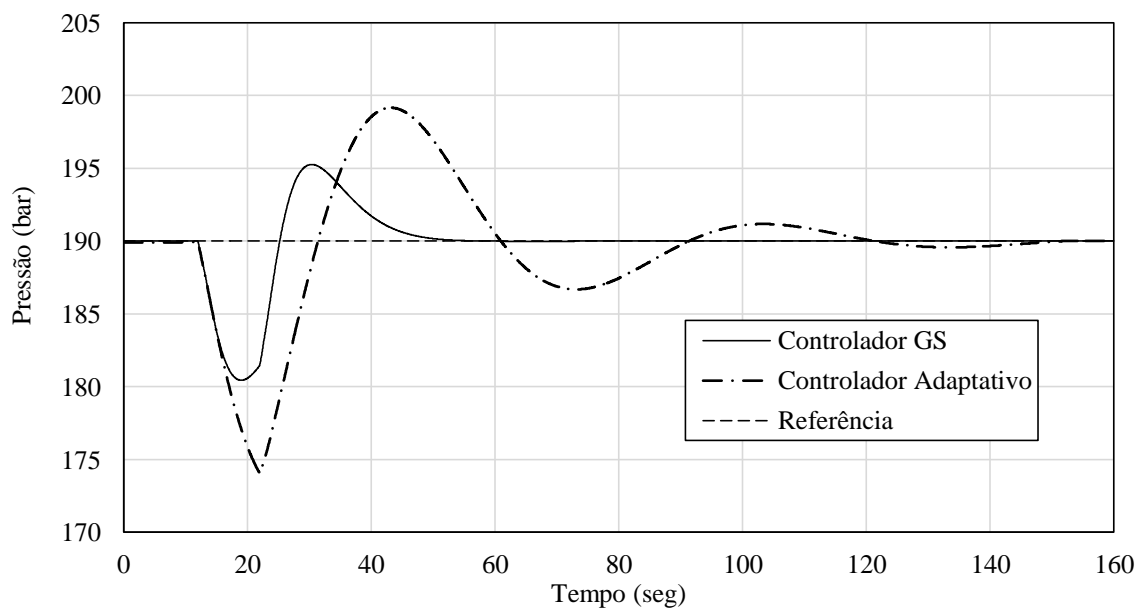
Fonte: Autoria Própria

Figura 5.27 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 4000 metros testando os desempenhos na perda de lama.



Fonte: Autoria Própria

Figura 5.28 - Resposta do sistema do controlador GS e controlador Adaptativo por modelo de referência para uma profundidade de 5000 metros testando os desempenhos na perda de lama.



Fonte: Autoria Própria

Na avaliação do controlador GS para o rastreamento do sinal observou-se um bom desempenho em todas as profundidades de perfuração. Mostrando um tempo de assentamento de aproximadamente de 18 segundos. No entanto, o desempenho do sistema controlado pelo CAMR torna-se mais instável à medida que a profundidade aumenta. Isto se deve principalmente a que o controle adaptativo apresenta, por definição, um controlador, variável o qual varia em relação à variação dos parâmetros do processo. Entretanto, na sua estrutura de controle apresenta alguns parâmetros que são fixos como os parâmetros do processo de referencia e o parâmetro multiplicador da derivada do erro mínimo. Estes parâmetros fixos fazem que também para este sistema controlado por CAMR se apresentem limites de estabilidade, nesse sentido o comportamento apresentado nas ultimas profundidades de perfuração devem-se a que o sistema se encontra mais próximo a estes limites (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995; IOANNOU; SUN, 1996).

Por outro lado, no problema por conexão de tubos, se observou que no começo da perfuração, o controlador GS apresenta problemas de rejeição rápida na presença deste distúrbio. O IAE-d é mais elevado nas profundidades iniciais com que as finais. Isto é coerente com os trabalhos propostos por Rivera (1986) e Skogestad (2003), principalmente, por que nos seus trabalhos o comportamento do IAE-d esta relacionado com o grau de instabilidade do sistema. Conforme a Figura 4.3 determina-se claramente que na perfuração a 500 metros o sistema é completamente sensível, entende-se por sensibilidade de um sistema ao grau de efeito sobre a resposta quando se efetua uma ação por parte do controlador, ou seja, a pendente de dita profundidade é mais vertical que as outras atingindo a pressões elevadas em curto tempo quando se fizer alguma correção do sistema.

Nos casos de influxos e perda de lama acontece uma situação parecida, mas a despeito disso sempre os sistemas controlados por GS para todos os casos atingem a estabilidade num tempo mais curto que aplicando o CAMR.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, abordou-se a obtenção dos ganhos PID no controle da pressão no fundo do poço durante a perfuração para diferentes profundidades de operação. As condições de operação investigadas exploram a ocorrência de problemas de influxo, perda de lama, conexão de tubos, entre outros, que se apresentam durante esta etapa de exploração, as quais demandam estratégias de controle capazes de amortecer ou rejeitar estas perturbações no sistema.

Existe uma grande necessidade por manter o poço na pressão desejada não só devido aos custos econômicos que um acidente possa gerar, mas também pela segurança ambiental e humana durante a operação. Todo isto, faz com que este tema de investigação seja relevante e amplamente estudado no futuro. Neste trabalho se esboçou o funcionamento do sistema de perfuração, apresentando conceitos básicos, mas importantes para o entendimento do assunto.

Ressalta-se no decorrer do texto a relevância do conhecimento da dinâmica do processo via modelagem matemática do processo. No capítulo 3 se apresentou um modelamento do processo proposto por Kaasa (2006) representado por quatro equações não lineares. Para aplicar o método de controle, que foi apresentado nos capítulos posteriores, conseguiu-se gerar o modelo matemático linearizado do processo não linear de perfuração de poços de petróleo, o qual foi representado em função da Transformada de Laplace.

Além do mais, teve que se ajustar esta função de transferência para uma função de transferência predeterminada que seja compatível com a implementação do controlador. Um elemento integrativo foi obtido na linearização do modelo do processo, nesse sentido o processo linearizado foi ajustado para um modelo de primeira ordem com elemento integrativo, a qual seria a função de transferência predeterminada.

É importante notar que, a linearização do modelo foi necessária para poder aplicar a teoria de controle e obter os ganhos do controlador, mas uma vez obtido, este controlador foi aplicado sobre o processo não linear para determinar o desempenho da resposta do sistema controlado.

Adicionou-se um tempo de atraso na medição da Pressão no Fundo do Poço (PFP) a qual deteriora o desempenho de sistemas em laço fechado, de modo a fazer com que a PFP

flutue. Os controladores desenvolvidos consideraram este tempo de atraso no cálculo dos seus ganhos.

Estudaram-se três teorias de controle do tipo IMC para testar os seus desempenhos no processo de perfuração. O controlador IMC tradicional proposto por Rivera (1986) gera um melhor desempenho que o controlador SIMC, entretanto a metodologia SIMC tem como vantagem a sua formulação algébrica para obter os ganhos do desempenho ótimo para esse controlador. A adição de um filtro no sinal de referência como foi proposto por Jin e Liu (2014) gera um melhor desempenho na resposta ao degrau e ao distúrbio do sistema. Dos três controladores propostos, o que apresentou melhor desempenho foi o controlador IMC com dois graus de liberdade. Além da presença do termo integrativo no modelo do processo e do tempo de atraso no sistema os três controladores atingiram a estabilidade num determinado momento na presença de distúrbios.

Implementaram-se as três metodologias separadamente para obter a sintonização dos ganhos PID para diferentes profundidades. Verificaram-se os requisitos exigidos no projeto do controlador. Para depois da análise, especificar e tabelar o controlador GS com os ganhos de melhor desempenho das três metodologias propostas, o IMC com dois graus de liberdade.

Finalmente, avaliou-se o controlador GS para diferentes profundidades comparando-o com um CAMR simulando problemas de influxo, perda de lama e perda de potência como distúrbios. O sistema controlado por CAMR atingiu sempre a estabilidade. No entanto o sistema controlado por GS apresentou melhor desempenho na maioria das profundidades (superior a 1000 metros).

Entre as principais sugestões para trabalhos futuros, podem-se citar as seguintes:

- Considerar a variação da temperatura no equacionamento no modelo do processo, o que tornaria mais próximo da realidade o sistema de perfuração. Visto que, a variação da temperatura tem certa influência na pressão do poço petrolífero. Além da temperatura, se poderia considerar no modelo um sistema composto por duas fases (líquido e gás).
- Implementar o controlador GS num processo de perfuração de poços de petróleo em tempo real.
- E finalmente, utilizar os ganhos obtidos e tabelados como base de treino de um sistema inteligente, por exemplo, numa rede neural, com o objetivo de obter um controlador mais sofisticado e preciso.

**REFERÊNCIAS**

- ABIMBOLA, M.; KHAN, F.; KHAKZAD, N. Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 30, p. 74-85, 2014.
- ABIMBOLA, M. et al. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. **Safety Science**, v. 76, p. 133-144, 2015.
- AZAR, J. J.; SAMUEL, G. R. **Drilling Engineering**. Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation, 2007. 486 p.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. North Carolina: Instrument Society of America, 1995. 343 p.
- ÅSTRÖM, K. J.; PANAGOPOULOS, H.; HÄGGLUND, T. Design of PI controllers based on non-convex optimization. **Automatica**, v. 34, p. 585-601, 1998.
- ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. 2. ed. Canada: Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 574 p.
- BELFORT, F. R. **Controle da pressão anular de fundo durante a perfuração de poços de petróleo**. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química – Tecnologia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.
- BOIKO, I. Variable-structure PID controller for level process. **Control Engineering Practice**, v. 21, p. 700-707, 2013.
- BREYHOLTZ, Ø. **Nonlinear Model Predictive Pressure Control during Drilling Operations**. 2008. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cibernética) – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2008
- CAMPOS, M.C.M.M et al. Advanced Control system for Offshore Production Platforms. In: Offshore Technology Conference Brasil, 1., 2013, Rio de Janeiro. **OTC BRASIL 2013**. Rio de Janeiro, mai. 2013
- CARLSEN, L. A.; NYGAARD, G.; NIKOLAOU, M. Evaluation of control methods for drilling operations with unexpected gas influx. **Journal of Process Control**, v. 23, p. 306-316, 2013.
- CORREIA, O. L. S. **Petróleo: Noções sobre exploração, perfuração, produção e microbiologia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 86 p.
- CREUS, A. **Instrumentación Industrial**. 8. ed. México D. F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A., 2011. 776 p.

FOLSTA, M. G.; MARTINS, A. L. Applying Theoretical Control Strategies for ROP Optimization and Offshore Well Costs Mitigation. In: IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 1., 2012, San Diego, California. **International Association of Drilling Contractors or the Society of Petroleum Engineers**. California, mar. 2012.

FREITAS, et al. Acidentes de trabalho em plataformas de petróleo da Bacia de Campos, Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 17, n. 1, p. 117-130, 2001.

GABALDON, O.; CULEN, M.; BRAND, P. Enhancing Well Control Through Managed Pressure Drilling. In: Offshore Technology Conference, 10., 2013, Houston, Texas. **OTC 2014**. Houston, Texas, mai. 2014.

GODHAVN, J-M et al. Drilling seeking automatic control solutions. **IFAC Proceedings**, v. 44, n. 1, p. 10842-10850, 2011.

HAUGE, E. **Automatic Kick Detection and Handling in Managed Pressure Drilling Systems**. 2013. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia Cibernética) – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2013.

HAUGE, E. et al. A novel model-based scheme for kick and loss mitigation during drilling. **Journal of Process Control**, v. 23, p. 463-472, 2013.

IOANNOU, P. A.; SUN, J. **Robust Adaptive Control**. 1. ed. California: Prentice Hall, 1996. 821 p.

JIN, Q. B.; LIU, Q. Analytical IMC-PID design in terms of performance/robustness tradeoff for integrating processes: From 2-Dof to 1-Dof. **Journal of Process Control**, v. 24, p. 22-32, 2014.

JOHNSON, M; A.; MORADI, M. H. **PID Control: New Identification and Design Methods**. 1. ed. London: Springer-Verlag London, 2005. 544 p.

KAASA, G. O. (2006), A Simple Dynamic Model of Drilling for Control, Technical Report, StatoilHydro Research Centre Porsgrunn, 2007

KANKANAMGE, T. **Pore pressure and fracture pressure modelling with- offset well data and its application to-surface casing design of a development well: Deep Panuke Gas Pool offshore Nova Scotia**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Petroleum Engineering) – Department of Process Engineering and Applied Science, Dalhousie University, Halifax, 2013.

KARIMI, A. V.; BURANAJ, B. H.; VAN OORT, E. Automated Well control Decisión-Making during Manage Pressure Drilling Operations. In: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 1., 2014, Galveston, Texas. **Society of Petroleum Engineers**. Galveston, set. 2014.

KENNETT, B. J.; SMITH, M. The Design of an Automated Drilling Rig: RA-D. In: IADC/SPE Drilling Conference, 1., 1991, Amsterdam, Holanda. **Society of Petroleum Engineers**. Amsterdam, mar. 1991.

KEY WORLD ENERGY STATISTICS. Paris: International Energy Agency. 2014-2015.

LANDET, I. S. **Modeling and Control for Managed Pressure Drilling from Floaters**. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cibernética) – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011

LJONES, T. **Drilling mud property estimator**. 2013. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cibernética) – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2013.

MAGZOUN, M. A.; SAAD, N. B.; IBRAHIM, R. B. Managed Pressure Drilling System Using Adaptive Control. In: First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation, 1., 2013, Malaysia. **AIMS2013**. Malaysia, may. 2013.

MARTINS, R. F.; RIBEIRO, P. R. Simulação do Controle de Poços de Gás. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 1., 2007, Campinas, SP. **Associação Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**. Campinas, out. 2007.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons Inc., 2000. 1007 p.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5. ed. New Jersey: Pearson Education, 2010, 894 p.

PEDERSEN, T. **L1 Adaptive Control in Managed Pressure Drilling**. 2009. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cibernética) – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2009

PEDERSEN, T.; GODHAVN, J-M.; SCHUBERT, J. Supervisory control for underbalanced drilling operations. **IFAC -PapersOnLine**, v. 48, n. 6, p. 120-127, 2015.

PEDERSEN, T.; GODHAVN, J-M. Model Predictive Control of Flow and Pressure in Underbalanced Drilling. **IFAC Proceedings**, v. 46, n. 32, p. 307-312, 2013.

PINTO, D. D. **Estratégias de Controle Contra Intermittência Severa na Alimentação de Separadores Offshore**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química – Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

REHM, B et al. **Managed Pressure Drilling**. 1. ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2008. 369 p.

REITSMA, D. G.; COUTURIER, Y. New Choke Controller for Managed Pressure Drilling. **IFAC Proceedings**, v. 45, n. 8, p. 223-230, 2012.

RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal Model Control. 4. PID Controller Design. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 25, p. 252-265, 1986.

ROGERS, W. F. **Composition and Properties of oil well drilling fluids**. 1. ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1953. 676 p.

SHAHRI, M. E; BALOCHIAN, S. Fractional PID controller for a High performance Drilling Machine. **Advances in Mechanical Engineering and its Applications**, v. 2, n. 4, p. 232-235, 2012.

SHAMES, N. S. **Mecánica de los Fluidos**. 3. ed. Bogotá: McGRAWHILL, Inc., 1995. 825 p.

SHEHHI, H. A.; BOIKO, I. MRFT-based design of robust and adaptive controllers for gas loop of oil-gas separator. **Cogent engineering**, v. 2, p. 1-19, 2015.

SHISHAVAN, R. A. et al. Multivariate Control for Manage Pressure Drilling Systems using High Speed Telemetry. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition,1. ,2014, Amsterdam, Holanda. **Society of Petroleum Engineers**. Amsterdam, out. 2014

SIAHAAN, H. B.; JIN, H.; SAFONOV, F. G. An Adaptive PID switching Controller for Pressure Regulation in Drilling. **IFAC Proceedings**, v. 45, n. 8, p. 90-94, 2012.

SKOGESTAD, S. Simple analytic rule for model reduction and PID controller tuning. **Journal of Process Control**, v. 14, n. 4, p. 291-309, 2003.

SODERSTROM, T.; STOICA, P. **System Identification**. 1. ed. Cambridge: Prentice Hall International, 1989. 612 p.

STAMMES, Ø. N. **Nonlinear Estimation with Applications to Drilling**. 2011. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia Cibernética) – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011.

YILMAZ, M.; DHANSRI, N. R.; MUJEEB, S. An Intelligent Control Approach for Oil Drilling Processes. **Procedia Computer Science**, v. 6, p. 106-111, 2011.

ZHOU, J. et al. Adaptive Observer for Kick Detection and Switched Control for Bottomhole Pressure Regulation and Kick Attenuation during Managed Pressure Drilling. In: Proceedings of the 2010 American Control Conference, 1., 2010, Baltimore, MD. **Americam Control Conference**. Baltimore, jul. 2010.

ZHOU, J.; KRSTIC, M. Adaptive predictor control for stabilizing pressure in a managed pressure drilling system under time-delay. **Journal of Process Control** v. 4, p. 106-118, 20116.

## ANEXO I – Modelagem do Processo de Perfuração

A revisão do modelo proposto por Kassa (2006) é apresentado nesta parte do trabalho para explicar a fonte das equações que são utilizadas na simulação e estudos do controle.

### I.1 EQUAÇÃO DE ESTADO

A lama de perfuração tem uma densidade que muda em função da pressão e da temperatura, e a função linearizada será utilizada como aproximação.

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial p}(p - p_0) + \frac{\partial \rho}{\partial T}(T - T_0) \quad (\text{A.1})$$

$p_0$ ,  $\rho_0$  e  $T_0$  são condições de funcionamento, como a equação de energia não será considerada e as condições isotérmicas são assumidas.

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial p}(p - p_0) \quad (\text{I.2})$$

O *bulk modulus* ou modulo de compressibilidade é um termo usado para descrever a compressibilidade do fluido. Embora a compressibilidade dos líquidos seja pequena, é por vezes importante como, por exemplo, no caso de pressões muito altas. (SHAMES, 1995)

$$\beta = -V \frac{\partial p}{\partial V} = \rho \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (\text{I.3})$$

O modulo de compressibilidade está relacionado com a velocidade do som mediante a equação (I.4)

$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (\text{I.4})$$

Sendo  $c$  a velocidade do som. A equação (I.4) também pode ser escrita segundo a equação (I.5).

$$\frac{\partial \rho}{\rho} = \frac{\partial p}{\beta} \quad (\text{I.5})$$

Finalmente, insere-se a equação (I.5) na equação (I.2).

$$\rho = \rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta} (p - p_0) \quad (\text{I.6})$$

## I.2 ATRITO

A fricção não pode ser ignorada, pois a lama é um fluido viscoso. Os termos de fricção que serão discutidos nesta secção são perdas maiores e perdas menores.

### I.2.1 Perdas de carga em tubos (maiores)

Perdas maiores ou perdas por altura é um termo que descreve a variação de pressão em secções retas de tubulações. O termo de perda por fricção pode ser dado por:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = S(x) \frac{\partial(\sigma_w)}{\partial x} \quad (\text{I.7})$$

Sendo  $\sigma_w$  é o esforço cortante na parede da coluna. Para um tubo, o termo de fricção é determinado por:

$$\sigma_w = f \frac{1}{4} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (\text{I.8})$$

O parâmetro  $f$  (Factor de Fricção de Darcy) é adimensional. Para tubulações lisas se assume  $f = 0.316 Re^{-1/4}$  para  $Re < 10^5$ . (SHAMES, 1995)

### I.2.2 Perdas de carga por acessórios (menores)

Quando há conexões ou válvulas em tubulações é geralmente necessário ter em conta as perdas devido a estes acessórios além das perdas causadas pelo atrito nos tubos. Normalmente, isso é feito usando resultados experimentais. (SHAMES, 1995) Esta informação é dada em forma da equação (I.9)

$$\Delta p = K_L \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (\text{I.9})$$

sendo  $K_L$  é o coeficiente de perdas obtido empiricamente.

$$K_L = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (\text{I.10})$$

O valor de  $K_L$  depende do numero de Reynolds e da geometria do acessório.

### I.2.3 Gradiente de Atrito

A perda de pressão por atrito será a soma das perdas maiores mais as perdas menores. (BREYHOLTZ, 2008). As perdas menores da equação (I.9) estão relacionadas à variação da força de acordo a equação (I.11)

$$\frac{\partial F}{\partial x} = A(x) \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (\text{I.11})$$

Sendo  $k$  o coeficiente de perdas sobre o comprimento  $\Delta L$ , e a gradiente de perdas menores.

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{k}{\Delta L} = K_L \quad (\text{I.12})$$

O gradiente total de atrito no poço será a soma das perdas dadas nas equações (I.7) e (I.11). A velocidade do fluido que passa por a área seccional é igual à vazão  $q$  dividida por tal área.

$$\frac{\partial F_a}{\partial x} = \frac{1}{4} f S(x) \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{A(x)} \right)^2 + \frac{\partial k}{\partial x} A(x) \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{A(x)} \right)^2 \quad (\text{I.13})$$

Sendo  $A(x)$  a área seccional e  $S(x)$  é o perímetro do fluxo.

### I.3 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A seguinte formulação baseia-se na equação de transporte de Reynolds.

$$\frac{DN}{Dt} = \oint_{S.C} \eta(\rho v \cdot dA) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} \eta(\rho dV) \quad (\text{I.14})$$

Sendo  $N$  é uma propriedade extensiva do fluido. Entende-se por propriedade extensiva como a propriedade de uma substância cuja medida depende da quantidade de substância presente.  $\eta$  é a distribuição de  $N$  por unidade de massa.

O sistema sempre mantém a mesma quantidade de matéria, (SHAMES, 1995) pelo que, a propriedade extensiva  $N$  é para este caso a massa, cuja variação no tempo será nula e é expressa na equação (I.14)

$$\frac{DM}{Dt} = 0 = \oint_{S.C} m(\rho v \cdot dA) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} m(\rho dV) \quad (\text{I.15})$$

Para interpretar a equação (I.14) com maior simplicidade, pode-se reescrevê-la da forma da equação (I.15).

$$-\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} \eta(\rho dV) = \oint_{S.C} \eta(\rho v \cdot dA) \quad (\text{I.16})$$

O termo esquerdo da equação (I.15) representa a variação do volume de controle e o termo direito, a diferença de escoamentos de entrada e saída do volume de controle. A equação (I.15) é chamada de equação de continuidade e é integrada em todo o volume deformável com comprimento L.

$$\frac{d}{dx} \left( \int_0^L \rho A(x) dx \right) = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{saí} \quad (I.17)$$

$$\text{Sendo; } m = \int_0^L \bar{\rho}(p) A(x) dx = \bar{\rho}(p) V$$

V é o volume total do volume de controle (considerado como constante), e A(x) é a área seccional do volume de controle. A equação é reescrita da forma

$$\dot{m} = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{saí} \quad (I.18)$$

A densidade no poço não será constante, mas será aproximada à densidade media a qual dependera das variações da pressão no poço.

$$\bar{\rho}(p) = \frac{1}{V} \int_0^L \rho(x, p) A(x) dx \quad (I.19)$$

A parte esquerda da equação (I.18) pode ser expressa como

$$\dot{m} = \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\rho}(p) V}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\rho}(p)}{\partial t} V + \bar{\rho}(p) \frac{\partial V}{\partial t} \quad (I.20)$$

Inserindo o modulo de compressibilidade na equação (I.20).

$$\dot{m} = \bar{\rho}(p) \frac{V}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \bar{\rho}(p) \frac{\partial V}{\partial t} = \rho \left( \frac{V}{\beta} \dot{p} + \dot{V} \right) \quad (I.21)$$

A equação (I.21) é expressão é inserida na equação (I.18).

$$\bar{\rho}(p) \left( \frac{V}{\beta} \dot{p} + \dot{V} \right) = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{saí} \quad (I.22)$$

Reorganizando a equação (I.22)

$$\left(\dot{p} \frac{V}{\beta} + \dot{V}\right) = \frac{1}{\bar{\rho}(p)} (\Sigma \dot{m}_{ent} - \Sigma \dot{m}_{saí}) \quad (\text{I.23})$$

Finalmente, com  $\frac{1}{\bar{\rho}(p)} (\Sigma \dot{m}_{ent}) = \Sigma q_{ent}$  e  $\frac{1}{\bar{\rho}(p)} (\Sigma \dot{m}_{saí}) = \Sigma q_{saí}$ . Obtém-se a equação (I.24)

$$\left(\dot{p} \frac{V}{\beta} + \dot{V}\right) = \Sigma q_{ent} - \Sigma q_{saí} \quad (\text{I.24})$$

Este resultado será aplicado para os dois volumes de controle propostos na Figura 3.1. O primeiro volume de controle é secção coluna de perfuração do poço. (A parte esquerda da Figura 3.1) Na parte superior o fluido de perfuração será bombeado com  $q_p$  dentro da coluna de perfuração com uma pressão de  $P_p$ . O tubo de perfuração tem um comprimento de  $L_c$  e um raio interno e externo  $r_{ci}$  e  $r_{co}$  respectivamente, além de um volume  $V_c$ . No fundo do volume de controle esta localizada a broca, cujo fluido passa através dela e é denotada como  $q_b$ . A equação diferencial de dito subsistema resulta na equação (I.25)

$$\frac{V_c}{\beta} \dot{P}_p = q_p - q_b - \dot{V}_c \quad (\text{I.25})$$

O segundo volume de controle é a região anular diferenciando-se por apresentar mais entradas, como o fluxo da broca, possíveis influxos a traves do reservatório e a vazão produz pela bomba de contra pressão. A saída do subsistema anular é o fluxo da válvula de estrangulamento. A região anular tem um comprimento de  $L_a$ , radio  $r_a$  e volume  $V_a$ .

$$\frac{V_a}{\beta} \dot{P}_e = q_b + q_{res} + q_c - q_e - \dot{V}_a \quad (\text{I.26})$$

#### I.4 EQUAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

O enunciado fundamental da lei de Newton para uma referência inercial é dado, em termos da quantidade de movimento, pela equação (I.27).

$$dF = \frac{D}{Dt}(dmv) \quad (\text{I.27})$$

Considere-se agora um sistema de fluido finito em escoamento que se deve integrar para toda a massa a fim de obter a força global que atua sobre o sistema. (SHAMES, 1995)

$$F_R = \int_M \frac{D}{Dt}(vdm) \quad (\text{I.28})$$

Sendo  $F_R$  é a força resultante que age sobre o sistema com o limite fixo  $M$  (a massa total do sistema). Podemos inverter a ordem da diferenciação e integração na relação acima, para obter a equação (I.29).

$$F_R = \frac{D}{Dt} \int_M (vdm) = \frac{DP}{Dt} \quad (\text{I.29})$$

Sendo  $P$  a quantidade de movimento total do sistema. Logo, substituindo  $N$  por  $P$  como propriedade extensiva na equação (I.13).

$$\frac{DP}{Dt} = \oint_{s.c} v(\rho v \cdot dA) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c} v(\rho dV) \quad (\text{I.30})$$

A parte esquerda da equação (I.30) é a somatória de forças que agem sobre o sistema e o primeiro termo da parte direita é a soma das variações de quantidade de movimento entrada e saída do volume de controle.

$$\Sigma F = \frac{\partial}{\partial t} (\int v_s \rho dV) + \Sigma(\dot{m} v_s)_{saí} + \Sigma(\dot{m} v_s)_{ent} \quad (\text{I.31})$$

Sendo  $V_s$  o vetor que descreve a velocidade do fluido em coordenadas cartesianas. Aplicando a equação (I.31) para um volume infinitesimal obteve-se a equação (I.32).

$$\Sigma F = \rho \frac{\partial v_s}{\partial t} A(x) dx \quad (I.32)$$

As forças atuando sobre o fluido.

$$\Sigma F = F_{sup} + F_{grav} \quad (I.33)$$

A grandeza da força da gravidade que age sobre o corpo dependerá do ângulo entre o ângulo da coluna de perfuração e a força da gravidade (SHAMES, 1995). Assume-se que a coluna é vertical e paralela à força da gravidade.

$$F_{grav} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (I.34)$$

A segunda força considerada é produz pelos esforços de viscosidade feitos na superfície do volume de controle. Estas forças superficiais são a soma de pressão hidrostática e a força de atrito devido ao movimento (SHAMES, 1995).

$$F_{sup} = -A \frac{\partial p}{\partial x} dx - \frac{\partial F_a}{\partial x} dx \quad (I.35)$$

Inserindo a equação (I.34) e (I.35) na equação (I.32)

$$\rho \frac{\partial v_s}{\partial t} A(x) dx = -\frac{\partial p}{\partial x} A(x) dx - \frac{\partial F_a}{\partial x} dx + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} A(x) dx \quad (I.36)$$

$$\rho \frac{\partial v_s}{\partial t} dx = -\partial p - \frac{1}{A(x)} \frac{\partial F_a}{\partial x} dx + \rho g \partial h \quad (I.37)$$

Esta é uma forma reduzida da equação do poço, Navier Stokes. A equação (I.37) é reduzida para uma direção do fluxo:  $v_s = \frac{dx}{dt}$  (vertical). A equação diferencial é integrada em todo o volume de controle de comprimento  $L$ .

$$\int_0^L \frac{\rho}{A(x)} dx \frac{dq}{dt} = - \int_{p(0)}^{p(L)} \partial p - \int_0^L \frac{1}{A(x)} \frac{\partial F_a}{\partial x} dx + \int_{h(0)}^{h(L)} \rho g \partial h \quad (\text{I.38})$$

$$\int_0^L \frac{\rho}{A(x)} dx \frac{dq}{dt} = p(0) - p(L) - \int_0^L \frac{1}{A(x)} \frac{\partial F_a}{\partial x} dx + \rho g [h(L) - h(0)] \quad (\text{I.39})$$

A expressão  $\frac{\partial F_a}{\partial x}$  escrita na equação (I.12) é inserida na equação (I.39).

$$\int_0^L \frac{\rho}{A(x)} dx \frac{dq}{dt} = p(0) - p(L) - \int_0^L \frac{1}{A(x)} \frac{1}{4} f S(x) \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{A(x)} \right)^2 + \frac{\partial k}{\partial x} A(x) \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{A(x)} \right)^2 dx + \rho g [h(L) - h(0)] \quad (\text{I.40})$$

A equação pode ser reescrita como segue:

$$\int_0^L \frac{\rho}{A(x)} dx \frac{dq}{dt} = p(0) - p(L) - F q^2 + \rho g [h(L) - h(0)] \quad (\text{I.41})$$

Sendo  $F$  é igual a  $\frac{\rho}{2} \left[ \int_0^L \frac{\partial k}{\partial x} \frac{1}{A(x)} dx + \int_0^L \frac{1}{4} \frac{S(x)}{A(x)^3} dx \right]$

A equação é integrada em todo o volume de controle de comprimento  $L$ . Como foi dito, no análise são considerados os dois volumes de controle por separado. Se o volume de controle considerado é o anular, o termo esquerdo da equação (I.41) pode ser descrito como a equação (I.42).

$$\int_0^{La} \frac{\rho}{A_a(x)} dx \frac{dq}{dt} = M_a \dot{q}_a \quad (\text{I.42})$$

Esta expressão é inserida na equação (I.41) junto com a pressão da válvula de estrangulamento, a pressão da broca e a profundidade do poço. O fluxo a traves da região anular consistirá no fluxo a traves da broca e o influxo feito pelo reservatório.

$$q_a = q_b + q_{res}. \quad (I.43)$$

$$M_a \dot{q}_a = P_b - P_e - F_a (q_b + q_{res})^2 - \rho_a g h_b \quad (I.44)$$

Reorganizando a equação (I.44) e inserindo a equação (I.43) em (I.44) obtém-se a expressão da pressão no fundo do poço

$$P_b = P_e + F_a (q_b + q_{res})^2 + M_a (\dot{q}_b + \dot{q}_{res}) + \rho_a g h_b \quad (I.45)$$

O mesmo procedimento pode ser feito para a secção da coluna de perfuração. O lado esquerdo da equação (I.41) é representado

$$\int_0^{L_c} \frac{\rho}{A_c(x)} dx \frac{dq}{dt} = M_c \dot{q}_c \quad (I.46)$$

Utiliza-se a equação (I.41) novamente inserindo a pressão da bomba de lama, a pressão na broca e a profundidade.

$$M_c \dot{q}_c = P_p - P_b - F_c q_c^2 + \rho_c g h_b \quad (I.47)$$

Sendo  $q_c$  o fluxo a traves da coluna de perfuração, é igual ao fluxo através da broca,  $q_b = q_c$ . Reorganizando a equação para obter a expressão para obter a pressão no fundo do poço.

$$P_b = P_e - F_c q_b^2 - M_c \dot{q}_b + \rho_c g h_b \quad (I.48)$$

Somando as equações (I.45) e (I.48) obtém-se

$$M_a \dot{q}_a + M_c \dot{q}_c = P_b - P_e - F_a(q_b + q_{res})^2 - \rho_a g h_b + P_p - P_b - F_c q_c^2 + \rho_c g h_b \quad (\text{I.49})$$

Definindo  $M = M_a + M_d$ .

$$M \dot{q}_b = P_p - P_e - F_a(q_b + q_{res})^2 - F_c q_b^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_b \quad (\text{I.50})$$

A equação (I.45) e (I.50) são combinadas.  $q_{res}$  é assumido como um parâmetro que varia lentamente no tempo é por isso que  $\dot{q}_b = 0$ .

$$P_b = P_e + F_a(q_b + q_{res})^2 + M_a(\dot{q}_b + \dot{q}_{res}) + \rho_a g h_b \quad (\text{I.51})$$

A inserção da equação (I.50) na equação (I.51).

$$P_b = \frac{M_a}{M} [P_p - P_e - F_a(q_b + q_{res})^2 + (\rho_c - \rho_a) g h_b - F_c q_b^2] + \rho_a g h_b + P_e + F_a(q_b + q_{res})^2 \quad (\text{I.52})$$

Reorganizando

$$P_b = \frac{M_c}{M} P_e + \frac{M_a}{M} P_p + \frac{M_c}{M} F_a(q_b + q_{res})^2 - \frac{M_a}{M} F_c q_b^2 + \left( \frac{M_a}{M} \rho_c - \frac{M_c}{M} \rho_a \right) g h_b \quad (\text{I.53})$$

## APÊNDICE A - Linearização do Modelo do Processo de Perfuração

O modelo de equações diferenciais do sistema de perfuração pode ser linearizado expandindo as equações em séries de Taylor em torno do ponto estacionário. O modelo do sistema de perfuração proposto neste trabalho possui uma equação diferencial uma referente à pressão no fundo do poço.

Neste anexo é apresentado o modelo linearizado do sistema de perfuração. A fim de simplificar a notação e facilitar a leitura do trabalho, define-se que  $\bar{X}$  é o valor da variável  $X$  no estado estacionário. (PINTO, 2009)

O comportamento da pressão durante a perfuração no fundo do poço é representado pela equação (I.53) do ANEXO I.

$$P_b = \frac{M_c}{M} P_e + \frac{M_a}{M} P_p + \frac{M_c}{M} F_a (q_b + q_{res})^2 - \frac{M_a}{M} F_c q_b^2 + \left( \frac{M_a}{M} \rho_c - \frac{M_c}{M} \rho_a \right) g h_b$$

Para este trabalho, nota-se que a equação (I.53) apresenta três variáveis dinâmicas, ou seja, que variam com o tempo.

$$\dot{P}_p = \frac{\beta}{v_D} (q_p - q_b - \dot{V}_c)$$

$$\dot{P}_e = \frac{\beta}{v_A} (q_b + q_{res} + q_c - q_e - \dot{V}_A)$$

$$\dot{q}_b = \frac{1}{M} \left[ P_p - P_e - F_a (q_b + q_{res})^2 - F_c q_b^2 + (\rho_c - \rho_a) g h_b \right]$$

Assim, a Equação (I.53) deve ser diferenciada por estas variáveis (Equações I.25, I.26 e I.50). Expandindo  $P_p$  em uma série de Taylor de primeira ordem:

$$P_b = \bar{P}_b + \frac{\partial P_b}{\partial P_p} (P_p - \bar{P}_p) + \frac{\partial P_b}{\partial P_e} (P_e - \bar{P}_e) + \frac{\partial P_b}{\partial q_b} (q_b - \bar{q}_b) \quad (\text{A.1})$$

Como  $\dot{P}_p = \dot{P}_p(q_b, q_p)$ , deve-se fazer a diferenciação de  $\dot{P}_p$  com relação a esses parâmetros. Assim, expandindo  $P_p$  em uma série de Taylor de primeira ordem:

$$\frac{\partial P_p}{\partial t} = \dot{P}_p = \bar{P}_p + \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} (q_b - \bar{q}_b) + \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} (q_b - \bar{q}_b) \quad (\text{A.2})$$

Como  $\dot{P}_e = \dot{P}_e (q_b, q_{res}, u)$ , deve-se fazer a diferenciação de  $\dot{P}_p$  com relação a esses parâmetros. Assim, expandindo  $\dot{P}_e$  em uma série de Taylor de primeira ordem:

$$\frac{\partial P_e}{\partial t} = \dot{P}_e = \bar{P}_e + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} (q_b - \bar{q}_b) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} (q_{res} - \bar{q}_{res}) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} (u - \bar{u}) \quad (\text{A.3})$$

Como  $\dot{P}_e = \dot{P}_e (P_p, P_e, q_b, q_{res}, h_b)$ , deve-se fazer a diferenciação de  $\dot{q}_b$  com relação a esses parâmetros. Assim, expandindo  $\dot{P}_e$  em uma série de Taylor de primeira ordem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_b}{\partial t} = \dot{q}_b = \bar{q}_b + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_p} (P_p - \bar{P}_p) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_e} (P_e - \bar{P}_e) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_b} (q_b - \bar{q}_b) + \\ \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_{res}} (q_{res} - \bar{q}_{res}) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial h_b} (h_b - \bar{h}_b) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Aplicando a Transformada de Laplace às equações (A.1), (A.2), (A.3) e (A.4) obtêm-se as equações (A.5), (A.6), (A.7) e (A.8).

$$P_b(s) = \frac{\partial P_b}{\partial P_p} P_p(s) + \frac{\partial P_b}{\partial P_e} P_e(s) + \frac{\partial P_b}{\partial q_b} q_b(s) \quad (\text{A.5})$$

$$s \cdot P_p(s) = \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} q_p(s) \quad (\text{A.6})$$

$$s \cdot P_e(s) = \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} q_{res}(s) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} u(s) \quad (\text{A.7})$$

$$s \cdot q_b(s) = \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_p} P_p(s) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial P_e} P_e(s) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial q_{res}} q_{res}(s) + \frac{\partial \dot{q}_b}{\partial h_b} h_b(s) \quad (\text{A.8})$$

Reorganizando a equação (A.6)

$$P_p(s) = \frac{1}{s} \left[ \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} q_p(s) \right] \quad (\text{A.9})$$

Reorganizando a equação (A.7)

$$P_e(s) = \frac{1}{s} \left[ \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} q_{res}(s) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} u(s) \right] \quad (\text{A.10})$$

Substituindo a equação (A.9) e (A.10) em (A.8)

$$\begin{aligned} s \cdot q_b(s) = & \frac{1}{s} \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \left[ \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} q_p(s) \right] + \frac{1}{s} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \left[ \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} q_b(s) + \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} q_{res}(s) + \right. \\ & \left. \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} u(s) \right] + q_b(s) + \frac{\partial q_b}{\partial q_b} \frac{\partial q_b}{\partial q_{res}} q_{res}(s) + \frac{\partial q_b}{\partial h_b} h_b(s) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Reorganizando a equação (A.11) obtém-se a equação (A.12)

$$\begin{aligned} \left( s^2 - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \right) q_b(s) = & \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} q_p(s) + \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} u(s) + \left( s \frac{\partial q_b}{\partial q_{res}} + \right. \\ & \left. \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} \right) q_{res}(s) + s \frac{\partial q_b}{\partial h_b} h_b(s) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Para fins de simplicidade se utiliza o relacionamento (A.13)

$$\left( s^2 - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \right) = X \quad (\text{A.13})$$

Substituindo a equação (A.13) em (A.12) obtém-se a equação (A.14)

$$q_b(s) = \frac{1}{X} \left[ \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} q_p(s) + \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} u(s) + \left[ s \frac{\partial q_b}{\partial q_{res}} + \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} \right] q_{res}(s) + s \frac{\partial q_b}{\partial h_b} h_b(s) \right] \quad (\text{A.14})$$

Substituindo a equação (A.14) na equação (A.9) obtém-se (A.15)

$$\begin{aligned} P_p(s) = & \frac{1}{sX} \left[ \left( s^2 \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} - \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} \right) q_p(s) + \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} u(s) + \right. \\ & \left. \left( s \frac{\partial q_b}{\partial q_{res}} + \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} \right) \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} q_{res}(s) + s \frac{\partial q_b}{\partial h_b} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} h_b(s) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Substituindo a equação (A.14) na equação (A.10) obtém-se (A.16)

$$P_e(s) = \frac{1}{sX} \left\{ \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_p} q_p(s) + \left( \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} s^2 - \frac{\partial q_b}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} s - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \right) u(s) + \left[ s^2 \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} + s \left( \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} + \frac{\partial q_b}{\partial P_{res}} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \right) - \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_{res}} \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \right] q_{res}(s) + s \frac{\partial q_b}{\partial h_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} h_b(s) \right\} \quad (A.16)$$

Substituindo as equações (A.15), (A.16) e (A.14) na equação (A.5) obtém-se (A.17)

$$P_b(s) = \left[ \frac{\partial P_b}{\partial P_p} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} + \frac{\partial P_b}{\partial P_e} \left( s^2 \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \right) + s \frac{\partial P_b}{\partial q_b} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \right] \frac{u(s)}{sX} \quad (A.17)$$

Arranjando a equação (A.17), obtém-se a equação (A.18) sendo esta a função de transferência do sistema de perfuração.

$$\frac{P_b(s)}{u(s)} = \frac{\frac{\partial P_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} s^2 + \left( \frac{\partial P_b}{\partial q_b} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} - \frac{\partial q_b}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial P_b}{\partial P_e} \right) s + \frac{\partial P_b}{\partial P_p} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial u} \frac{\partial P_b}{\partial P_e}}{s \left( s^2 - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial \dot{P}_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial \dot{P}_e}{\partial q_b} \right)} \quad (A.18)$$

## APÊNDICE B – *Scripts* em MATLAB: Ajuste de curvas

```

clear all
clc
h=input('profundidade de perfuração em metros: ');

%Parâmetros
Ba=7000;
Bc=11000;
pa=0.0119;
pc=0.0125;
q_res=0.001;
q_b=0.015;
di=0.134;
de=0.151;
dp=0.29;
Aa=(pi*((dp)^2-(de)^2))/4;
Ac=(pi*(di)^2)/4;
Sxa=2*Aa/(sqrt(Aa/pi));
Sxc=pi*di;
Va=Aa.*h
Vc=Ac.*h
Ma=3.23*pa.*h/Aa
Mc=3.23*pc.*h/Ac
M=Ma+Mc;
f=0.01777;
Fa=(pa.*h/(2*(Aa)^2))*(3+(Sxa*f/(4*Aa)))
Fc=(pc.*h/(2*(Ac)^2))*(2.68+(Sxc*f/(4*Ac)))

%Linearização do Processo
%A
dPpdPp=0; dPpdPe=0; dPpdqb=-Bc/Vc;
dPedPp=0; dPedPe=0; dPedqb=Ba/Va;
dqbdPp=1/M; dqbdPe=-1/M; dqbdqb=-(2/M)*(Fc*q_b+Fa*q_b+Fa*q_res);
%B
dPpdqp=Bc/Vc; dPpdu=0; dPpdqres=0; dPpdh=0;
dPedqp=0; dPedu=Ba/Va; dPedqres=Ba/Va; dPedh=0;
dqbdqp=0; dqbddu=0; dqbdqres=-(2*Fa/M)*(q_res+q_b); dqbdh=(9.81/M)*(pc-pa);
%C
dPbdPp=Ma/M; dPbdPe=Mc/M; dPbdqb=(2/M)*(-Ma*Fc*q_b+Fa*Mc*q_b+Fa*Mc*q_res);
%D
dPbdqp=0; dPbdu=0; dPbdqres=(2*Mc*Fa/M)*(q_b+q_res); dPbdh=(9.81/M)*(Ma*pc-
Mc*pa);

%Processo em equação de estados
A=[dPpdPp dPpdPe dPpdqb;dPedPp dPedPe dPedqb;dqbdPp dqbdPe dqbdqb];
B=[dPpdqp dPpdu dPpdqres dPpdh; dPedqp dPedu dPedqres dPedh;dqbdqp dqbddu
dqbdqres dqbdh];
C=[dPbdPp dPbdPe dPbdqb];
D=[dPbdqp dPbdu dPbdqres dPbdh];
[num1,den1]=ss2tf(A,B,C,D,1);
[num2,den2]=ss2tf(A,B,C,D,2);

%função de transferência do processo
numu=[dPbdPe*dPedu dPbdqb*dqbdPe*dPedu-dPbdPe*dqbdqb*dPedu
dPbdPp*dqbdPe*dPedu*dPpdqb-dPbdPe*dqbdPp*dPpdqb*dPedu];
denu=[1 -dqbdqb -dqbdPp*dPpdqb-dqbdPe*dPedqb 0];
PbsUs=tf(numu,denu)

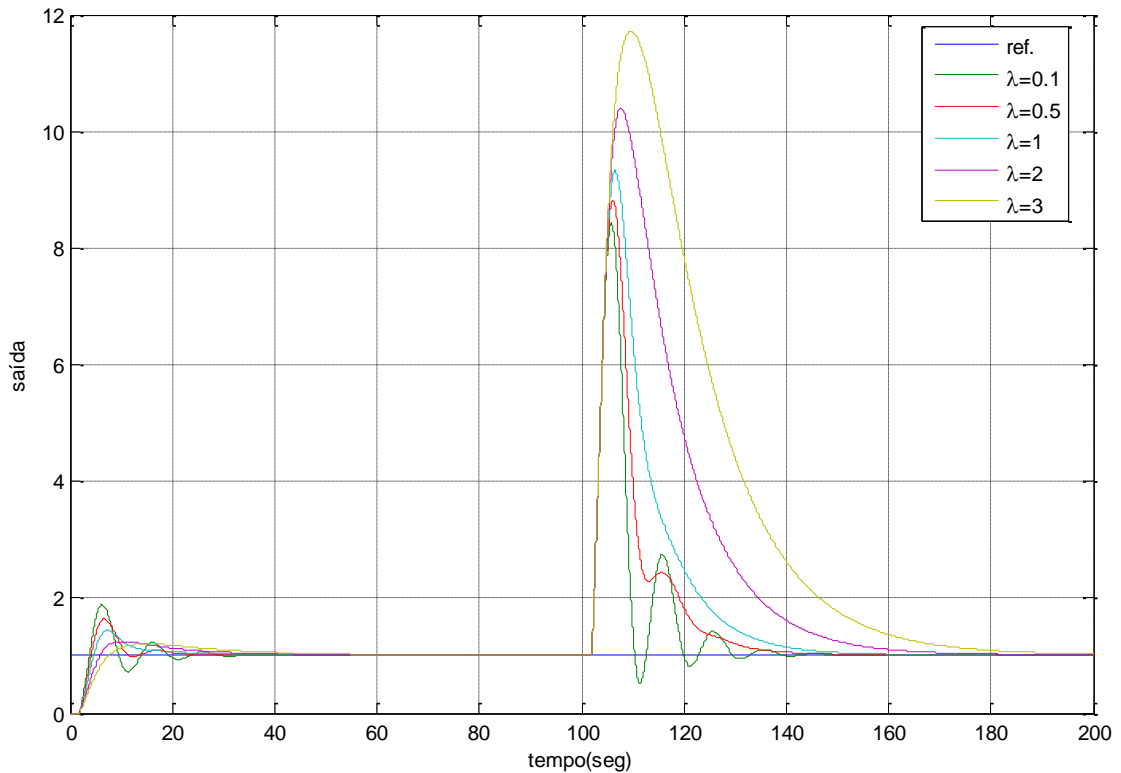
```

```
%Ajuste de curvas
function [fitresult, gof] = createFit1(t, y1)
[xData, yData] = prepareCurveData( t, y1 );
%fittype e opções.
ft = fittype( 'a*((b*(x))-1+(exp(-(x)*b)))', 'independent', 'x',
'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [0.961048886357766 0.101668043005806];
%Ajuste do modelo aos dados.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
%Gráfica do modelo e os dados.
figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, 'y1 vs. t', 'untitled fit 1', 'Location', 'NorthEast' );
xlabel( 't' );
ylabel( 'y1' );
grid on
```

## APÊNDICE C – Análise independente dos Controladores IMC

### C.1 ANÁLISE DO CONTROLE SIMC PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES.

Figura C.1 - Resposta do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 500 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



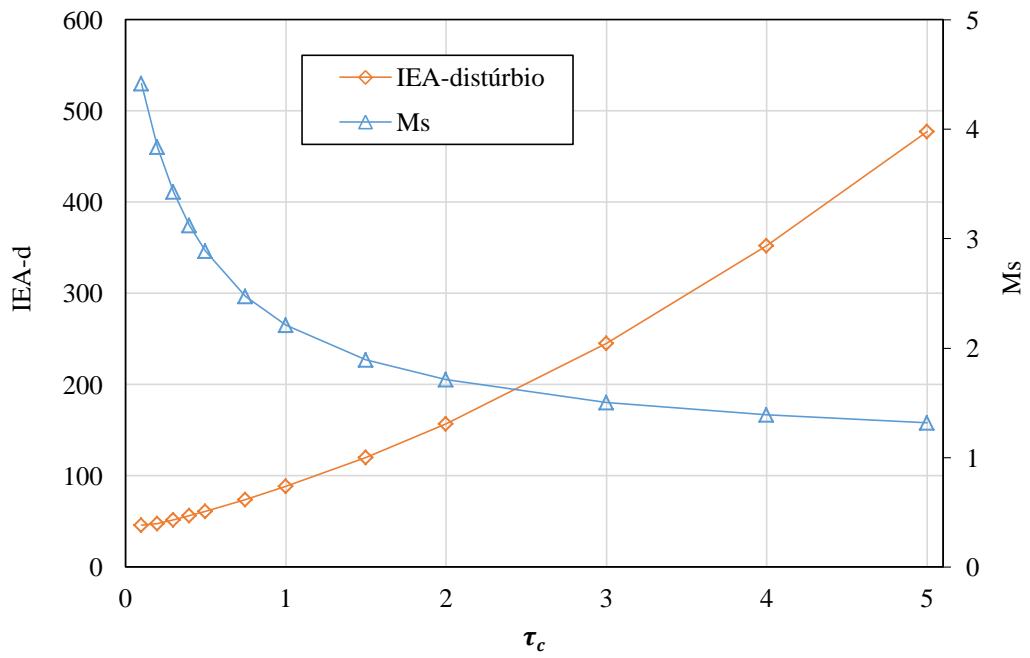
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.1 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 500 metros.

$\tau_c$	Robustez Distúrbio		Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>0,1</b>	4,417	45,901	90,772	1,490	37,408	0,00194	8,4	0,008
<b>0,5</b>	2,885	61,335	66,762	1,760	21,732	0,00163	10,0	0,008
<b>1</b>	2,212	88,313	46,666	2,124	28,521	0,00136	12,0	0,008
<b>2</b>	1,710	157,015	25,622	2,997	39,299	0,00102	16,0	0,008
<b>3</b>	1,504	245,071	20,213	4,123	49,982	0,00082	20,0	0,008

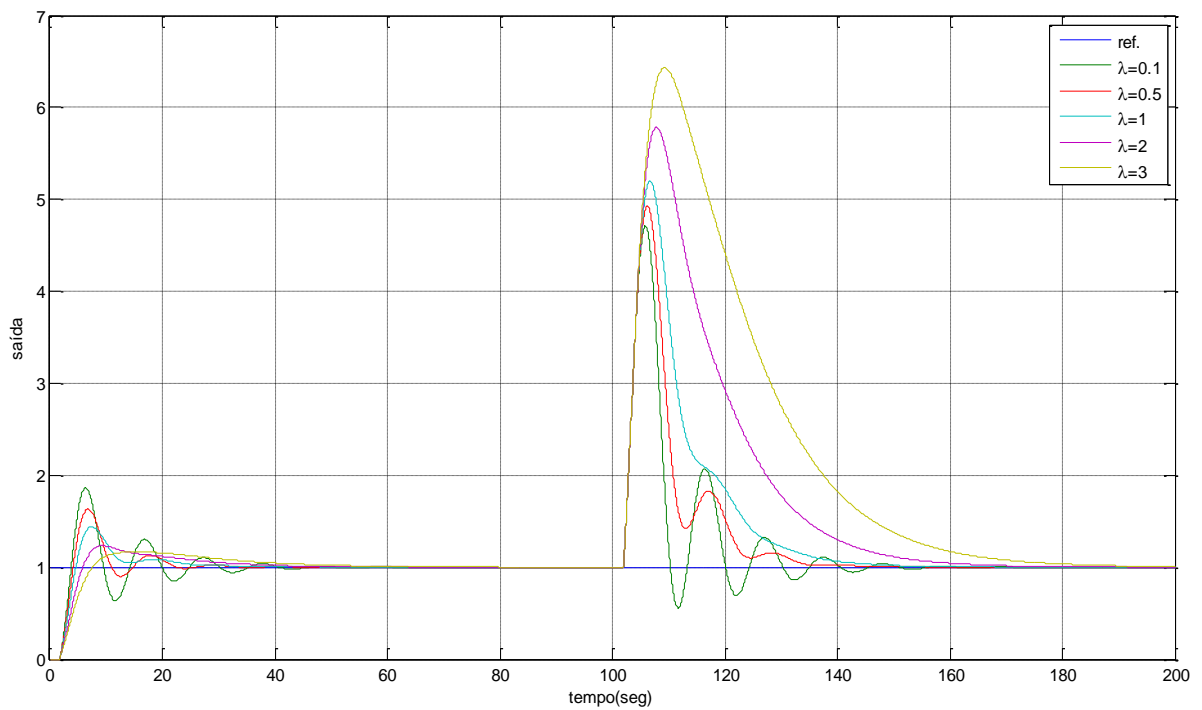
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.2 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 500 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.3 - Resposta do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 1000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



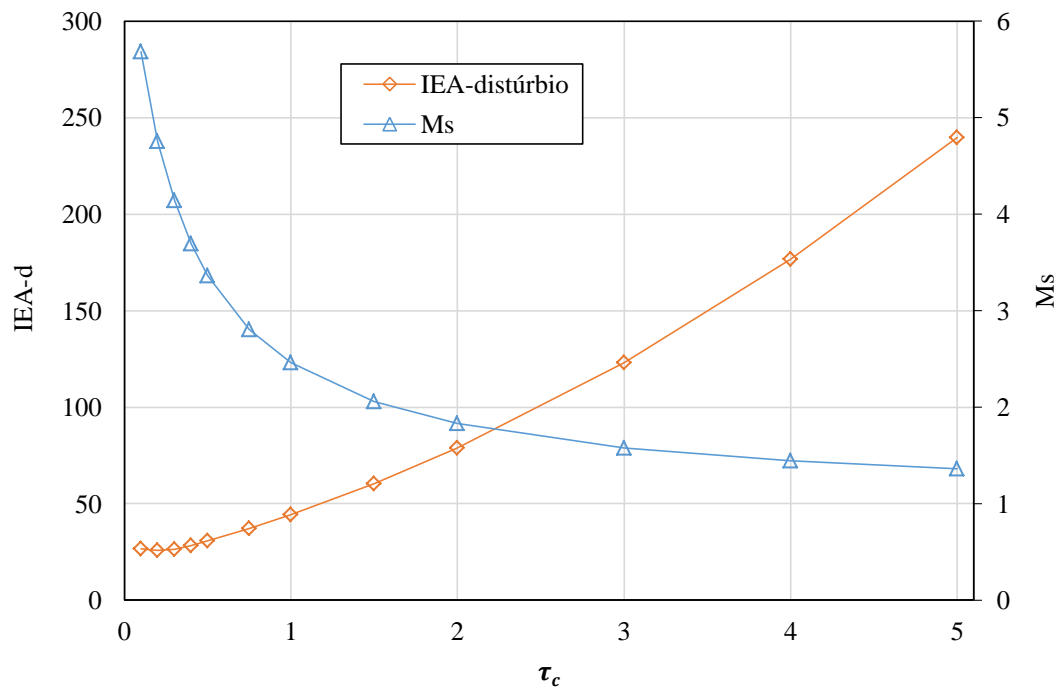
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.2 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 1000 metros.

$\tau_c$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>0,1</b>	5,685	26,538	94,494	1,499	55,741	0,0039	8,4	0,014
<b>0,5</b>	3,363	30,776	70,947	1,776	32,274	0,0032	10,0	0,014
<b>1</b>	2,460	44,314	51,216	2,142	25,781	0,0027	12,0	0,014
<b>2</b>	1,829	78,777	28,831	2,989	40,032	0,002	16,0	0,014
<b>3</b>	1,580	123,064	18,586	4,017	50,667	0,0016	20,0	0,014

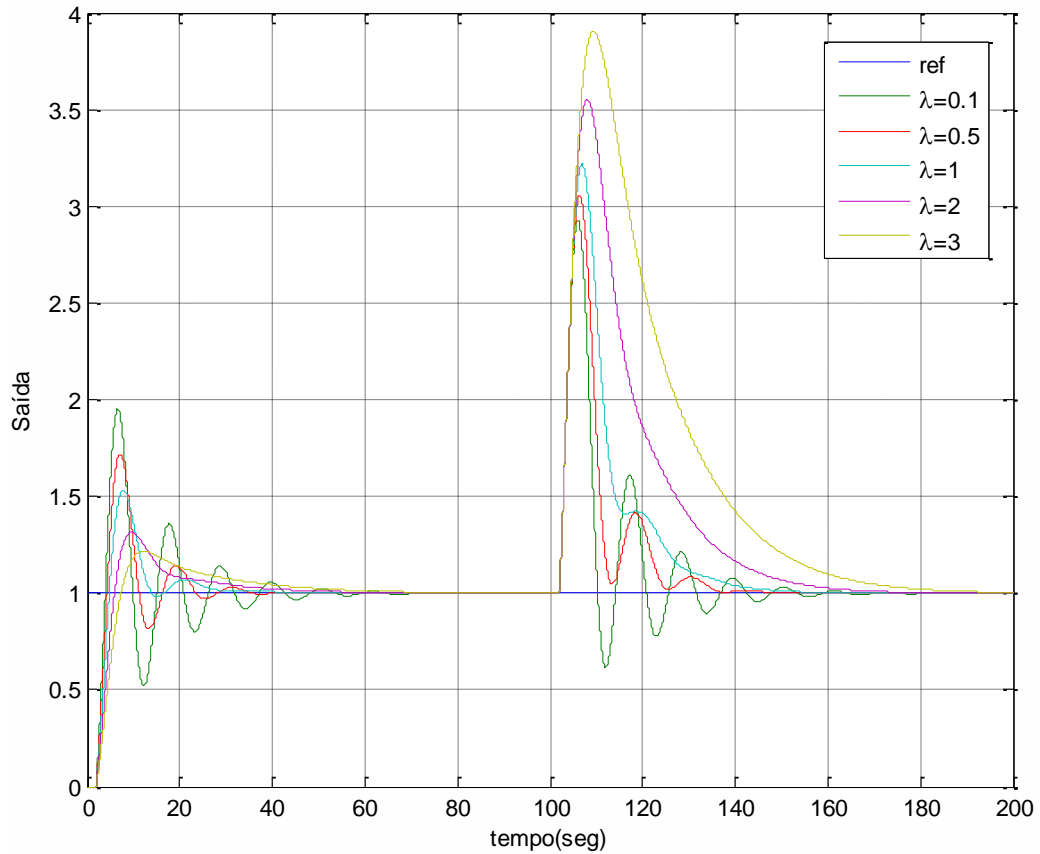
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.4 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 1000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.5 - Resposta do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 2000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



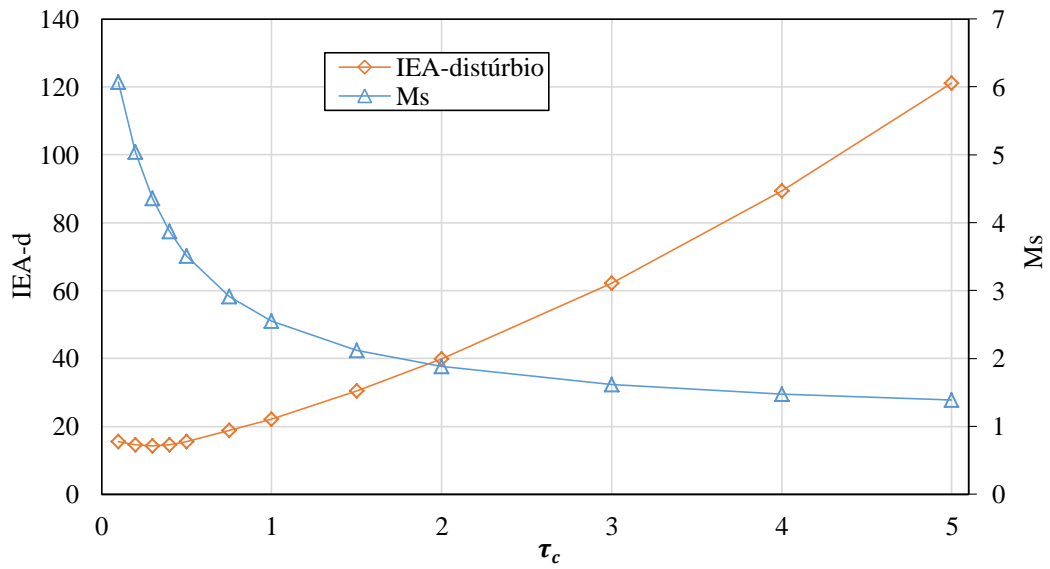
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.3 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 2000 metros.

$\tau_c$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>0,1</b>	6,074	15,470	99,315	1,495	61,774	0,0077	8,4	0,008
<b>0,5</b>	3,514	15,563	75,335	1,762	33,518	0,0064	10,0	0,008
<b>1</b>	2,548	22,136	55,612	2,117	26,462	0,0054	12,0	0,008
<b>2</b>	1,881	39,827	32,987	2,931	42,004	0,004	16,0	0,008
<b>3</b>	1,618	62,190	21,864	3,887	53,501	0,0032	20,0	0,008

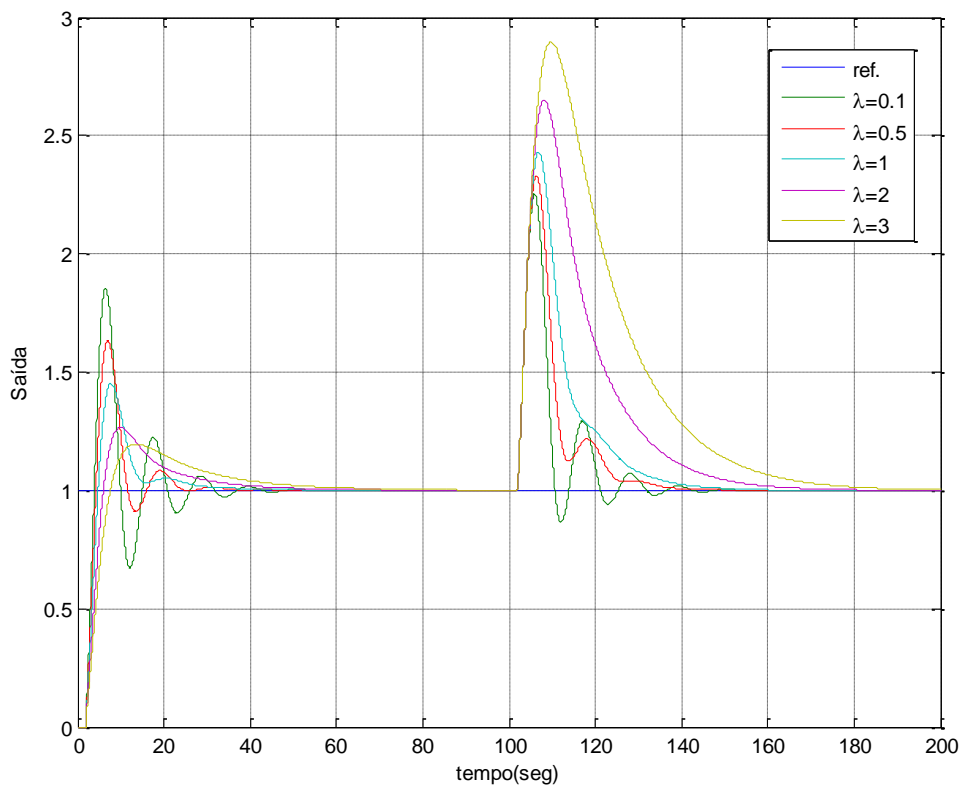
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.6 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 2000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.7 - Resposta do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 3000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



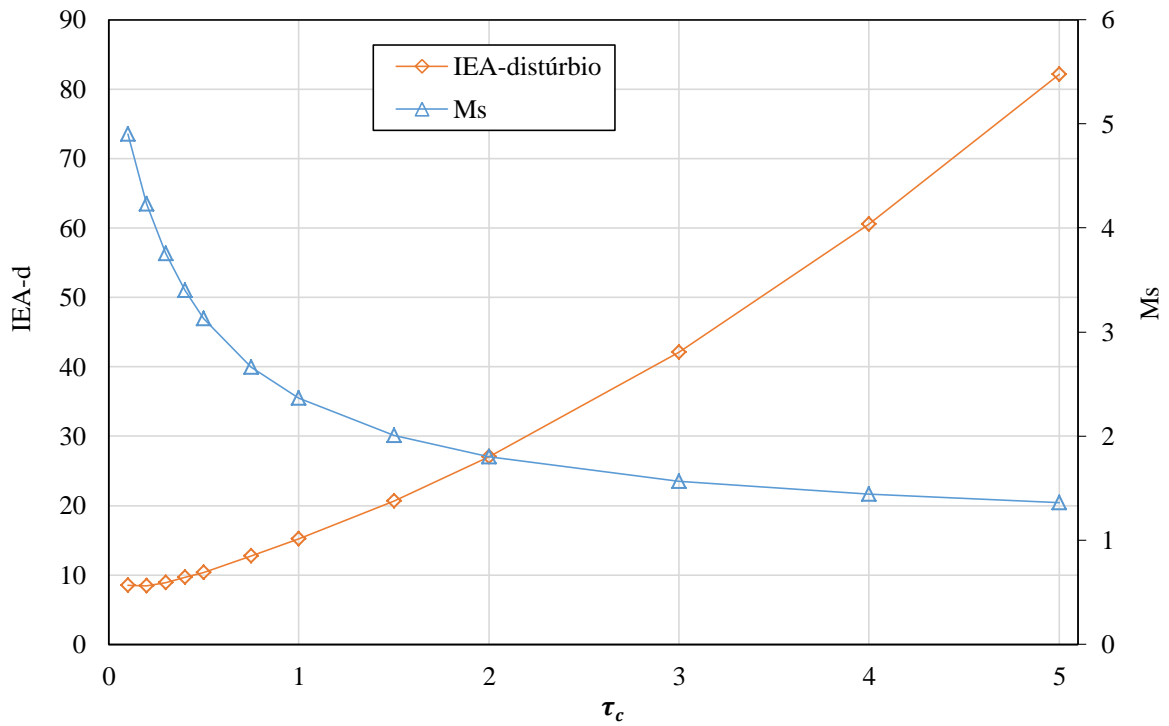
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.4 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 3000 metros.

$\tau_c$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>0,1</b>	4,900	8,486	93,688	1,539	46,849	0,0113	8,40	0,014
<b>0,5</b>	3,132	10,350	70,976	1,820	32,942	0,0095	10,00	0,014
<b>1</b>	2,366	15,164	52,280	2,196	27,368	0,0079	12,00	0,014
<b>2</b>	1,800	27,062	31,695	3,069	39,657	0,0059	16,00	0,014
<b>3</b>	1,568	42,119	22,359	4,095	51,079	0,0048	20,00	0,014

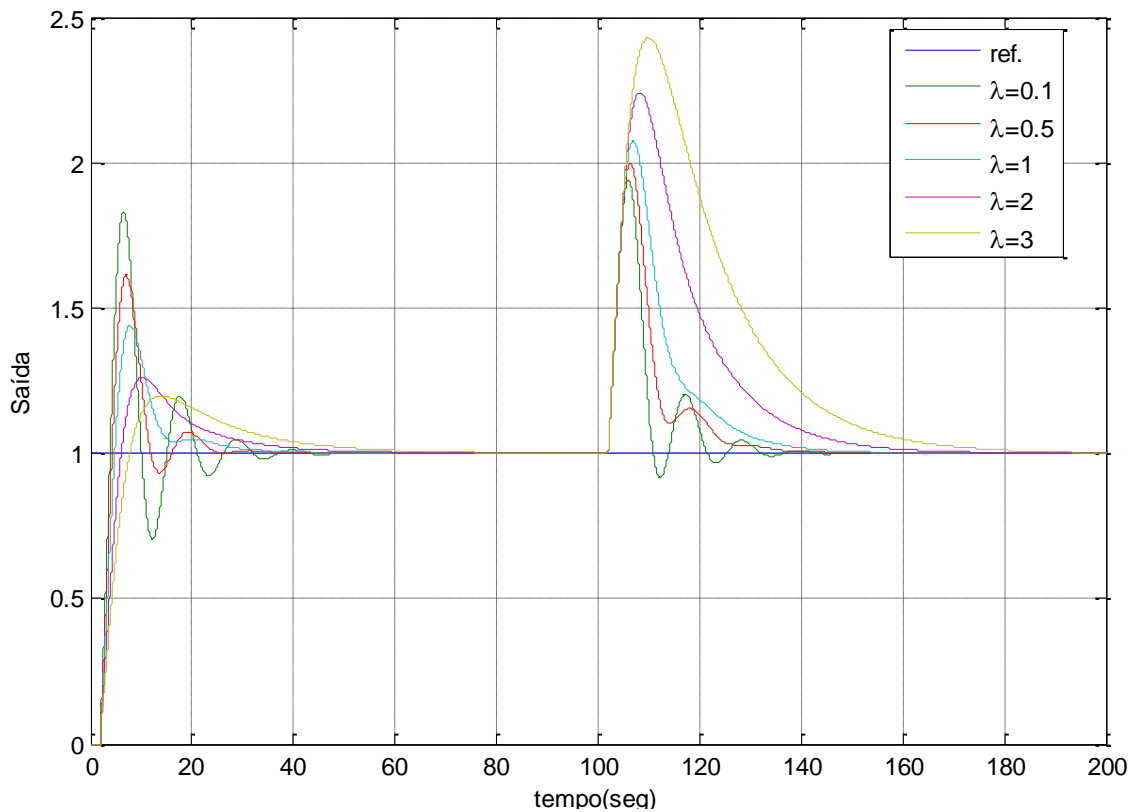
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.8 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 3000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.9 - Resposta do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 4000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



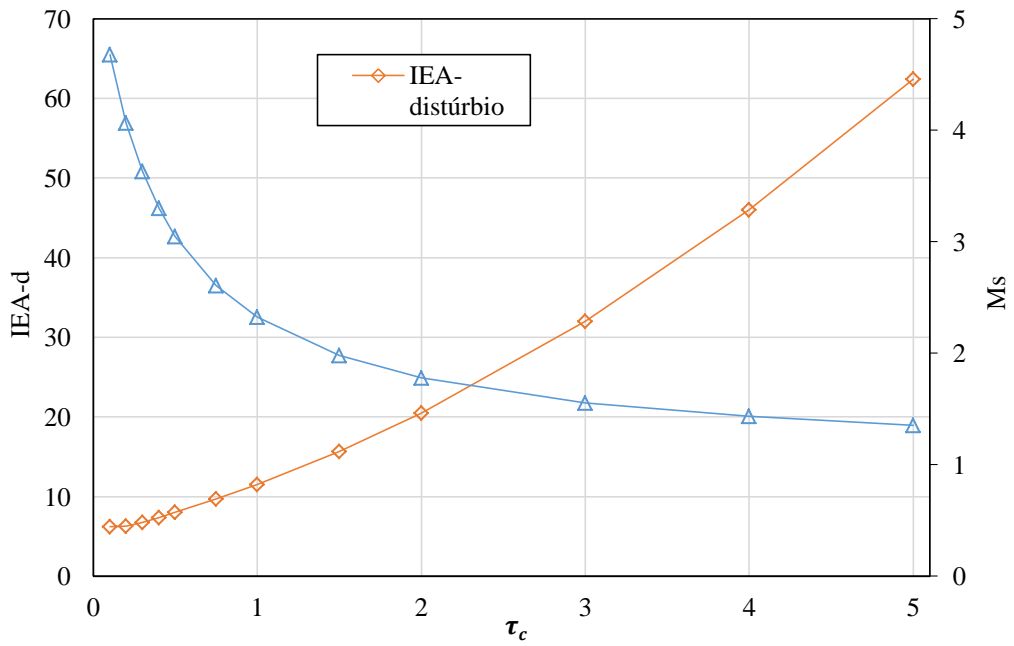
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.5 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 4000 metros.

$\tau_c$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>0,1</b>	4,676	6,221	92,196	1,557	42,322	0,0149	8,40	0,016
<b>0,5</b>	3,049	8,003	69,838	1,842	23,487	0,0125	10,00	0,016
<b>1</b>	2,325	11,522	51,526	2,228	27,576	0,0104	12,00	0,016
<b>2</b>	1,781	20,494	31,521	3,116	38,934	0,0078	16,00	0,016
<b>3</b>	1,556	32,008	22,622	4,163	49,913	0,0063	20,00	0,016

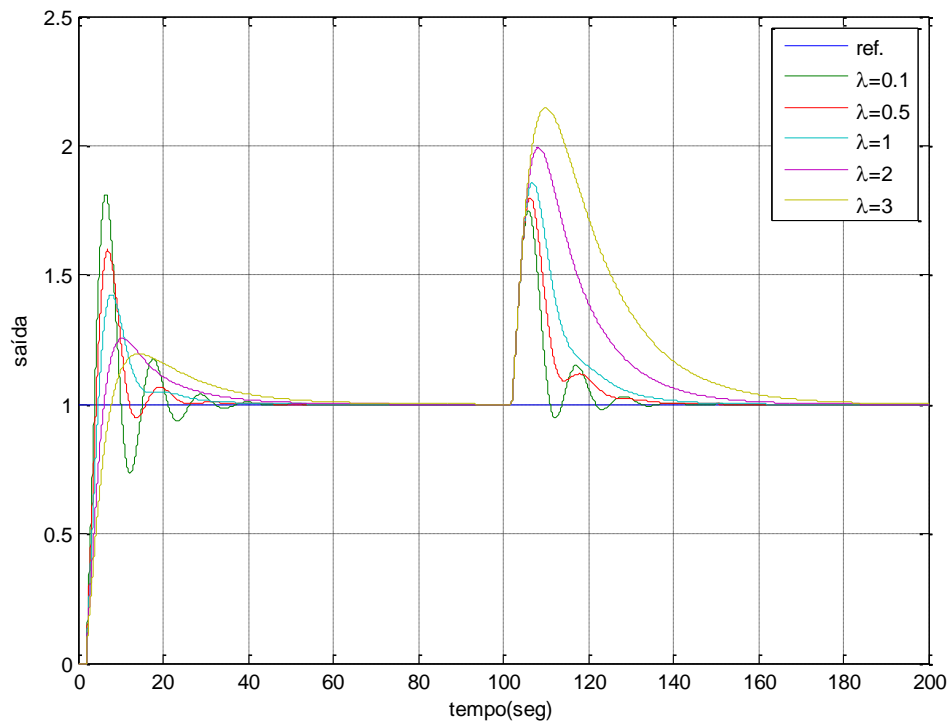
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.10 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 4000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.11 - Resposta do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 5000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



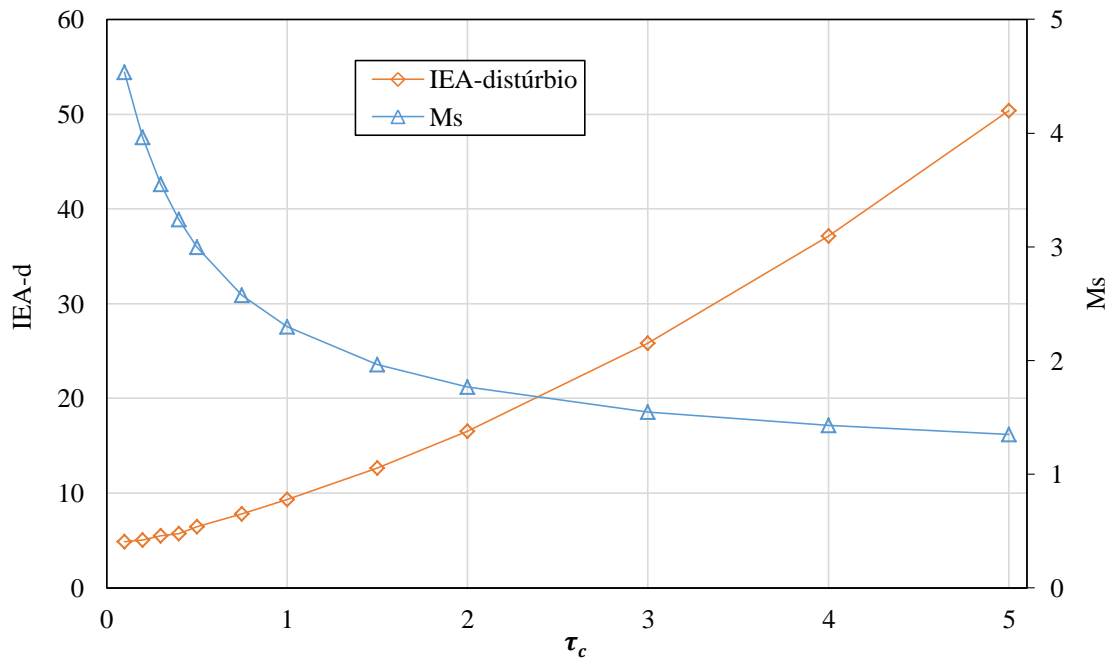
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.6 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 5000 metros.

$\tau_c$	Robustez Distúrbio		Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>0,1</b>	4,537	4,888	91,157	1,568	42,311	0,0184	8,40	0,018
<b>0,5</b>	2,998	6,462	68,991	1,858	23,646	0,0155	10,00	0,018
<b>1</b>	2,299	9,307	50,975	2,249	27,746	0,0129	12,00	0,018
<b>2</b>	1,769	16,542	31,333	3,147	38,736	0,0097	16,00	0,018
<b>3</b>	1,549	25,841	22,727	4,209	49,493	0,0077	20,00	0,018

Fonte: Autoria Própria.

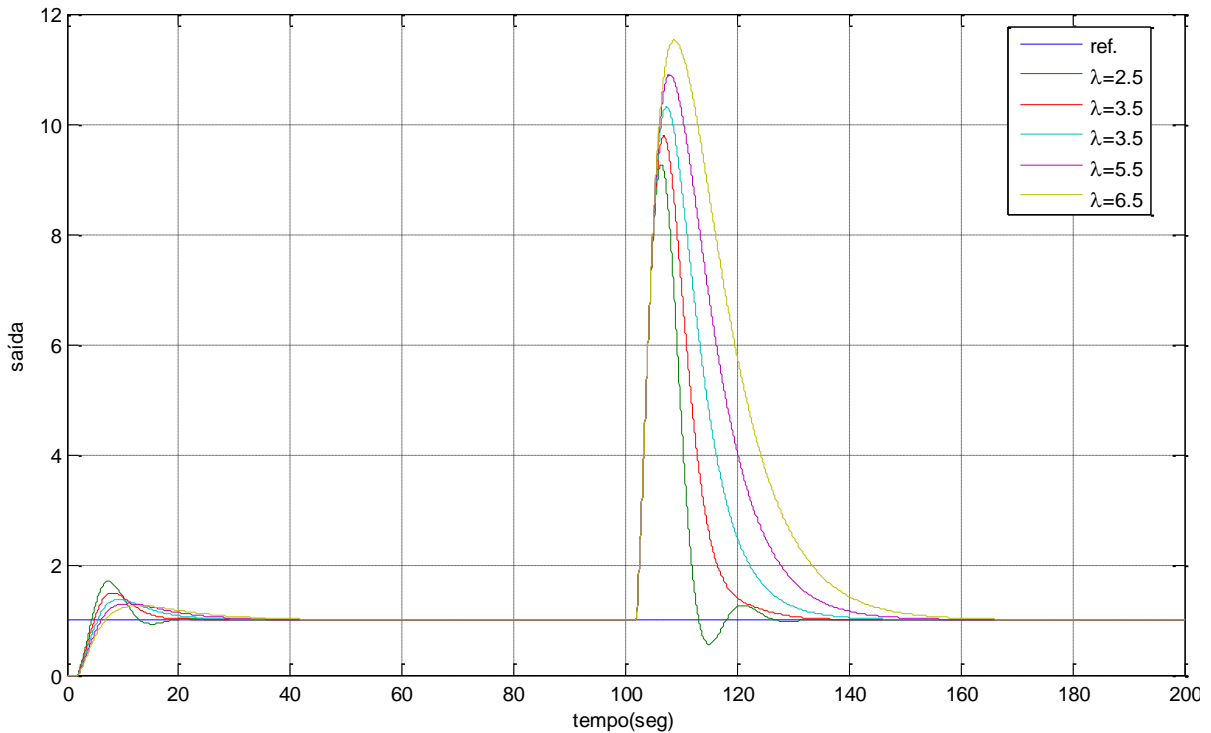
Figura C.12 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por SIMC para diferentes parâmetros  $\tau_c$  na profundidade de 5000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

## C.2 ANÁLISE DO CONTROLE IMC PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES.

Figura C.13 - Resposta do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 500 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



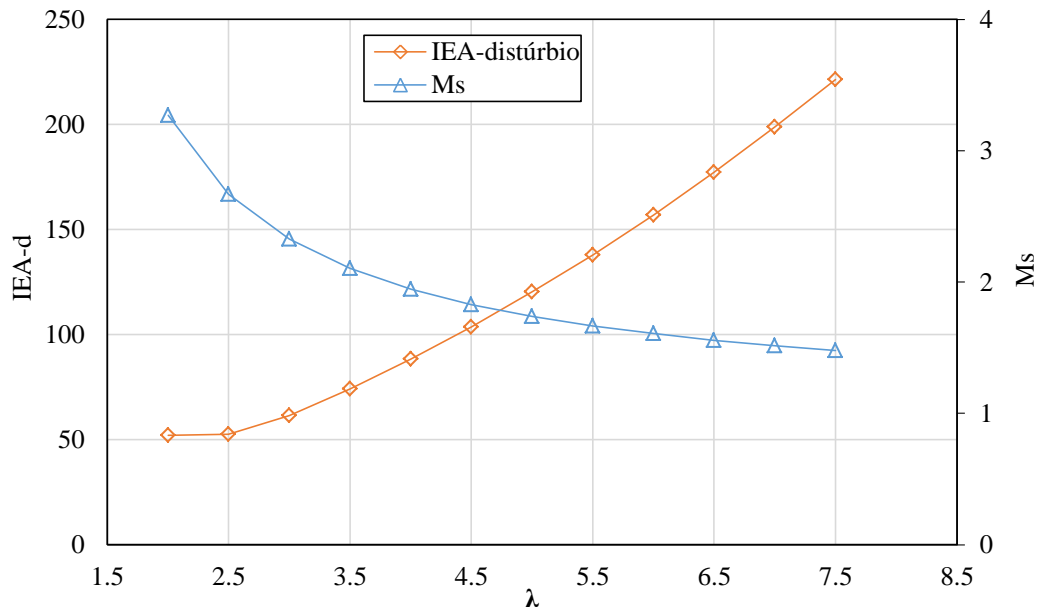
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.7 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 500 metros.

$\lambda$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>2,5</b>	2,671	52,655	69,580	1,924	23,513	0,00141	7,008	0,008
<b>3,5</b>	2,104	74,208	49,260	2,292	19,885	0,00121	9,008	0,008
<b>4,5</b>	1,830	103,602	36,673	2,709	27,412	0,00106	11,008	0,008
<b>5,5</b>	1,667	137,993	29,614	3,179	33,309	0,00094	13,008	0,008
<b>6,5</b>	1,558	177,244	25,911	3,713	39,000	0,00085	15,008	0,008

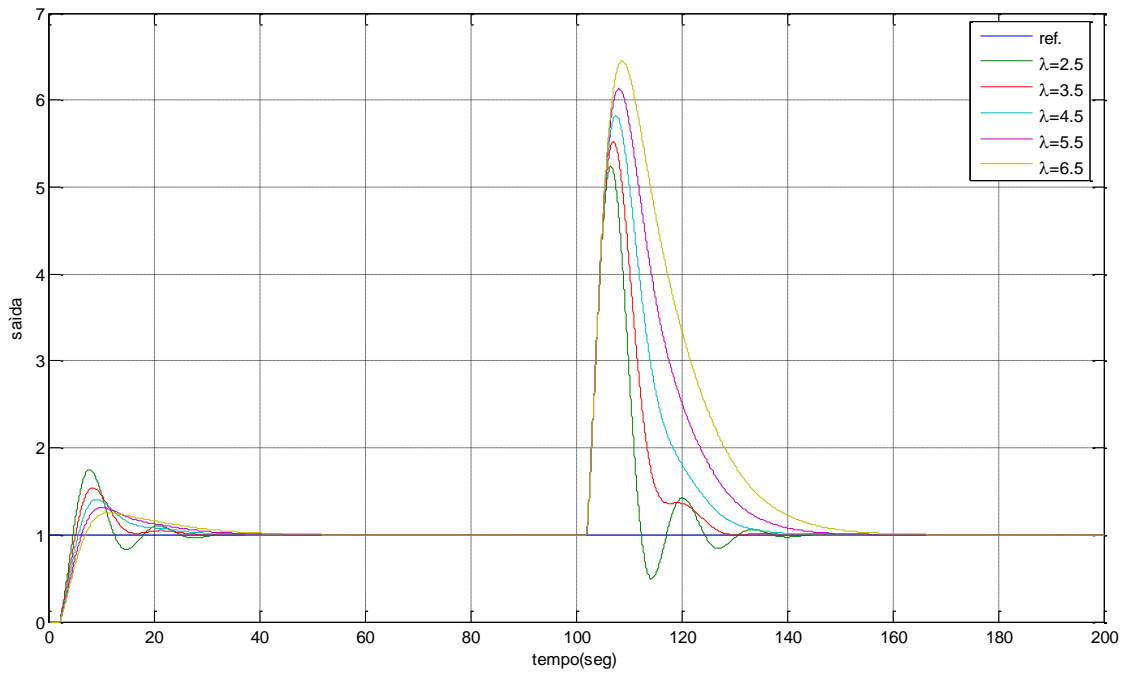
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.14 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 500 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.15 - Resposta do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 1000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



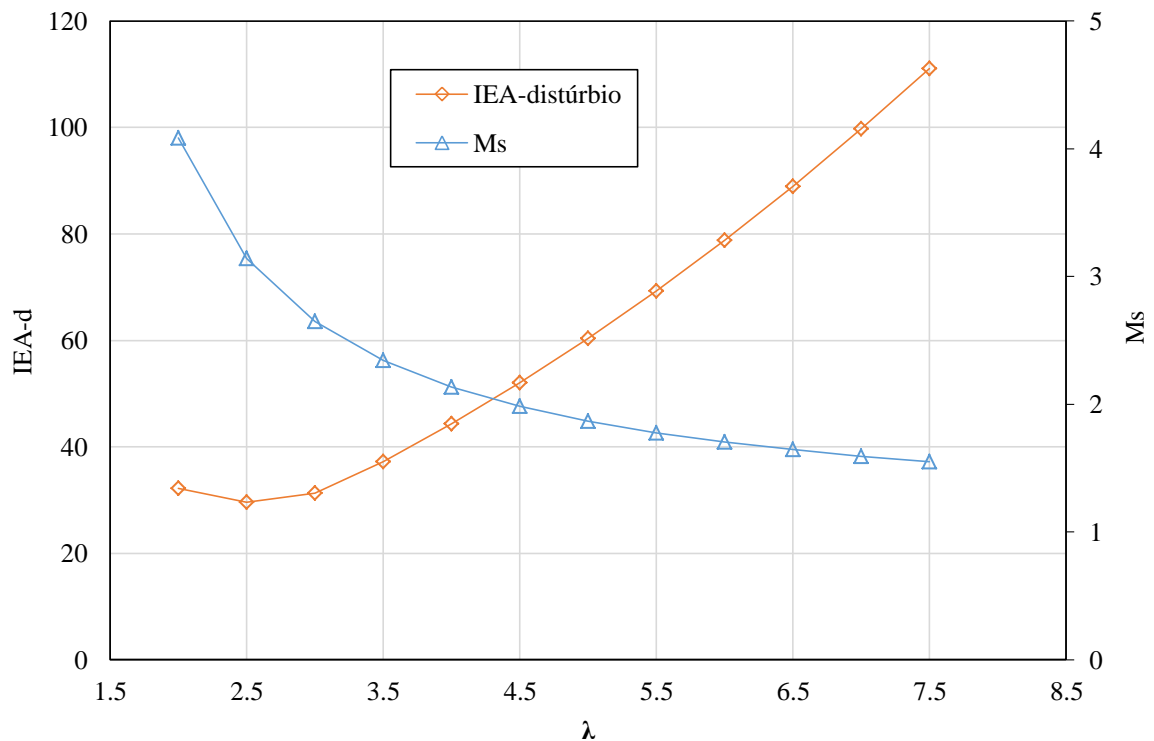
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.8 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 1000 metros.

$\lambda$	Robustez Distúrbio		Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
2,5	3,141	29,561	74,544	1,942	29,788	0,0028	7,014	0,014
3,5	2,342	37,269	54,099	2,308	25,559	0,0024	9,014	0,014
4,5	1,984	52,015	40,603	2,714	29,071	0,0021	11,014	0,014
5,5	1,778	69,245	31,431	3,160	34,558	0,0019	13,014	0,014
6,5	1,645	88,937	25,300	3,654	40,096	0,0017	15,014	0,014

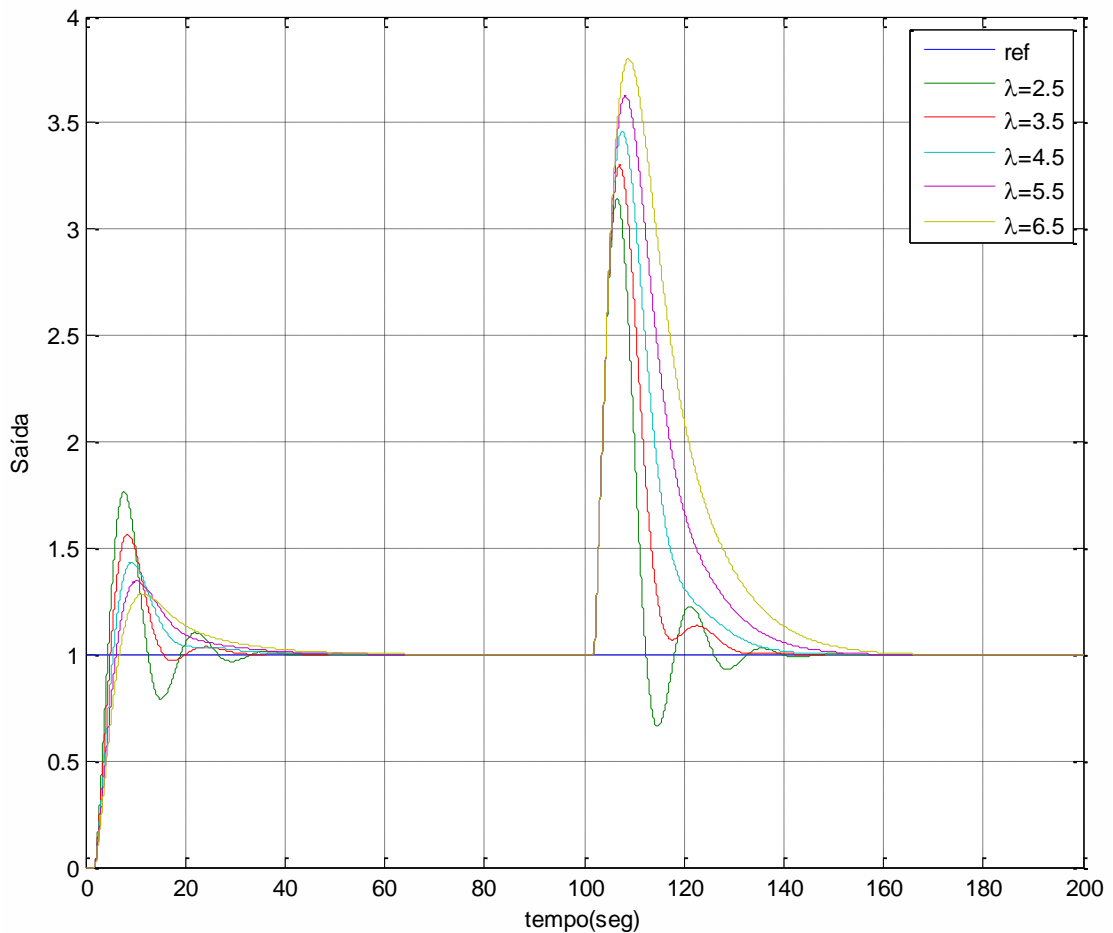
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.16 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 1000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.17 - Resposta do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 2000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



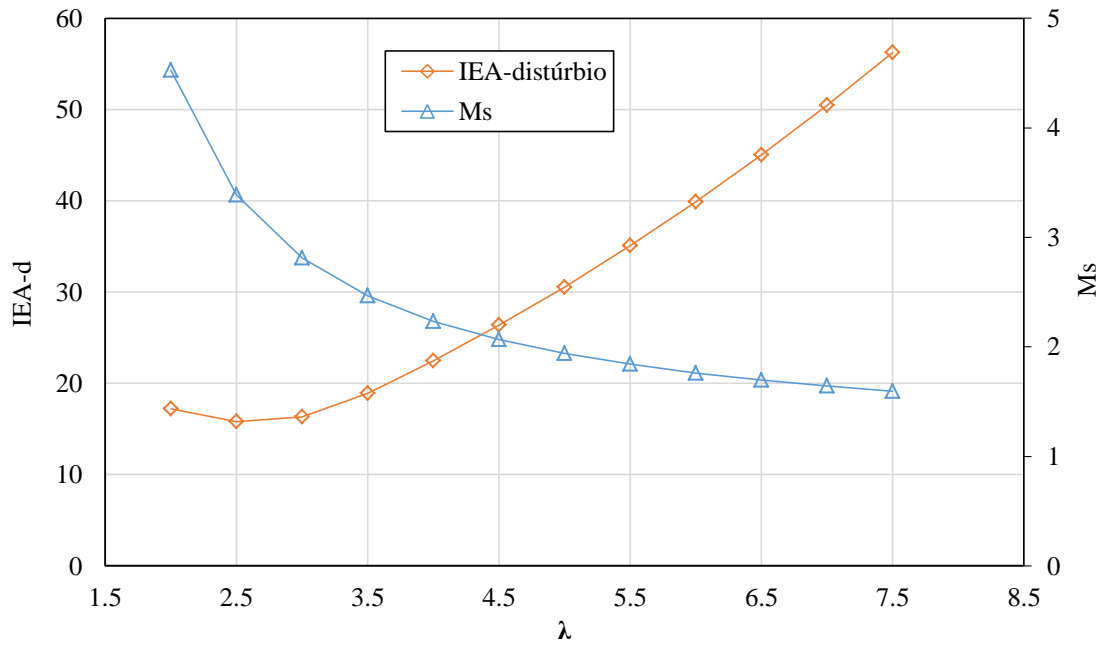
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.9 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 2000 metros.

$\lambda$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>2,5</b>	3,3869	15,798	79,5504	1,9234	37,0553	0,0056	7,008	0,008
<b>3,5</b>	2,4665	18,882	58,7256	2,2795	27,8251	0,0048	9,008	0,008
<b>4,5</b>	2,0669	26,364	45,0323	2,67	31,2575	0,0042	11,008	0,008
<b>5,5</b>	1,8416	35,090	35,6253	3,0947	36,6555	0,0037	13,008	0,008
<b>6,5</b>	1,6965	45,041	29,0278	3,5565	42,5904	0,0033	15,008	0,008

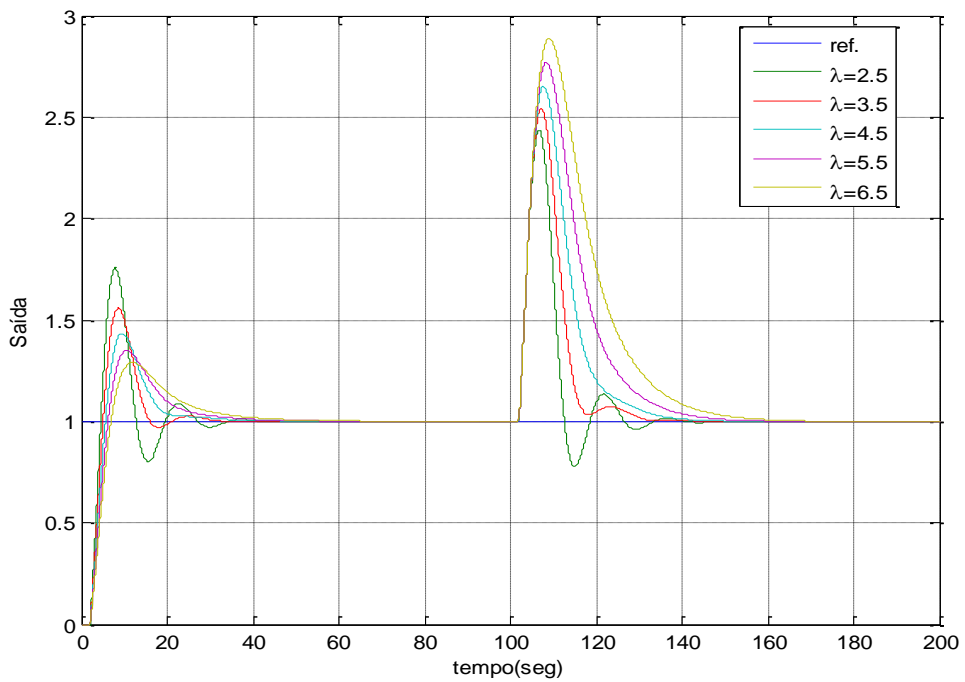
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.18 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 2000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.19 - Resposta do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 3000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



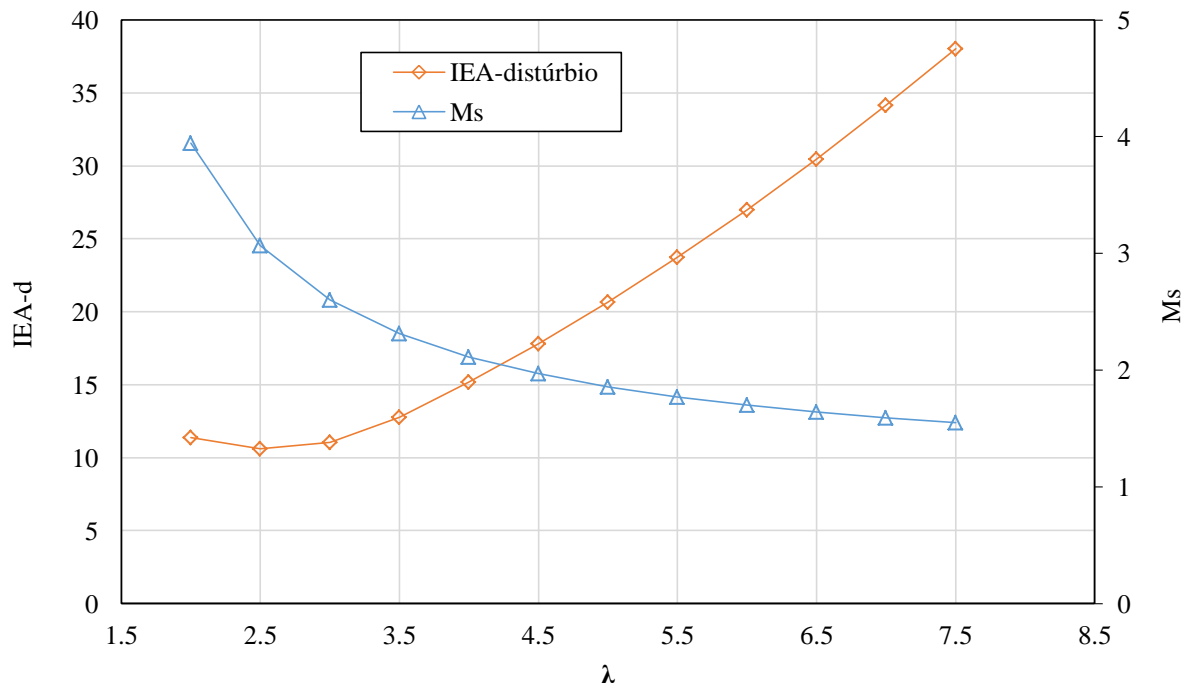
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.10 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 3000 metros.

$\lambda$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
2,5	3,068	10,617	75,751	1,987	31,862	0,0082	7,014	0,014
3,5	2,312	12,752	56,099	2,366	27,575	0,0071	9,014	0,014
4,5	1,968	17,809	43,457	2,785	28,626	0,0062	11,014	0,014
5,5	1,770	23,719	34,966	3,240	33,801	0,0055	13,014	0,014
6,5	1,641	30,463	29,216	3,736	39,584	0,0049	15,014	0,014

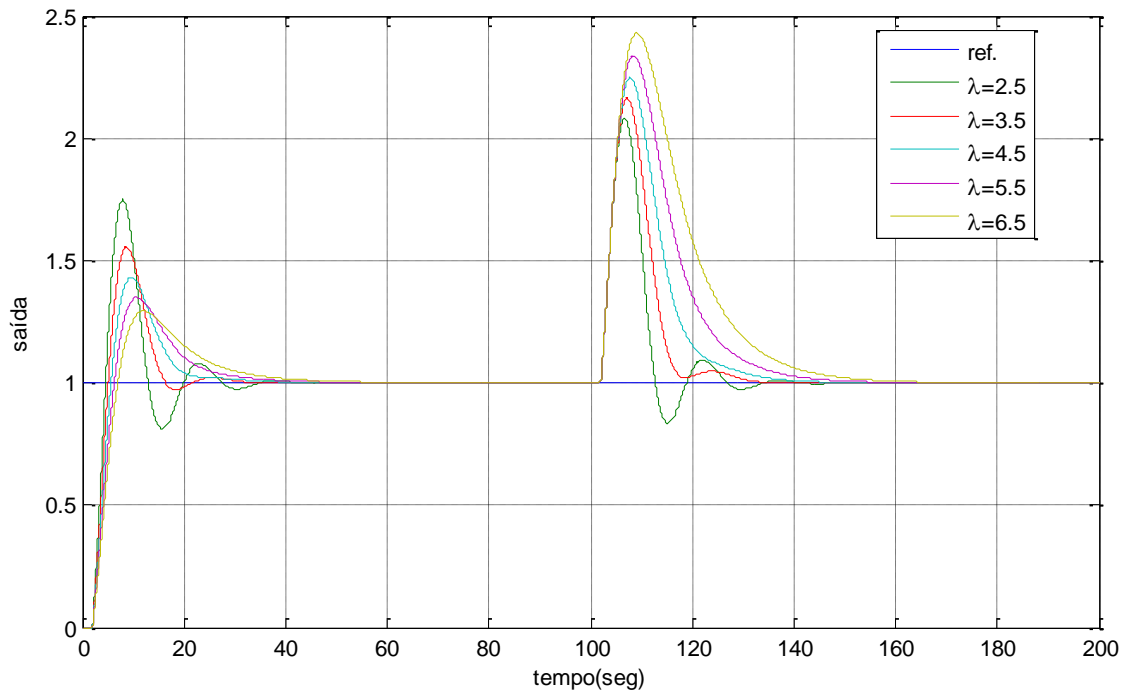
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.20 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 3000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.21 - Resposta do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 4000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



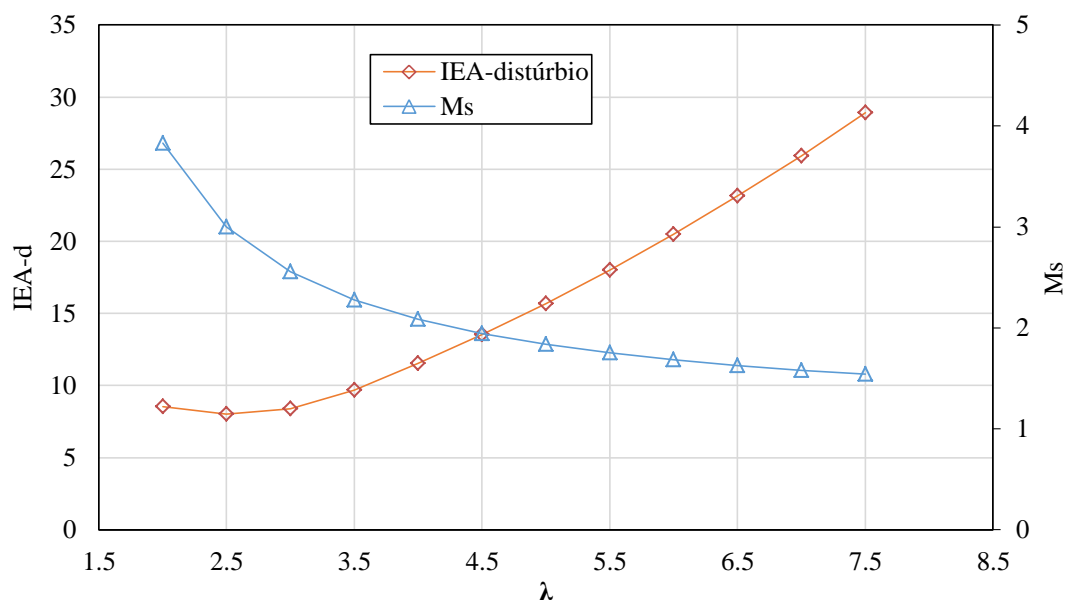
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.11 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 4000 metros.

$\lambda$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
<b>2,5</b>	3,002	8,033	74,882	2,013	32,002	0,0108	7,016	0,016
<b>3,5</b>	2,278	9,683	55,554	2,399	26,954	0,0093	9,016	0,016
<b>4,5</b>	1,946	13,524	43,184	2,825	26,565	0,0082	11,016	0,016
<b>5,5</b>	1,754	18,008	34,945	3,290	32,854	0,0072	13,016	0,016
<b>6,5</b>	1,628	23,137	29,399	3,795	38,592	0,0065	15,016	0,016

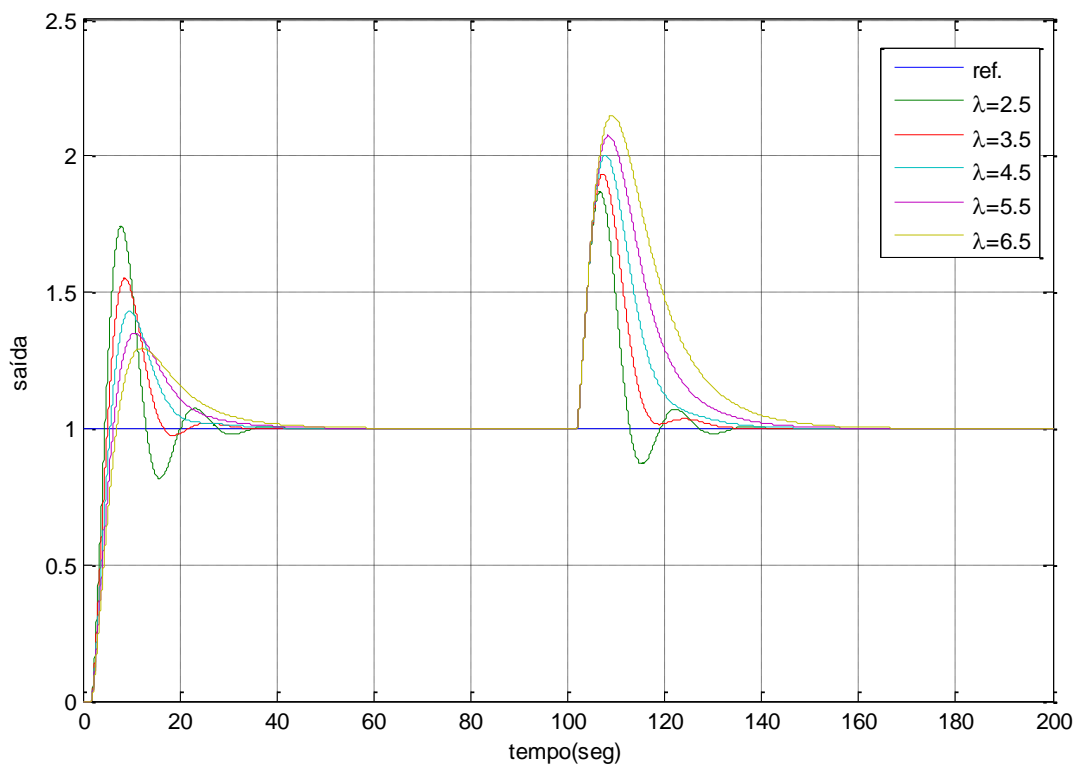
Fonte: Autoria Própria.

Figura C.22 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 4000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C.23 - Resposta do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 5000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



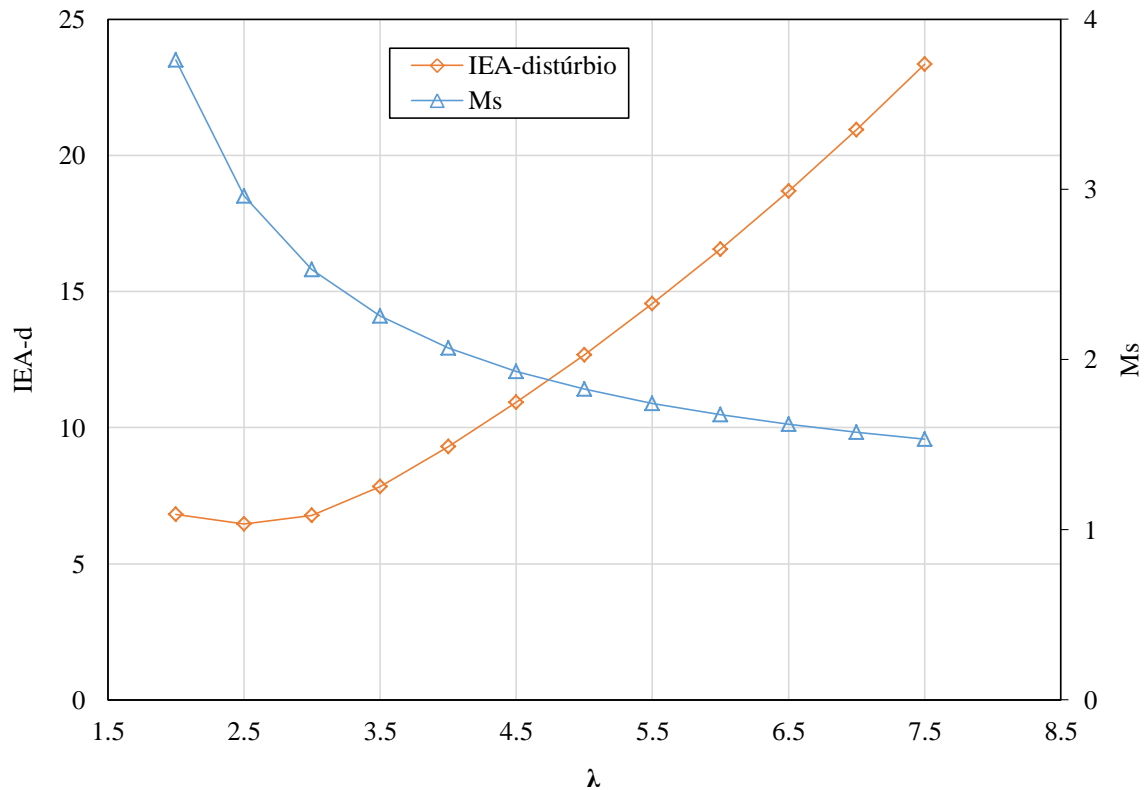
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.12 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 5000 metros.

$\lambda$	Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador		
	Ms	IEA-d	Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td
2,5	2,961	6,455	74,287	2,030	31,982	0,0134	7,018	0,018
3,5	2,256	7,823	55,169	2,421	19,952	0,0115	9,018	0,018
4,5	1,932	10,917	42,951	2,853	25,471	0,0101	11,018	0,018
5,5	1,743	14,545	34,874	3,323	32,517	0,0090	13,018	0,018
6,5	1,620	18,679	29,463	3,836	38,265	0,0081	15,018	0,018

Fonte: Autoria Própria.

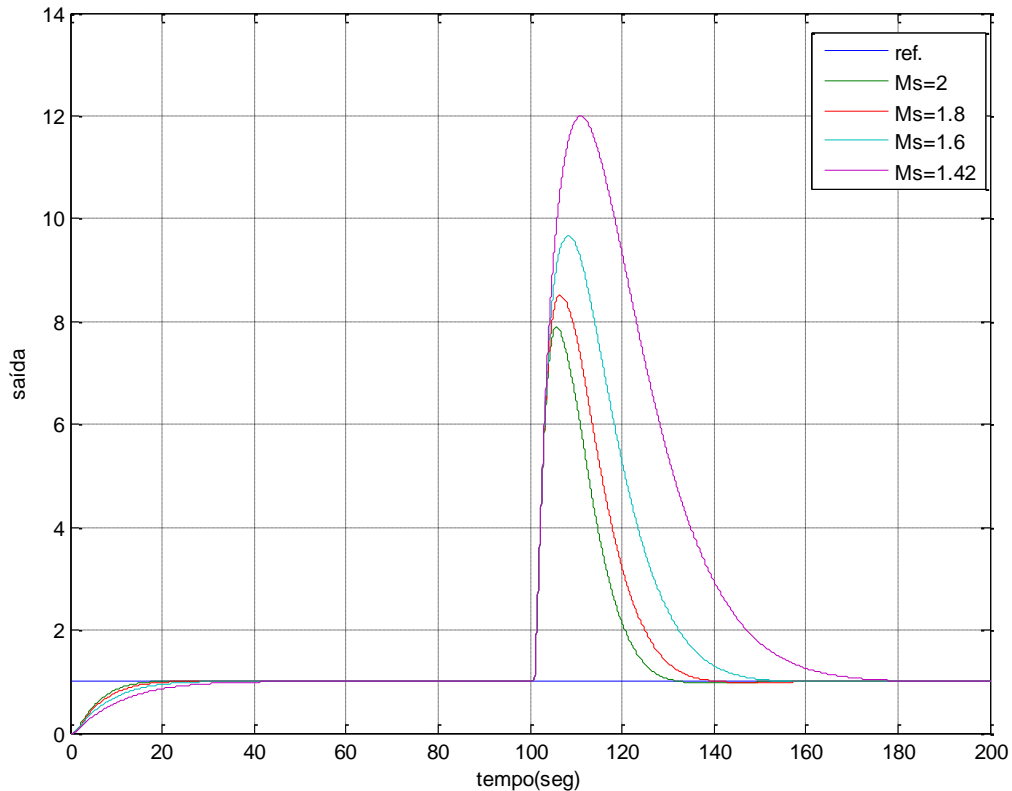
Figura C.24 - Integral do erro absoluto e robustez do sistema controlado por IMC para diferentes parâmetros  $\lambda$  na profundidade de 5000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

### C.3 ANÁLISE DO CONTROLE IMC COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES.

Figura C.25 - Resposta do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 500 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



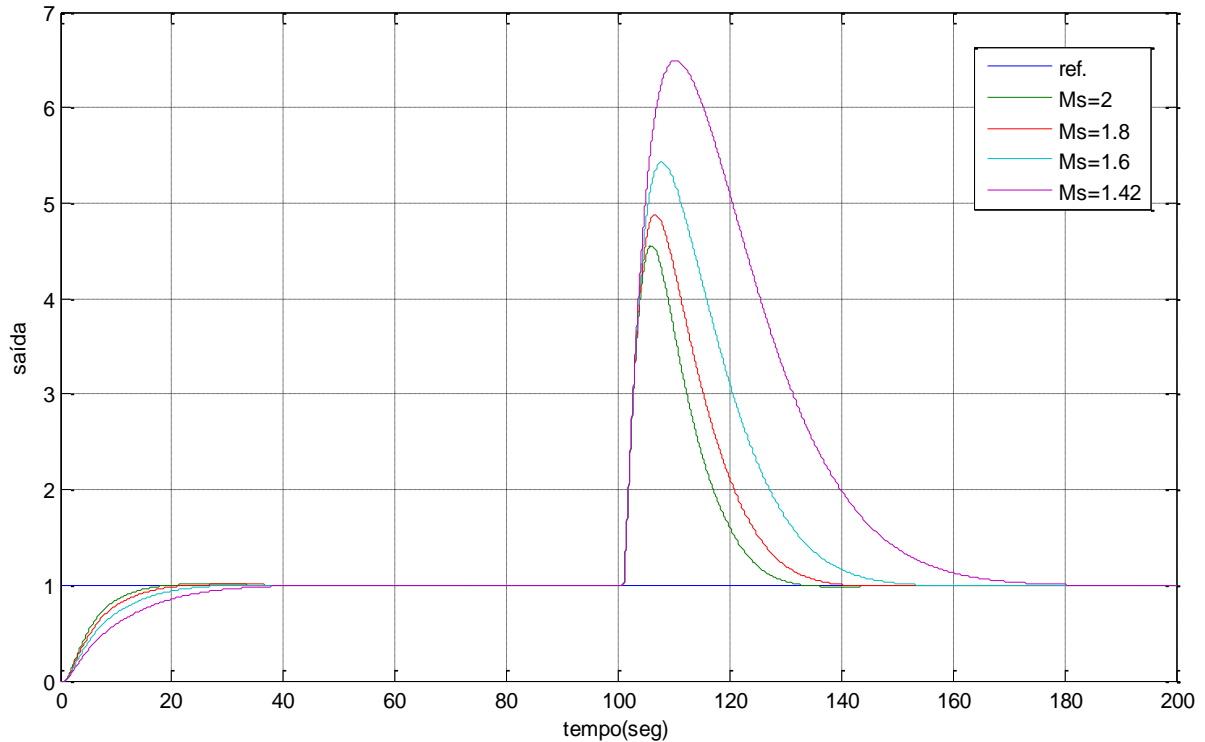
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.13 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 500 metros.

Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador			Filtragem	
		Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td	e	f
<b>2</b>	83,788	0	6,2954	13,6552	0,0012	9,6654	0,0218	0,0278	0,3966
<b>1,8</b>	109,683	0	8,5864	19,0488	0,0010	11,3630	0,0238	0,0323	0,4121
<b>1,6</b>	160,113	0	12,1313	24,8847	0,0009	14,1560	0,0269	0,0387	0,4294
<b>1,42</b>	281,379	0	18,3255	35,4258	0,0007	19,4135	0,0317	0,0490	0,4486

Fonte: Autoria Própria.

Figura C.26 - Resposta do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 1000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



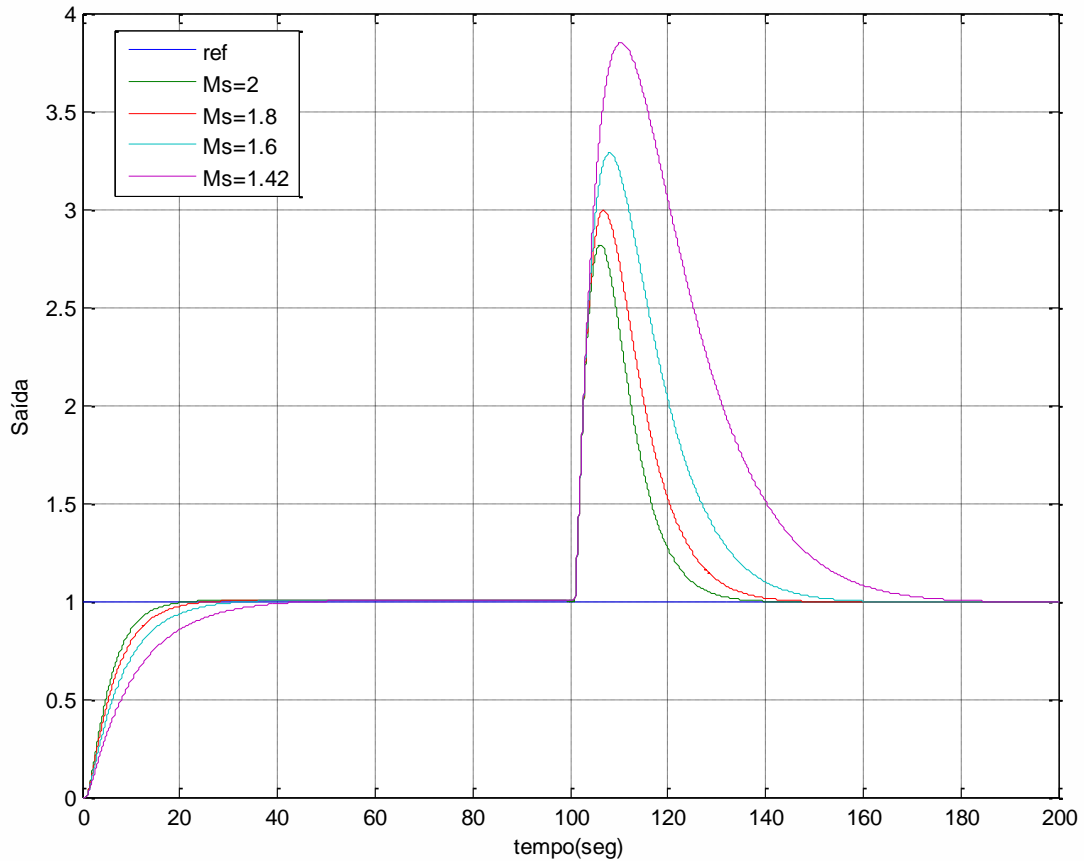
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.14 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 1000 metros.

Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador			Filtragem	
		Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td	e	f
<b>2</b>	42,025	0	5,809	18,986	0,0023	9,6649	0,0232	0,0278	0,03966
<b>1,8</b>	54,942	0	8,320	20,528	0,0021	11,3617	0,0254	0,0323	0,4121
<b>1,6</b>	80,053	0	12,986	25,145	0,0018	14,1527	0,0287	0,0387	0,4294
<b>1,42</b>	140,379	0	18,861	35,384	0,0014	19,4071	0,0339	0,0491	0,4486

Fonte: Autoria Própria.

Figura C.27 - Resposta do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 2000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



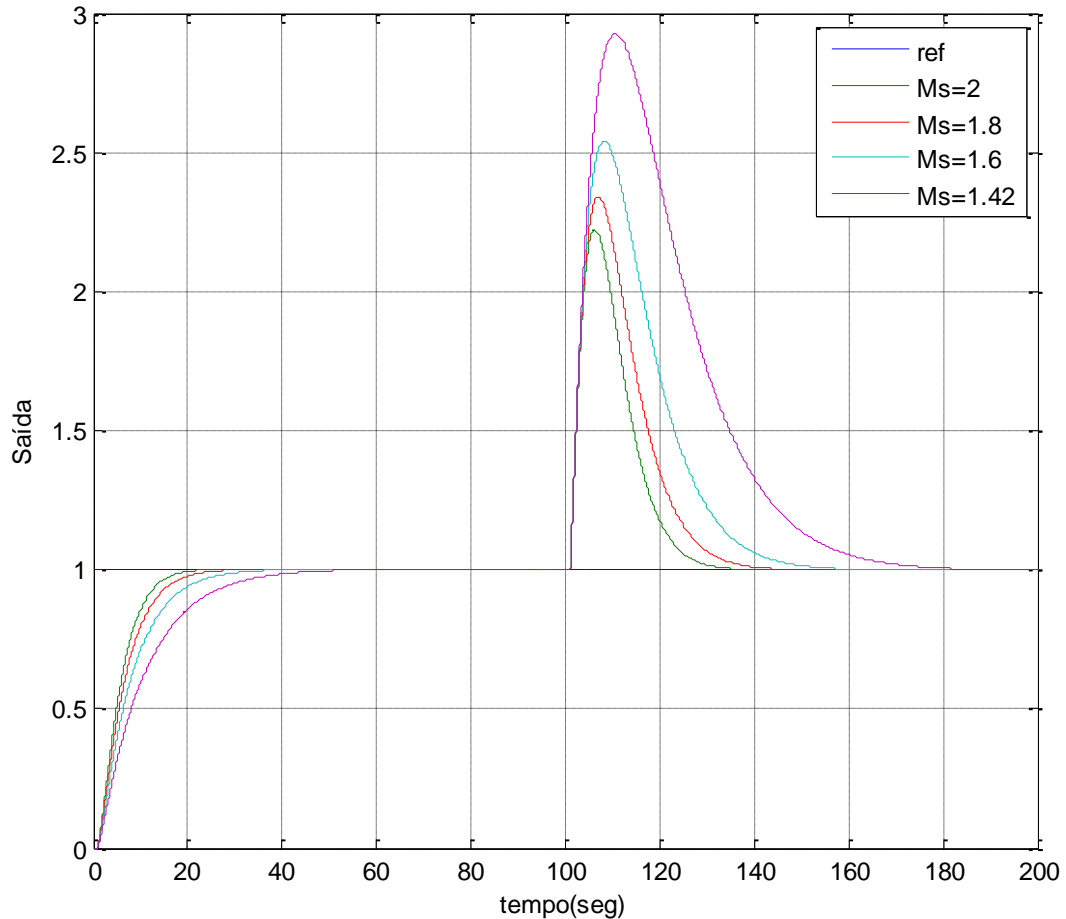
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.15 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 2000 metros.

Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador			Filtragem	
		Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td	e	f
<b>2</b>	21,224	0	5,4592	21,8969	0,0046	9,6647	0,0241	0,0279	0,3966
<b>1,8</b>	27,845	0	7,3169	24,1725	0,0041	11,3610	0,0263	0,0323	0,4121
<b>1,6</b>	40,672	0	13,0187	28,9655	0,0035	14,1509	0,0297	0,0387	0,4294
<b>1,42</b>	71,318	0	20,0177	38,6472	0,0027	19,4035	0,0351	0,0491	0,4486

Fonte: Autoria Própria.

Figura C.28 - Resposta do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 3000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



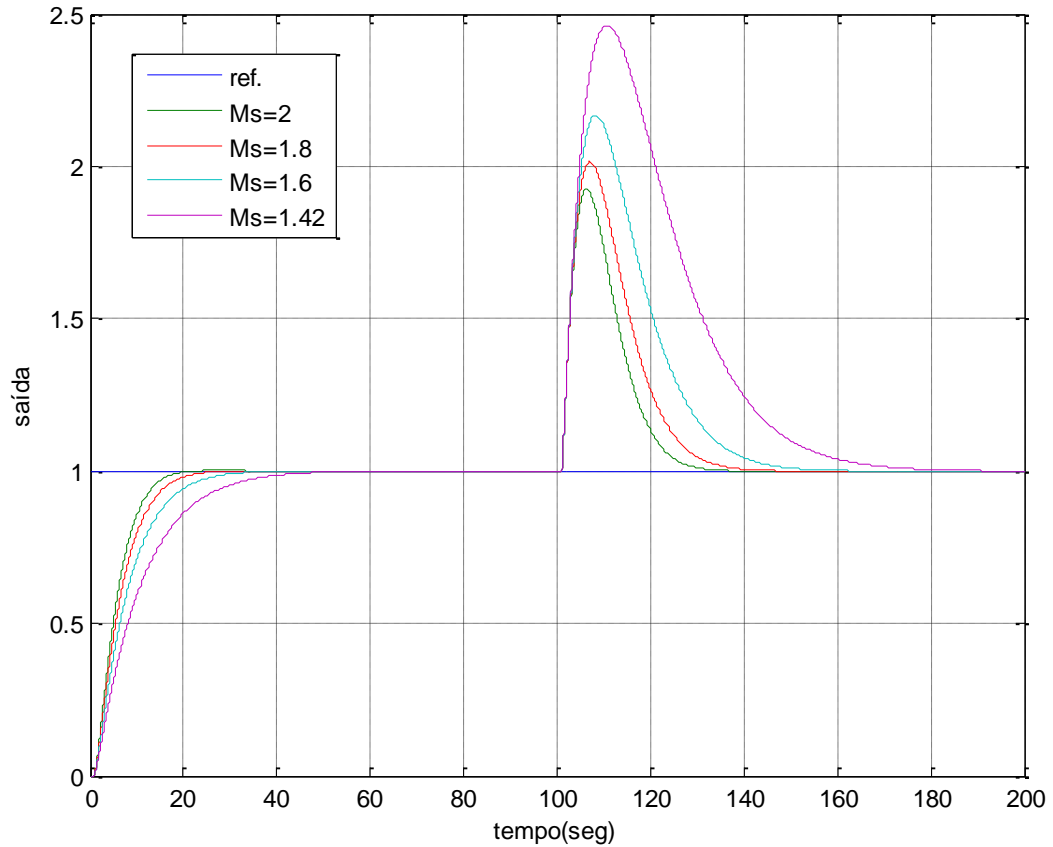
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.16 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 3000 metros.

Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador			Filtragem	
		Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td	e	f
<b>2</b>	14,268	0	3,5231	27,6803	0,0068	9,6645	0,0246	0,0279	0,3966
<b>1,8</b>	18,723	0	4,3912	29,6356	0,0061	11,3605	0,0268	0,0324	0,4121
<b>1,6</b>	27,346	0	16,9949	35,8627	0,0052	14,1498	0,0303	0,0387	0,4294
<b>1,42</b>	48,125	0	23,7590	48,8588	0,0040	19,4013	0,0358	0,0491	0,4486

Fonte: Autoria Própria.

Figura C.29 - Resposta do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 4000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



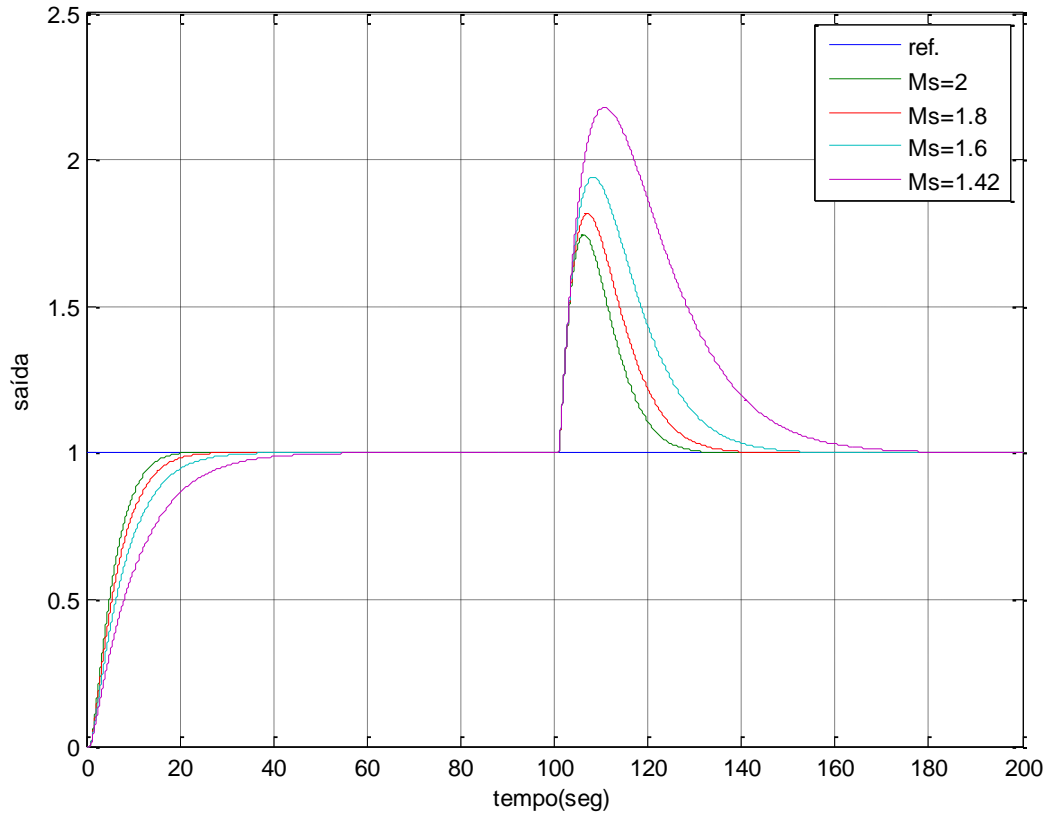
Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.17 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 4000 metros.

Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador			Filtragem	
		Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td	e	f
<b>2</b>	10,816	0	5,768	22,535	0,00895	9,66440	0,02489	0,02788	0,39662
<b>1,8</b>	14,190	0	7,506	24,022	0,00801	11,36025	0,02720	0,03236	0,41207
<b>1,6</b>	20,743	0	11,390	28,391	0,00683	14,14911	0,03072	0,03876	0,42942
<b>1,42</b>	36,503	0	18,356	38,646	0,00533	19,39991	0,03626	0,04913	0,44856

Fonte: Autoria Própria.

Figura C.30 - Resposta do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 5000 metros. O degrau na referência foi aplicado no tempo zero e o degrau de distúrbio no tempo 100 segundos.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela C.18 - Parâmetros do desempenho do sistema controlado por IMC com dois graus de liberdade para diferentes níveis de Robustez na profundidade de 5000 metros.

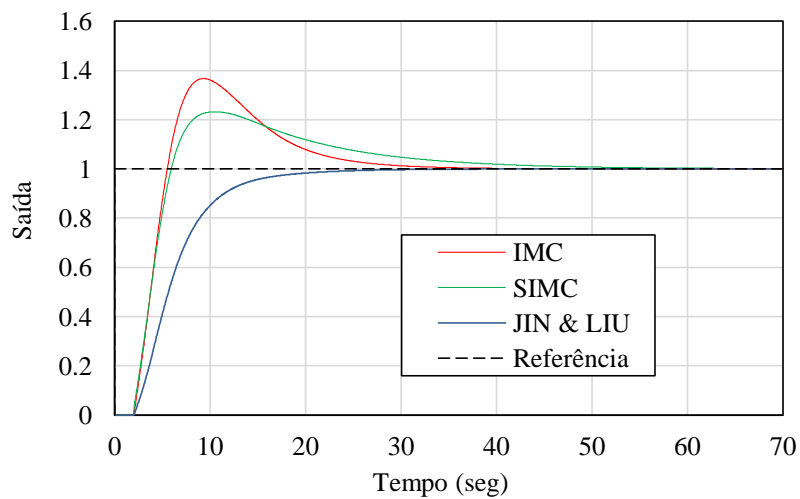
Robustez	Distúrbio	Resposta transitória			Parâmetros do controlador			Filtragem	
		Sobressinal (%)	Tempo de subida	Tempo de acomodação	kc	ti	td	e	f
<b>2</b>	8,721	0	5,815	22,413	0,01108	9,66430	0,02522	0,02789	0,39662
<b>1,8</b>	11,433	0	7,539	23,548	0,00993	11,35996	0,02756	0,03237	0,41207
<b>1,6</b>	16,713	0	11,290	27,787	0,00846	14,14839	0,03113	0,03877	0,42942
<b>1,42</b>	29,406	0	18,112	38,052	0,00660	19,39848	0,03673	0,04914	0,44855

Fonte: Autoria Própria.

## APÊNDICE D - Análise Comparativa dos Controladores IMC

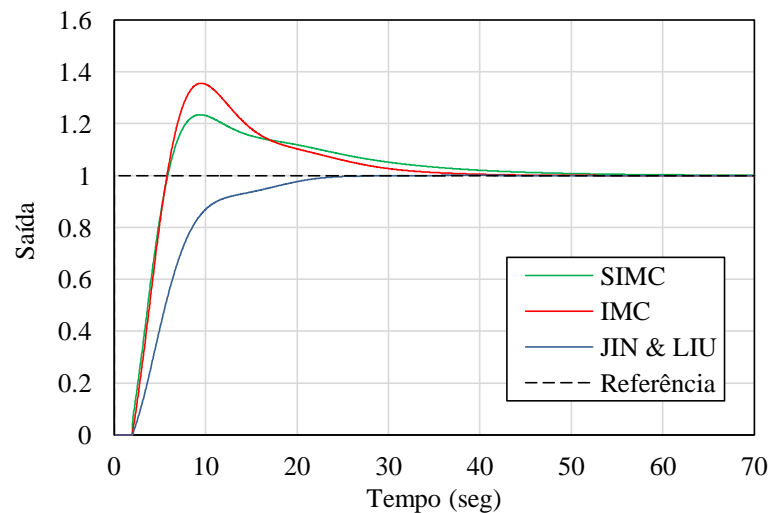
### D.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE CONTROLADORES IMC PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES NA RESPOSTA AO DEGRAU.

Figura D.1 - Comparação do desempenho da resposta do sistema ao degrau no sinal de referencia para os três controladores IMC na profundidade de 500 metros.



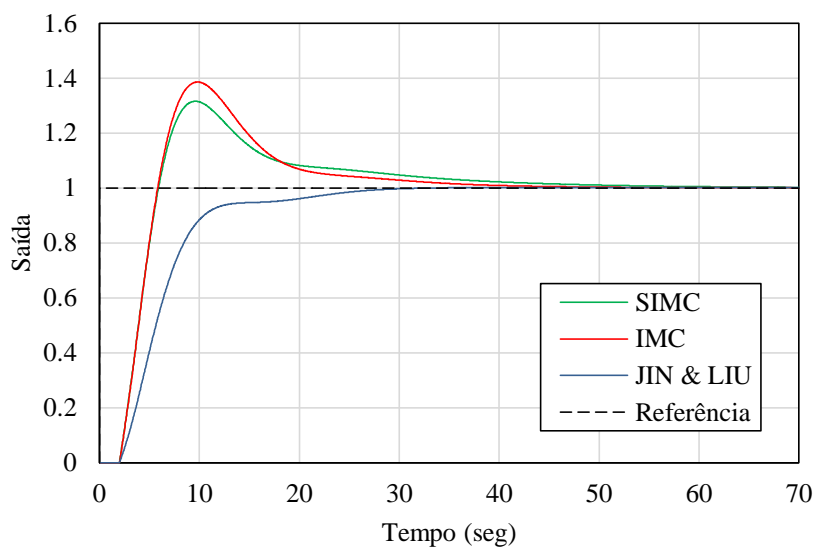
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.2 - Comparação do desempenho da resposta do sistema ao degrau no sinal de referencia para os três controladores IMC na profundidade de 1000 metros.



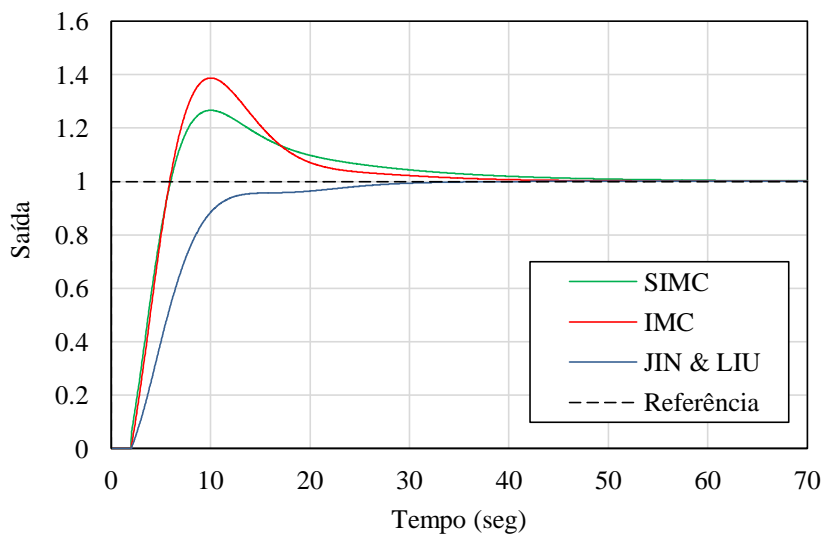
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.3 - Comparação do desempenho da resposta do sistema ao degrau no sinal de referencia para os três controladores IMC na profundidade de 2000 metros.



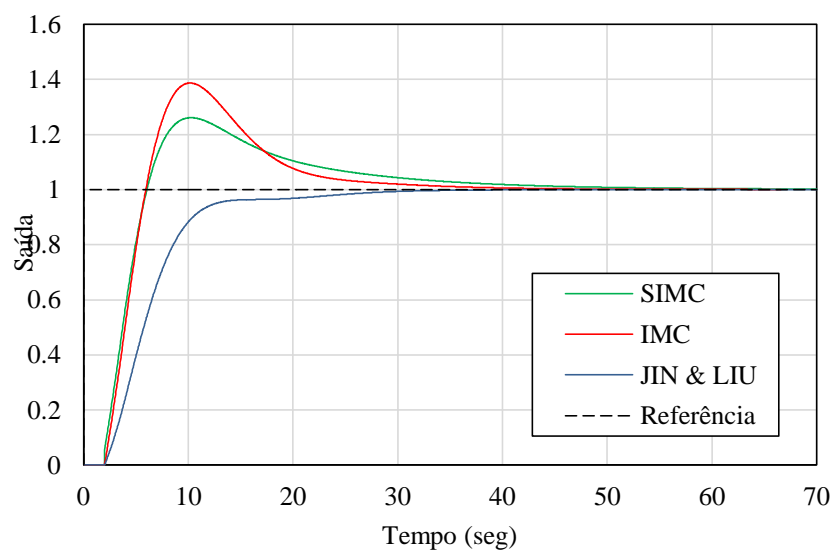
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.4 - Comparação do desempenho da resposta do sistema ao degrau no sinal de referencia para os três controladores IMC na profundidade de 3000 metros.



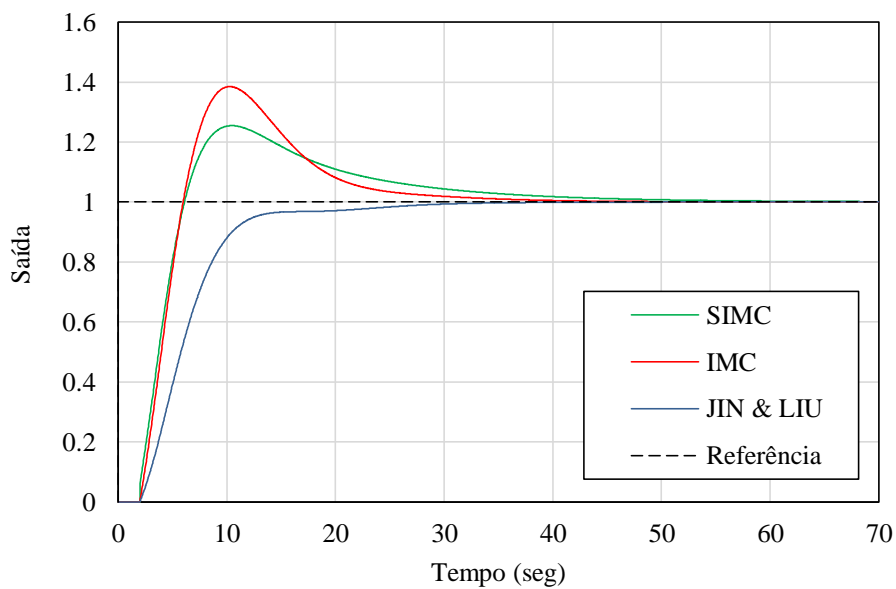
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.5 - Comparação do desempenho da resposta do sistema ao degrau no sinal de referencia para os três controladores IMC na profundidade de 4000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

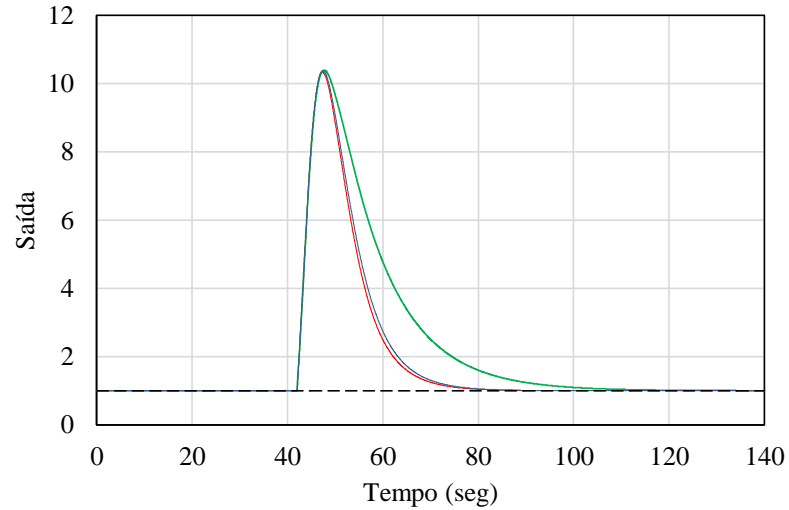
Figura D.6 - Comparação do desempenho da resposta do sistema ao degrau no sinal de referencia para os três controladores IMC na profundidade de 5000 metros.



Fonte: Autoria Própria.

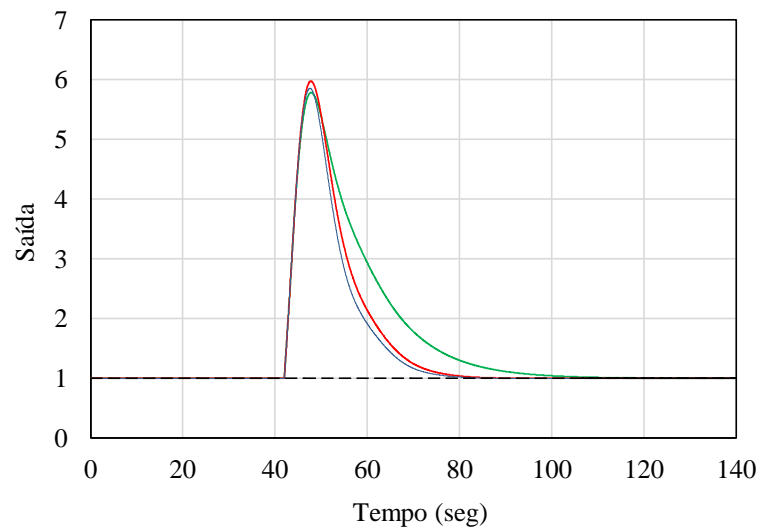
## D.2 ANÁLISE COMPARATIVA DE CONTROLADORES IMC PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES NA PRESENÇA DE DISTÚRPIO NO SINAL DE CONTROLE.

Figura D.7 - Comparação do desempenho da resposta do sistema em presença de distúrbio no sinal de controle para os três controladores IMC na profundidade de 500 metros.



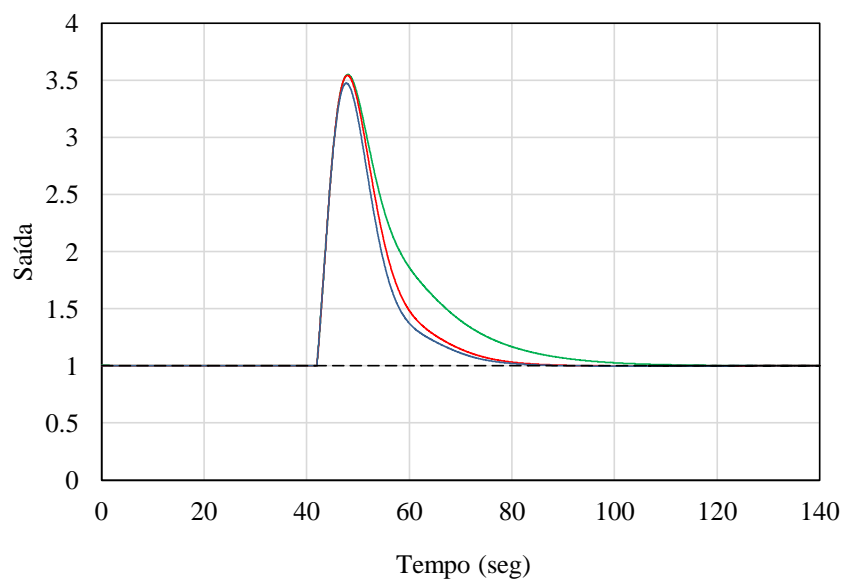
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.8 - Comparação do desempenho da resposta do sistema em presença de distúrbio no sinal de controle para os três controladores IMC na profundidade de 1000 metros



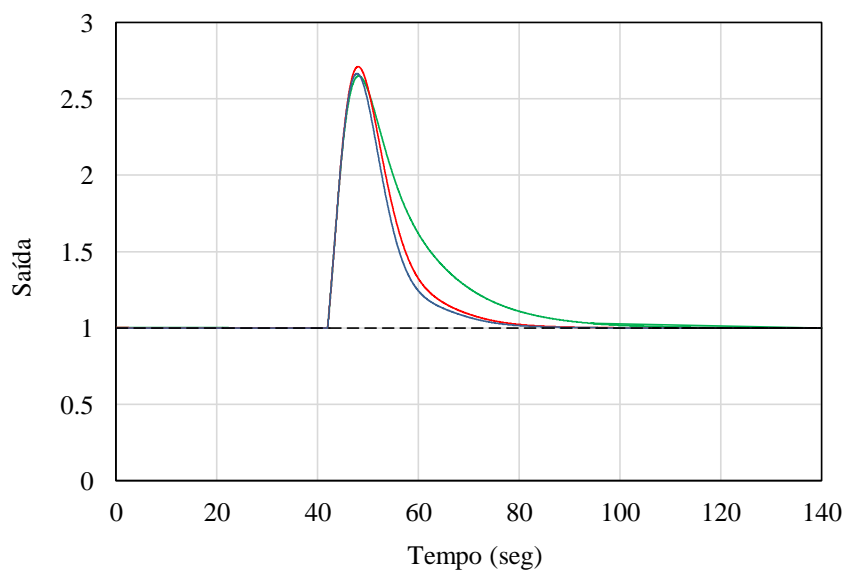
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.9 - Comparação do desempenho da resposta do sistema em presença de distúrbio no sinal de controle para os três controladores IMC na profundidade de 2000 metros



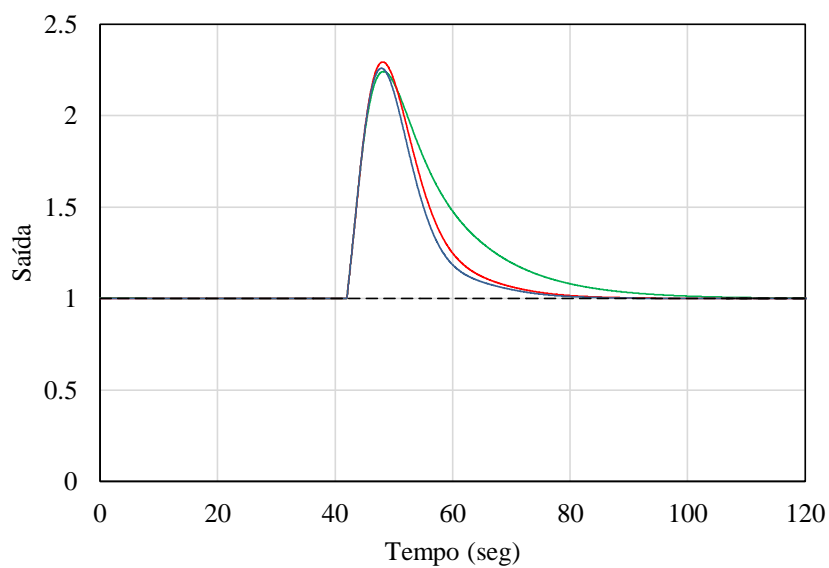
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.10 - Comparação do desempenho da resposta do sistema em presença de distúrbio no sinal de controle para os três controladores IMC na profundidade de 3000 metros



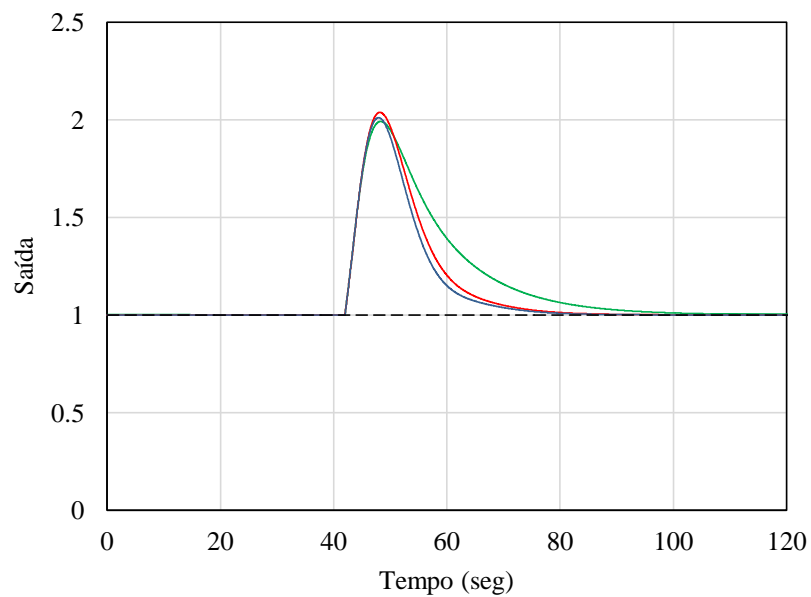
Fonte: Autoria Própria.

Figura D.11 - Comparação do desempenho da resposta do sistema em presença de distúrbio no sinal de controle para os três controladores IMC na profundidade de 4000 metros



Fonte: Autoria Própria.

Figura D.1 - Comparação do desempenho da resposta do sistema em presença de distúrbio no sinal de controle para os três controladores IMC na profundidade de 5000 metros



Fonte: Autoria Própria.